

Avaliação do potencial do resíduo cerâmico (RC) nas propriedades tecnológicas de tijolos de solo-aglomerante (s)

Nayara Jhêssica Marques da Fonsêca ^[1], Jonatas Macêdo de Souza ^[2], Ricardo Eugênio Barbosa Ramos Filho ^[3], Jaquéligia Brito da Silva ^[4], Vamberto Monteiro da Silva ^[5], Wilson Acchar ^[6]

[1] jhessica_marques5@hotmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/PEC. [2] jonatasms2@hotmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/PPGCEM. [3] ricramosf30@ufrn.edu.br. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/PPGCEM.

[4] jaqueligia.ufrn@gmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/ Departamento de Engenharia Civil.

[5] vambertomonteirodasilva@yahoo.com.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba/Unidade Acadêmica I.

[6] wacchar@gmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/PPGCEM.

RESUMO

O resíduo cerâmico (RC) oriundo das quebras no sistema construtivo tem sido utilizado em pesquisas com concretos, argamassas e tijolos. Neste trabalho, avaliaram-se as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de tijolos de solo-aglomerante em idades avançadas (90, 120, 150 e 365 dias), com utilização do RC como adição pozzolânica. O cimento e a cal foram aplicados em teores de 6% e 12% e o RC adicionado no teor de 4%, ambos em relação à massa do solo. Os tijolos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, absorção de água, durabilidade e microscopia eletrônica de varredura. Quanto à resistência à compressão e durabilidade, as amostras atenderam às prescrições da NBR 13553, resistência acima de 1MPa para materiais utilizados em paredes de solo-cimento e perda de massa abaixo de 7%, para o tipo de solo empregado. No ensaio de absorção de água, a mistura de solo com 12% de cal foi a única com valor acima do limite (20%) recomendado pela NBR 8491. As micrografias mostram que a adição de RC na formulação com cal proporcionou uma maior formação de compostos semelhantes ao CSH e CAH. É possível concluir que o RC contribuiu para melhoria das propriedades tecnológicas das formulações analisadas.

Palavras-chave: Tijolos de solo-aglomerante. Resíduo cerâmico. Pozzolanicidade. Sustentabilidade. Tijolo ecológico.

ABSTRACT

The ceramic waste (CW) originated from breaks in the construction system has been used in research with concretes, mortars, and bricks. This paper evaluated the physical, mechanical, and microstructural properties of soil-binder bricks at advanced ages (90, 120, 150, and 365 days) with the use of CW as a pozzolanic addition. Cement and lime were applied contents of 6% and 12%, and CW added to content of 4%, both concerning the soil mass. Tests of compressive strength, water absorption, durability, and scanning electron microscopy were carried out on the bricks. As for the compressive strength and durability, all samples met the requirements of NBR 13553, which establishes resistance above 1MPa for materials used in soil-cement walls and loss of mass below 7%, for the type of soil used. In the water absorption test, the mixture of soil with 12% of lime was the only one with value above the limit (20%) recommended by NBR 8491. The micrographs show that the addition of CW in the formulation with lime provided a higher formation of compounds similar to CSH and CAH. It is possible to conclude that the CW contributed to improving the technological properties of the analyzed formulations.

Keywords: Soil-binder bricks. Ceramic waste. Pozzolanicity. Sustainability. Eco-friendly brick.

1 Introdução

A construção civil exerce grande degradação no meio ambiente. As atividades empregadas nessa indústria, desde a extração até a destinação final dos resíduos produzidos, modificam a paisagem e comprometem a qualidade do ambiente local. Estima-se que o setor seja responsável por consumir cerca de 50% de todos os recursos naturais extraídos, e por gerar 60% de todo o resíduo sólido urbano (CBCS, 2014). Os impactos causados são visíveis e demonstram a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas para a reutilização dos resíduos (FIGUEIREDO *et al.*, 2012).

Entre os passivos ambientais, pode-se destacar o resíduo cerâmico (RC) oriundo do sistema construtivo, devido ao grande volume gerado na fase de obras das edificações (RASHID *et al.*, 2017).

Pacheco-Torgal e Jalali (2010) estudaram concreto com substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico e concluíram que o concreto com 20% de substituição, apesar de apresentar uma pequena perda de resistência, possui uma maior durabilidade. Mohammadhosseini *et al.* (2019) investigaram o desempenho de argamassas contendo o pó cerâmico como material complementar ao cimento, e partículas de cerâmica como agregado miúdo submetidos ao ataque de cloreto e sulfato. Verificou-se que a interação entre o pó e o agregado fino cerâmico foi positiva e permitiu uma maior formação cristalina, reduzindo a porosidade e as fissuras das argamassas produzidas.

Ay e Ünal (2000) adicionaram ao cimento Portland, na produção de argamassas, o resíduo cerâmico obtido a partir de placas de revestimento, com a finalidade de verificar a atividade pozolânica. Embora as placas que deram origem ao resíduo tenham sido submetidas a temperaturas entre 1100°C e 1200°C (o que poderia afetar a pozolanicidade devido ao possível aumento da cristalinidade de materiais cerâmicos em temperaturas acima de 1000°C), o que se percebeu foi que a soma dos óxidos de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e ferro (FeO₃) do resíduo estudado foi igual a 86%, o que constatou sua pozolanicidade. Assim, o resíduo cerâmico pôde ser adicionado ao cimento em até 35% em relação à massa.

Para Amaral (2016), o efeito pozolânico fica mais evidente em RCs obtidos a partir de tijolos ou telhas que são sinterizados até 1000°C, obtendo fases com cristalinidade mais baixa. Isso proporciona maior reatividade e melhoria nas propriedades com o tempo

de cura, conforme apresentado no trabalho de Silva *et al.* (2014), que utilizaram o RC de tijolos cerâmicos nas misturas de solo-cimento para produção de tijolos maciços.

A possibilidade de se utilizar adições pozolânicas em materiais à base de cimento permite que a redução desse insumo seja avaliada. O processo de fabricação do cimento envolve um altíssimo consumo energético, resultando em um elevado custo final e na emissão de significativos percentuais de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. A produção também é apontada como uma das atividades mais poluentes do meio ambiente. Estima-se que cerca de 0,9 a 1,1 tonelada de CO₂ seja lançada na atmosfera a cada tonelada de cimento produzida (EL-ATTAR; SADEK; SALAH, 2017).

Embora o uso do resíduo cerâmico tenha sido estudado em materiais à base de cimento, poucos trabalhos verificaram a influência da adição do resíduo pozolânico em tijolos de solo-aglomerante em idades avançadas. Portanto, este artigo teve o objetivo de avaliar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de tijolos ecológicos de solo-cimento, solo-cal e solo-cimento-cal, ao longo do tempo, produzidos com o resíduo cerâmico em adição aos aglomerantes.

2 Referencial teórico

O cimento e a cal são considerados os principais aglomerantes empregados para a estabilização de solos. Trata-se de uma técnica bastante utilizada com a finalidade de melhorar as características naturais desse material, de forma que o mesmo atinja as especificações necessárias para o uso que lhes será atribuído (OJURI; ADAVI; OLUWATUYI, 2017).

O processo de estabilização de um solo aumenta a sua resistência e estabilidade frente à aplicação de carregamentos e à erosão. Isso se dá através de ações como compactação, correção granulométrica, correção de plasticidade, e também por meio da adição de substâncias aglutinantes que conferem coesão às partículas que o constituem (GÓIS, 2012).

Os materiais pozolânicos são aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que, individualmente, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, porém sofrem importante influência em função da granulometria do material. Quanto mais finamente particulado, maior a reatividade desenvolvida, sendo a reação pozolânica potencializada. Em presença de umidade, estes materiais reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes.

A reação pozolânica ocorre, fundamentalmente, entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ABNT, 2014; GARCIA, 2015).

As pozolanas são classificadas em materiais naturais e artificiais, sendo as de origem natural as cinzas vulcânicas com teor de SiO_2 maior que 65% e minerais de origem sedimentar com atividade pozolânica. As propriedades do pó cerâmico promovem atividade pozolânica. Dessa forma, o resíduo cerâmico (RC) tem potencial para ser usado como material cimentício suplementar, além de ser classificado como resíduo Classe A, que são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como agregados que provêm de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, dentre outros (CONAMA, 2002; ABNT, 2014; RASHID *et al.*, 2017).

Argilas calcinadas, que correspondem à composição do RC, quando adicionadas ao cimento Portland, além de melhorarem as propriedades mecânicas também aumentam a durabilidade do produto final, fator determinante no que se refere à viabilidade de uso de um material, em questão de resistência à compressão e permeabilidade (ANTONI, 2013).

A durabilidade é a propriedade que garante o desempenho, a integridade e a vida útil do material. Durante todo o tempo de sua utilização, o material deve resistir aos ataques dos agentes agressivos físicos e químicos do meio no qual está inserido (SOUZA, 2011).

Essa durabilidade é avaliada baseando-se, primeiramente, na identificação das necessidades do usuário. Para avaliar um material que será usado como alternativo, deve-se observar a importância da manutenção das suas características físicas e químicas, da sua resistência, dos seus esforços dinâmicos e estáticos e, principalmente, deve-se observar se o material é durável ao longo do tempo (SILVA, 2002).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a atividade pozolânica necessita de um maior tempo de cura para que se desenvolva. Dessa forma, essa atividade torna-se fundamental para a melhoria da resistência do material ao longo do tempo, aumentando sua durabilidade.

Além do efeito químico (pozolanicidade), o RC, quando finamente moído, pode apresentar o efeito filler. Esse efeito é responsável pelo preenchimento de vazios no sistema solo-aglomerante, aumentando a compacidade do solo e, conseqüentemente, sua resistência (DALLACORT *et al.*, 2002). Segundo Rocha, Cordeiro e Toledo (2013), o efeito filler promove um

melhor empacotamento entre partículas, pois preenche espaços vazios e facilita a nucleação heterogênea de produtos hidratados na parte externa das partículas. Logo, esse efeito contribui para a redução da porosidade do material, para o aumento da massa específica e da resistência mecânica, ampliando, por conseqüência, a sua durabilidade.

Dallacort *et al.* (2002) realizaram uma pesquisa com substituição parcial do cimento por RC (proveniente de tijolos cerâmicos) em solo-cimento e afirmaram que o RC apresentou ação pozolânica, com a soma dos óxidos de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e ferro (FeO_3) sendo igual a 91,8%, e também apresentou efeito filler, preenchendo pequenos espaços vazios entre as partículas de solo e aumentando a massa específica do material.

Silva *et al.* (2014), em estudo com tijolos de solo-aglomerante (s), utilizaram 2% e 4% de RC, e 8%, 10% e 12% de aglomerantes (cimento, cal e cimento-cal), ambos em relação à massa do solo. Os pesquisadores constataram a ação pozolânica do RC tanto por meio da análise da composição química com a soma dos óxidos de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), e ferro (FeO_3) sendo igual a 89,1% quanto pelo aumento da resistência mecânica das amostras aos 56 dias. A curto prazo (7 dias), devido ao efeito filler do RC, houve uma redução da porosidade das amostras no ensaio de absorção de água. No ensaio de durabilidade foi verificado que a perda de massa diminuiu com o aumento do teor de RC, justificando o fato de que os resultados podem ser atribuídos a uma maior densificação da mistura proporcionada pelo efeito filler do RC. Os resultados da pesquisa mostram que o resíduo pode contribuir para o aumento da durabilidade dos tijolos.

3 Metodologia

O solo utilizado foi coletado na BR-101 (Km 126), próximo ao rio Baldun, no estado do Rio Grande do Norte (RN). Trata-se de um solo tipo A-6 (ASTM, 2015), com características de um solo sem calcário na sua composição, porém arenoso com fração fina silto-argilosa. O cimento Portland empregado foi o cimento composto CP II F-32 que apresenta propriedades recomendadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1985), para a produção de composições solo-cimento. Utilizou-se a cal cálcica hidratada, CH-II (ABNT, 2003) fabricada no município de Campina Grande/PB. O resíduo cerâmico (RC) foi coletado em obras de pequeno e médio portes na cidade de Natal/RN e provêm da quebra de tijolos

cerâmicos usados em alvenarias de vedação. A água utilizada é oriunda do sistema de abastecimento público da cidade de Natal/RN, fornecida pela concessionária local, a CAERN – Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.

O solo e o RC foram caracterizados através de análise granulométrica NBR 7181 (ABNT, 2016a) e limites de Atterberg, limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 2016b) e limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 2016c) para a determinação do índice de plasticidade. O solo e o RC ainda foram submetidos ao ensaio de análise mineralógica por Difração de raios X (DRX). Todas as matérias-primas foram submetidas à análise química por Fluorescência de raios X (FRX).

Na pesquisa, seis formulações foram estudadas. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura das misturas solo-aglomerante com e sem RC, aplicadas na moldagem dos tijolos maciços. O percentual mínimo de aglomerante (cal e/ou cimento) recomendado para a estabilização química dos solos é 6%, de acordo com Sherwood (1993), enquanto que o teor de 12% está vinculado à viabilidade econômica para a produção desse produto. O percentual de RC usado foi adotado a partir dos relevantes resultados físicos e mecânicos obtidos por Silva *et al.* (2014).

Tabela 1 – Nomenclaturas das composições produzidas na pesquisa

Nomenclatura	Denominação da composição
12CH	Solo + 12% cal hidratada
12CH4RC	Solo + 12% cal hidratada + 4%RC
6CH6C	Solo + 6% cal hidratada + 6% cimento
6CH6C4RC	Solo + 6% cal hidratada + 6% cimento + 4%RC
12C	Solo + 12% cimento
12C4RC	Solo + 12% cimento + 4%RC

Fonte: dados da pesquisa.

As matérias-primas utilizadas para a fabricação dos tijolos foram misturadas mecanicamente com o auxílio de betoneira. Foi usado um teor de 14,81% de água em relação à massa do solo para a preparação das amostras. A quantidade de água foi determinada, no ensaio de compactação, seguindo a NBR 7182 (ABNT, 2016d) e está relacionada com a umidade ótima para obtenção de uma maior densidade aparente

durante a prensagem. Para cada composição proposta foram produzidos 18 tijolos maciços, sendo 12 para o ensaio de resistência à compressão simples (RCS), 3 para absorção de água (AA) e 3 para o ensaio de durabilidade modificado. Ao todo foram produzidos 108 tijolos de solo-aglomerante (s). Uma prensa manual com espessura de 5 cm, largura de 10 cm e comprimento de 21 cm foi utilizada para a prensagem dos tijolos. Após a moldagem, os tijolos foram curados e envoltos numa membrana em PVC com a finalidade de amenizar o processo de recarbonatação nos tijolos com cal, bem como de evitar a perda da água de amassamento, o que é importante para o processo de hidratação dos aglomerantes presentes nas misturas. A cura se deu por 90, 120, 150 e 365 dias, devido ao fato de a cinética de hidratação da cal e das reações pozolânicas ser mais lenta em relação à hidratação do cimento Portland (GUIMARÃES, 2002).

Concluído o período de cura, foi realizado o capeamento dos tijolos maciços e determinou-se a resistência à compressão simples, de acordo com a norma brasileira NBR 8492 (ABNT, 2012a).

Durante a realização do ensaio de absorção de água, de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012a), os tijolos maciços foram pesados e em seguida colocados em estufa retilínea, à temperatura de 105°C/110°C, até atingirem constância de massa. Posteriormente, foram novamente pesados e colocados em imersão por um período de 24 horas consecutivas. Passado esse período, os tijolos foram retirados da imersão e pesados. Com os dados obtidos nos ciclos de pesagem, secagem e imersão em água, foi calculado o percentual de absorção de água.

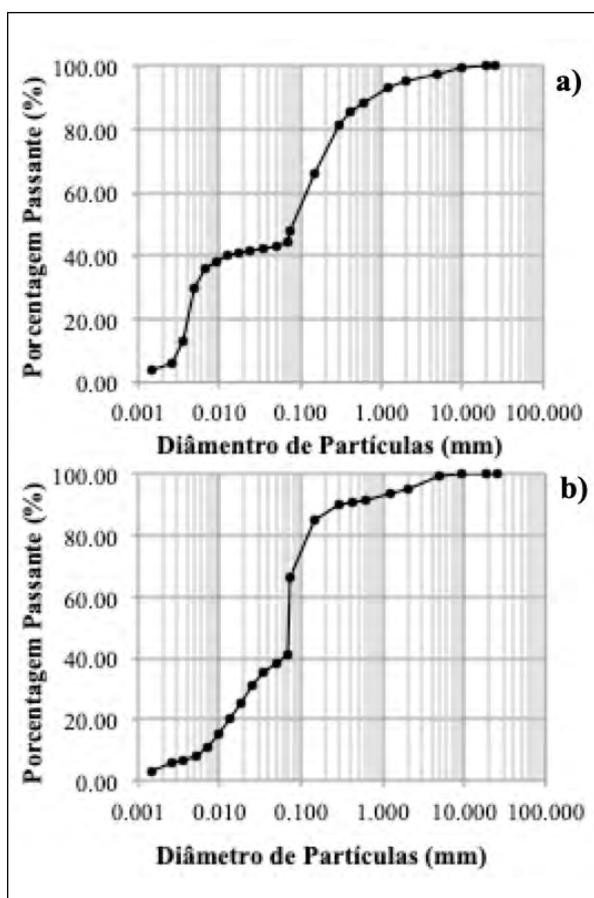
Em seguida, realizou-se o ensaio de durabilidade modificado de acordo com a ME 203-94 (DNER, 1994), sendo dispensada a etapa de escovação dos tijolos devido aos esforços de abrasão atuantes em alvenarias de vedação serem menos rigorosos do que aqueles que ocorrem em pavimentos rodoviários. Por fim, para avaliar o efeito do RC na microestrutura de formulações com cal (que tende a apresentar cinética de reação mais lenta que o cimento), as amostras 12CH e 12CH4RC foram submetidas ao ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4 Resultados e discussões

Os resultados do ensaio de análise granulométrica do solo e do RC, estão representados nas Fig. 1 a) e 1 b). Os percentuais do solo e do RC que passam nas peneiras são, respectivamente, 100% para ambas

as amostras na peneira de Nº 4 (4,8 mm), 85,31% e 90,93% na de Nº 40 (0,42 mm) e 47,70% e 66,43% na peneira Nº 200 (0,075 mm). Os resultados obtidos demonstraram que o solo escolhido atende aos parâmetros previstos pela NBR 10833 (ABNT, 2012b) para solos a serem utilizados na fabricação de tijolos de solo-cimento, para os quais 100% das partículas deve passar nas peneiras Nº 4 e Nº 10, e 50% na peneira de Nº 200.

Figura 1 – Curva de distribuição granulométrica. a) Solo e b) RC



Fonte: dados da pesquisa.

Os valores obtidos nos ensaios de determinação dos limites de Atterberg do solo, sem e com a adição de 4% de RC, estão na Tabela 2. Verificou-se que esses valores estão de acordo com as prescrições da NBR 10833 (ABNT, 2012b), que estabelece que o limite de liquidez seja menor ou igual a 45%, e que o índice de plasticidade seja menor ou igual a 18%. Vale ressaltar que a adição do RC não causou alterações significativas, não interferindo, portanto, na trabalhabilidade do solo.

Tabela 2 – Limites de Atterberg do solo isolado e do solo com adição de RC

Limites de Atterberg	Solo	Solo + 4RC
LL	28,40%	29,50%
LP	17,80%	17,98 %
IP	10,60%	11,52%

Legenda: LL: Limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade; IP: Índice de plasticidade.

Fonte: dados da pesquisa.

A composição química das matérias-primas foi identificada através do ensaio de FRX e é apresentada na Tabela 3. Verifica-se que o solo apresenta elevados teores de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), totalizando 88,2% da composição química total, o que indica forte presença dos minerais quartzo e caulinita, comprovada pelo ensaio de DRX apresentado na Fig. 2 a).

Com relação à Cal, verifica-se na Tabela 3 um percentual de óxido de cálcio (CaO) da ordem de 88,3% e de óxido de magnésio (MgO) da ordem de 6,43%, sendo o material classificado como uma cal cálcica tipo CH-II, de acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003). O cimento, apresenta um percentual de óxido de cálcio (CaO) da ordem de 60,84%, o que confirma a adição de filler calcário indicada pelo fabricante. O resíduo cerâmico, demonstra elevados teores de sílica, alumina e óxido de ferro, que correspondem a cerca de 89,10% da composição do resíduo. Portanto, o RC classifica-se como uma pozolana artificial – Classe N, pois esse percentual supera o valor mínimo requerido de 70% pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Quanto à composição mineralógica do RC, a Fig. 2 b) demonstra a ocorrência das fases Quartzo, Flogopita e Anortita.

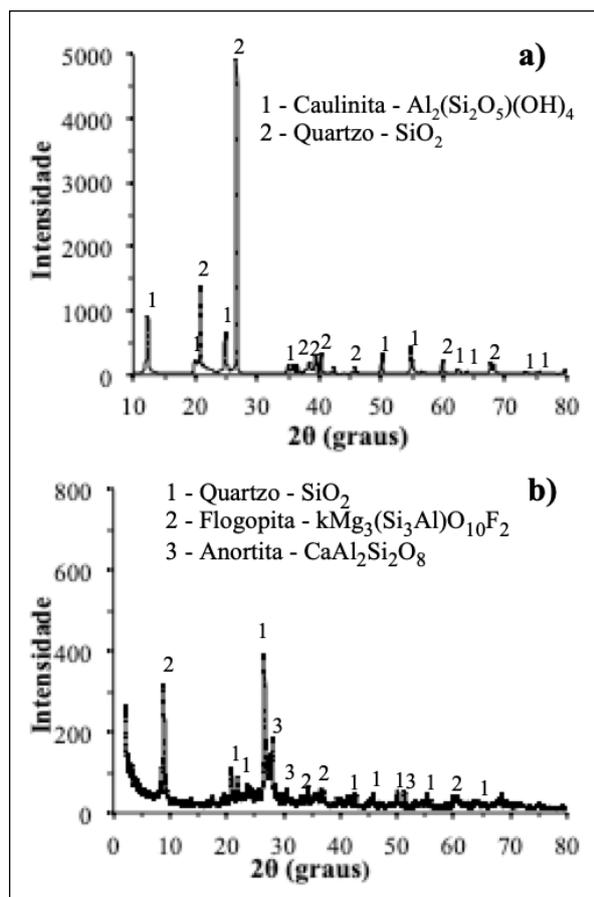
Tabela 3 – Composição química do solo, aglomerantes e RC

Óxidos	Solo	CH	C	RC
SiO ₂	52,2	2,31	19,03	45,59
Al ₂ O ₃	36,0	0,75	4,60	35,69
Fe ₂ O ₃	1,91	0,47	3,22	7,82
MgO	0,49	6,43	3,20	4,11
CaO	-	88,3	60,84	1,46
K ₂ O	0,25	0,12	1,22	2,38
Na ₂ O	-	-	0,15	0,97
MnO	-	-	-	0,07
TiO ₂	0,68	-	0,27	0,94

Legenda: CH: Cal hidratada; C: cimento; RC: resíduo cerâmico.

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 2 – a) DRX do solo e b)
DRX do resíduo cerâmico



Fonte: dados da pesquisa.

Na Fig. 3, constata-se que todas as composições apresentaram valor superior a 1 MPa no ensaio de resistência à compressão simples, atendendo à norma brasileira NBR 13553 (ABNT, 2012c). Esses resultados evidenciam a contribuição da estabilização mecânica do solo proporcionada pela prensagem que age em conjunto com a estabilização química oriunda da ação dos aglomerantes.

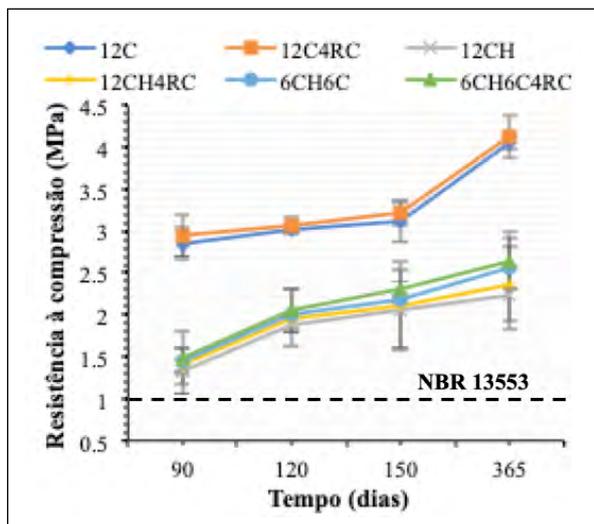
Sem considerar a adição de RC, a amostra de solo-cimento 12C (solo mais 12% de cimento) apresentou maior resistência à compressão, seguida da amostra de solo-cimento-cal, 6CH6C (solo mais 6% de cal e 6% de cimento). Isso pode ser explicado, devido ao fato de a cinética da reação de hidratação do cimento ser mais rápida que a da cal. Sendo assim, comparando-se com a aplicação isolada da cal, pode-se afirmar que as fases responsáveis pela estabilização e ganho de resistência do solo são formadas mais rapidamente quando o cimento é utilizado. Observa-se que mesmo

sem a adição do resíduo, a resistência mecânica das amostras com cimento continua crescendo ao longo do tempo, o que pode estar relacionado às reações pozolânicas que ocorrem entre o solo e o cimento, uma vez que o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, produzido a partir da hidratação das fases C_3S e C_2S , pode reagir com a sílica e a alumina desorganizadas que estão disponíveis no solo, formando outras fases responsáveis pelo aumento da resistência como CSH (Silicato de Cálcio Hidratado), CAH (Aluminato de Cálcio Hidratado) e CASH (Silicato Aluminato de Cálcio Hidratado).

Embora os valores de resistência mecânica das amostras de solo-cal, 12CH (solo mais 12% de cal) e solo-cimento-cal, 6CH6C, sejam mais baixos que os apresentados pela amostra 12C, eles também continuam crescendo à medida que o tempo de cura aumenta. No solo-cal também ocorrem reações pozolânicas semelhantes àquelas constatadas no solo-cimento (CSH e CAH), pois a cal e a água também reagem com a sílica e a alumina desorganizadas presentes no solo quando se tem quantidades de água capazes de trazer Ca^{+2} e $(OH)^-$ para a superfície das partículas de argila (VIZCARRA, 2010). Diante disso, Silva *et al.* (2014) afirmam que, no solo-cal, a elevação do teor de hidróxido de cálcio requer um maior tempo de cura para que os mecanismos envolvidos na reação pozolânica se consolidem. Logo, as considerações acima podem justificar o aumento de resistência mecânica de forma mais lenta nas amostras de solo-cal. Fundamentadas nessa premissa, várias pesquisas com solo-cal constataram um ganho de resistência mecânica em tijolos avaliados após dois anos (GUIMARÃES, 2002).

A adição de 4% de RC nas composições de solo-cimento (12C4RC), solo-cal (12CH4RC) e solo-cimento-cal (6CH6C4RC) resultou em pequenos acréscimos na resistência mecânica em todas as idades de rompimento das amostras. Esse fenômeno pode estar associado ao efeito filler, proporcionado pela adição do RC ao sistema solo-aglomerante (s) que, no ensaio de granulometria, apresentou um percentual considerável de finos, da ordem de 66,43% passante na peneira nº 200 (0,075 mm). Os resultados das amostras com RC ainda podem estar relacionados ao efeito pozolânico, com o resíduo potencializando as reações e contribuindo para o aumento da resistência. Ressaltando que a amostra 12C4RC (solo mais 12% de cimento e 4% de RC) foi a que apresentou maior resistência mecânica no ensaio realizado.

Figura 3 – Resistência à Compressão Simples dos tijolos maciços



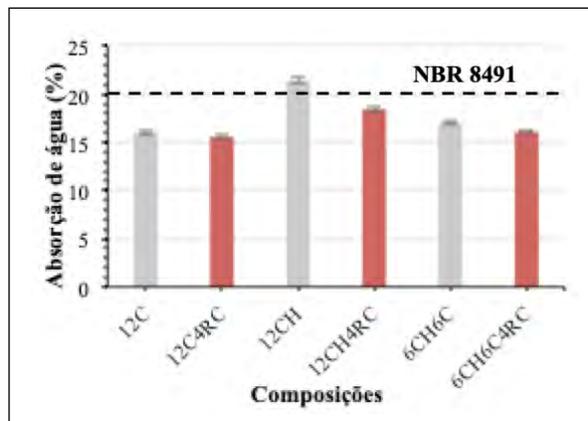
Fonte: dados da pesquisa.

A Fig. 4 mostra o comportamento dos tijolos no ensaio de absorção de água. Com exceção da composição 12CH, as demais misturas apresentaram valores abaixo de 20%, conforme as prescrições da NBR 8491 (ABNT, 2012d).

Na análise das amostras de solo-aglomerante sem RC, 12C, 12CH e 6CH6C, é possível aferir a relação dos resultados com o ensaio de resistência à compressão. Os produtos cimentantes formados durante a reação dos aglomerantes tendem a ocupar os pequenos vazios na estrutura das misturas solo-aglomerante (s). Como as reações do cimento são mais rápidas que as da cal, as amostras com cimento têm os poros ocupados mais rapidamente, o que deixa as misturas mais densas e menos porosas, sendo a absorção de água nessas amostras menores que as constatadas nas amostras com cal.

A incorporação de 4% de RC proporcionou uma redução nos valores da absorção de água em todas as amostras quando se compara os tijolos com a mesma proporção de ligante. Isso se deve à redução da porosidade, ocasionada, possivelmente, pelo efeito filler, que possibilita o refinamento dos poros. O efeito pozolânico do RC também pode ter contribuído para o aumento de fases cimentantes, o que também ocasiona um refinamento dos poros. A influência positiva do RC no ensaio de absorção de água está em concordância com os resultados de resistência à compressão, uma vez que estruturas mais densas e menos porosas tendem a ser mais resistentes.

Figura 4 – Absorção de água das misturas



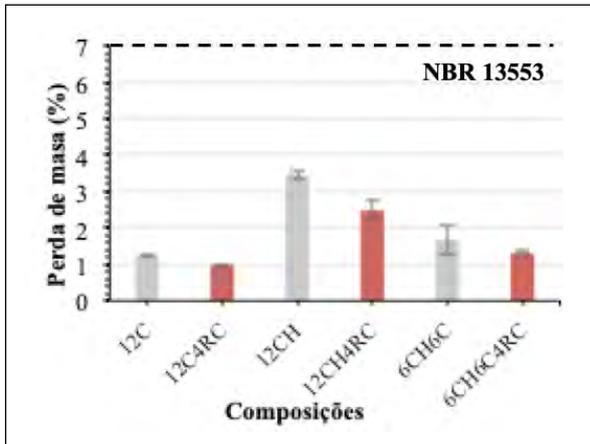
Fonte: dados da pesquisa.

Os resultados de perda de massa são exibidos na Fig. 5. Todas as misturas submetidas ao ensaio de durabilidade modificado apresentaram percentuais de perda de massa dentro do limite máximo requerido pela norma brasileira NBR 13553 (ABNT, 2012c), que recomenda o máximo de 7% de perda de massa para solos classificados como A-6.

Neste ensaio, ao se comparar as amostras sem RC, constatou-se que a maior rapidez das reações cimentantes apresentada pelo cimento em relação à cal, justificam os menores valores de perda de massa das amostras de solo-aglomerante (s) com a presença do cimento na composição, 12C e 6CH6C, respectivamente, pois as fases cimentantes proporcionam uma maior coesão da mistura. Dessa forma, a maior presença de fases cimentantes proporciona uma menor perda de massa nos ciclos de molhagem e secagem.

As formulações com RC (12C4RC, 12CH4RC e 6CH6C4RC) obtiveram resultados menores quando comparados com aqueles que não utilizaram o resíduo na composição (12C, 12CH e 6CH6C), mostrando a correlação com os ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água. Isso comprova a melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos produzidos com a adição do resíduo pozolânico inorgânico. Os resultados se mostraram interligados, pois tijolos mais resistentes e menos porosos devem, conseqüentemente, ser mais duráveis por apresentarem uma microestrutura mais densa, com uma maior união entre as partículas do sistema.

Figura 5 – Perda de massa das misturas



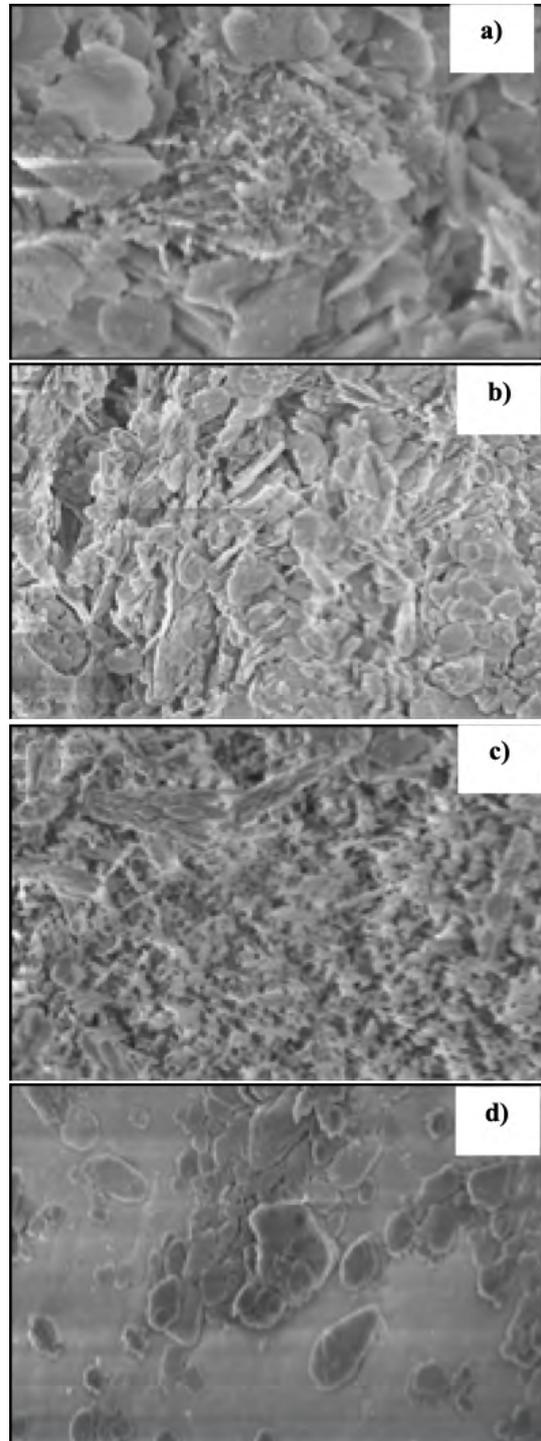
Fonte: dados da pesquisa.

As composições 12CH e 12CH4RC apresentaram menor desempenho em todos os ensaios tecnológicos se comparados às formulações com cimento, pois o aglomerante usado (cal hidratada) reage lentamente com os argilominerais do solo quando comparado ao cimento. A incorporação de 4% de RC na formulação solo-cal proporcionou uma efetiva melhoria nas propriedades físicas e mecânicas avaliadas e, por isso, foram submetidas ao ensaio de MEV para análise da microestrutura dessas amostras. A Fig. 6 a) e b), mostra a superfície de fratura da amostra 12CH com 365 dias, e a Fig. 6 c) e d), da amostra 12CH4RC. Os menores valores de resistência mecânica, a maior absorção de água e a perda de massa da amostra 12CH podem ser justificados pela maior porosidade da matriz, sendo identificadas também placas hexagonais de portlandita, Ca(OH)_2 , decorrentes da hidratação da cal.

Na análise da microestrutura da amostra 12CH4RC foi possível identificar uma maior formação de produtos resultantes da hidratação da cal e do efeito pozolânico proporcionado pelo RC. Essas estruturas se assemelham a ramificações esponjosas e fibrosas, características do silicato de cálcio hidratado (CSH) e também a partículas hexagonais de aluminato de cálcio hidratado (CAH), oriundos da recombinação da portlandita, Ca(OH)_2 , com aluminatos e/ou silicatos existentes no solo intemperizado e no RC. O CSH e o CAH contribuem, significativamente, para a elevação da resistência à compressão axial e para a redução da porosidade do material, pois esses compostos aumentam a adesão entre as partículas sólidas do solo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Portanto, a presença de CSH e CAH observados na superfície de fratura

das formulações corrobora o ganho de resistência mecânica, a redução da absorção de água e o comportamento em relação à durabilidade e à perda de massa observados nos ensaios tecnológicos.

Figura 6 – Micrografia da superfície de fratura das amostras a) 12CH - 60Kx; b) 12CH - 20Kx; c) 12CH4RC - 22Kx; e d) 12CH4RC - 20Kx



Fonte: dados da pesquisa.

5 Conclusões

Todas as formulações obtiveram resultados de resistência à compressão simples acima de 1MPa, atendendo às recomendações da norma brasileira.

No ensaio de absorção de água, apenas a amostra 12CH não atendeu ao valor máximo de 20%. A perda de massa apresentada por todas as amostras no ensaio de durabilidade modificado ficou abaixo dos 7% permitidos para solos do tipo A-6.

As formulações com adição de 4% de RC apresentaram melhores resultados nos ensaios tecnológicos realizados em relação àquelas produzidas sem o uso do resíduo, indicando a possível contribuição do efeito filler e o efeito das reações pozolânicas, destacando-se o fato de esse resíduo ser proveniente de blocos cerâmicos, tendo altos valores de sílica e alumina em baixa cristalinidade.

A formulação 12C4RC apresentou melhor desempenho nas propriedades físicas e mecânicas avaliadas nesta pesquisa.

Os resultados demonstraram que a adição do RC é tecnicamente viável e promissora, confirmando que o resíduo pode ser incorporado aos tijolos de solo-aglomerante como adição pozolânica, tendo ainda uma destinação ambientalmente correta.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação da Paraíba (IFPB) pelo apoio concedido para a realização desta pesquisa. Agradecemos também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, pois este estudo foi financiado, em parte, pelo órgão.

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de cimento Portland: **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP: boletim técnico BT- 111.1985.

ABNT. **NBR 6459**: Solo-Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro - RJ, 2016b.

ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro - RJ, 2003.

ABNT. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro - RJ, 2016c.

ABNT. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro - RJ, 2016a.

ABNT. **NBR 7182**: Solo- ensaio normal de compactação, Rio de Janeiro - RJ, 2016d.

ABNT. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2012d.

ABNT. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro - RJ, 2012a.

ABNT. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica-procedimento. Rio de Janeiro - RJ, 2012b.

ABNT. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

ABNT. **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2012c.

AMARAL, L. F. **Formulação de massa cerâmica para fabricação de telhas**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2016.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. 2013. 222 f. Tese (Programme Doctoral En Science et Génie des Matériaux) ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2013.

ASTM, 2015. **D 3282**: Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. USA.

AY, N.; ÜNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 3, p. 497-499, mar. 2000. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00202-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00202-7). Acesso em: 15 de abril de 2020.

CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 17 de jul. 2002. p. 95-96.

CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: Subsídios para a promoção da Construção Civil Sustentável. 2014. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/aspectos-construcao-sustentavel/show.asp?ppgCode=31E2524C-905E-4FC0-B784-118693813AC4>. Acesso em: 18 de setembro de 2019.

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient**, Campina Grande/PB, v. 6, n. 6, p.511-518, jul./dec., 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000300022>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

DNER, 1994. **ME 203 - 94**: Soil-cement - Determination of durability by mass loss by wetting and drying. National Department of Roads and Shooting.

EL-ATTAR, M. M.; SADEK, D. M.; SALAH, A. M. Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 143, p. 506-515, fev. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.082>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; BEZERRA, I. M. T.; DIAS, S. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L. Soil-lime blocks using construction residues – durability study. **Materials Science Forum**. V. 727-728, p. 1422-1427, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.1422>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Revista Cerâmica**, n. 61, p. 251-258, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581847>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

GÓIS, L. C. **Estudo da incorporação da cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em

Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal** – Fundamentos e aplicações na engenharia civil, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, Editora Pini, São Paulo, 2002.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014, 669 p.

MOHAMMADHOSSEINI, H.; LIM, N. H. A. S.; TAHIR, M. M.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H.; SAMADI, M. Enhanced performance of green mortar comprising high volume of ceramic waste in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 212, p.607-617, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.024>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

OJURI, O. O.; ADAVI, A. A.; OLUWATUYI, O. E. Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. **Transportation Geotechnics**, [s.l.], v. 10, p. 1-12, mar. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.001>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 5, p. 832-838, maio 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>. Acesso em: 14 de abril de 2020.

RASHID, K.; RAZZAQ, A.; AHMAD, M.; RASHID, T.; TARIQ, S. Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 154, p. 829-840, nov. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219>. Acesso em: 13 de abril de 2020.

ROCHA, C. A. A.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de resíduos de corte de rochas e de blocos cerâmicos moídos na hidratação e no empacotamento de pastas cimentícias. **Rev. IBRACON Estrut. Mater**. 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000400009>.
Acesso em: 14 de abril de 2020.

SHERWOOD, P. T. **Soil Stabilization with Cement and lime**: State of the art – Review. HMSO, London, 1993.

SILVA, A. C. **Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, V. M.; GÓIS, L. C.; DUARTE, J. B.; SILVA, J. B.; ACCHAR, W. Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 326-331, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000014>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

SOUZA, F. A. **Estudo de durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz**. 2011. 223 f. (Tese de doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba, 2011.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.