ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO NATURAL POR SEDIMENTO DO RIO AMAZONAS

Tema: Tecnologia dos materiais.
Grupo: 1

MAURÍLIO G. PIMENTEL[1], ISAURA N. L. PAES[2]

[1]Estudante de Pós-graduação, Universidade Federal do Pará/UFPA, mauriliogp@ufpa.br
[2]Profa. Dra. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal de Pará/UFPA, isaurapaes@ufpa.br

RESUMO

O consumo elevado de recursos naturais ocasiona preocupação no que tange seu esgotamento, em especial, aos materiais utilizados em obras de infraestrutura. Este fato ocasiona uma busca por materiais alternativos como, por exemplo, sedimentos de rios. Assim, esta pesquisa investigou o desempenho e a microestrutura de argamassas de revestimentos com substituição, parcial, do agregado natural por sedimentos do rio Amazonas. Os resultados mostraram que o uso deste aumentou a resistência à tração da argamassa e ocasionou a formação de produtos cristalinos estáveis, sugerindo maior estabilidade ao revestimento capacitando-o como material promissor a ser utilizado como agregado em obras de infraestrutura.

Palavras-chave: microestrutura de argamassa, caracterização mineralógica, areia de sedimento, agregado do rio Amazonas.

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF COVERING MORTAR WITH PARTIAL REPLACEMENT OF NATURAL AGGREGATES BY SEDIMENT OF THE AMAZON RIVER

ABSTRACT

The high consumption of natural resources causes a concern on account of their depletion, especially among the materials used in infrastructure works. This fact motivate a search for alternative materials such as river sediments. Therefore, this research investigated the performance and microstructure of covering mortars in which composition the natural aggregate is partially replaced by sediments from the Amazon River. The results showed that this increased the tensile strength of the mortar and caused the formation of stable crystalline products, suggesting that there is a greater stability in the covering, what makes it a promising material to be used as an aggregate in infrastructure works.

Key-words: mortar microstructure, mineralogical characterization, sediment sand, aggregate from the Amazon River.

1. INTRODUÇÃO

O consumo global de recursos naturais utilizados em edifícios e infraestrutura de transporte aumentou 23 vezes entre 1900 e 2010[(1)], sendo que a areia e a brita somam a maior parte desses insumos, compondo o grupo de materiais mais extraído em todo o mundo. Esse elevado consumo representa uma preocupação para o esgotamento de recursos naturais utilizados em obras de infraestrutura, desencadeando em um aumento na busca por materiais alternativos como agregados reciclados e materiais suplementares ao cimento Portland. Dentre esses materiais alternativos, os sedimentos de rios têm se tornado alvo de estudos, pois, a quantidade desse material proveniente da dragagem de rios navegáveis tem aumentado anualmente[(2)], como é o caso dos sedimentos do rio Amazonas.

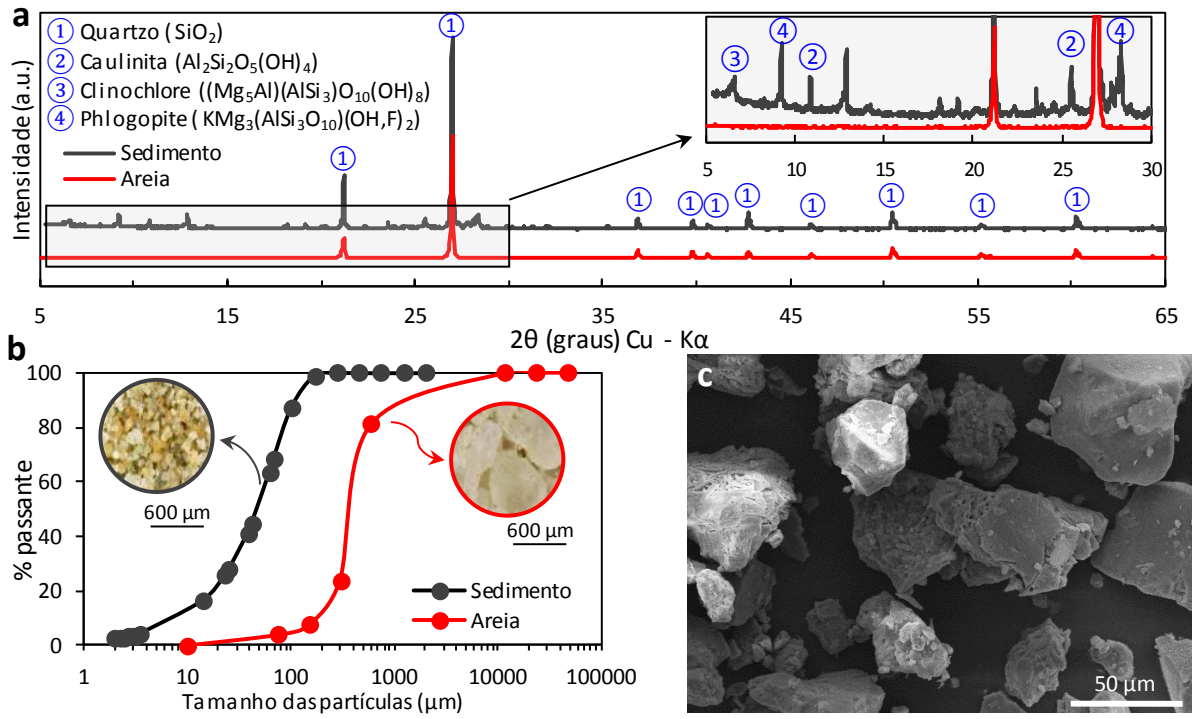
Na região Amazônica brasileira, existe um grande transporte e acúmulo de sedimentos na extensão do rio Amazonas[(3)]. Esses sedimentos, são originários das cordilheiras dos Andes e vem sendo transportado até o oceano Atlântico[(4)]. Durante a ocorrência de seu transporte, cerca de 20% desses sedimentos são depositados na extensão da região de Óbidos, no Pará, a Macapá no estado do Amapá, formando o chamado bancos de sedimento em suspensão[(3)]. Devido ao elevado depósito de sedimento no rio Amazonas, este já vem sendo empregado para a produção de concretos e argamassas, em substituição ao agregado convencional (areia de rio) utilizado na região[(5)]. Entretanto, a incorporação de materiais não convencionais na produção de concretos e argamassas, pode alterar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos novos compostos, desencadeando manifestações patológicas que podem vir a comprometer as obras de infraestrutura. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades de desempenho e análises microestruturais de argamassa de revestimento produzida com substituição parcial do agregado convencional (areia de rio) por sedimento do rio Amazonas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, utilizou-se o sedimento em suspensão do rio Amazonas coletado por meio de recipientes de madeira próximo a localidade do município de Macapá/AP (latitude 00º00’06’’S; longitude 51º03’37’’W), com massa específica de 2643 kg/m³. Após a coleta do material, o mesmo ficou exposto a radiação solar para perda de umidade. O agregado natural foi uma areia de rio com massa específica de 2630 kg/m³. Como aglomerante utilizou-se o CP IV-32 com massa específica de 3090 kg/m³. A areia apresentou como material cristalino unicamente o quartzo, enquanto o sedimento apresentou cristais de caulinita (American Mineralogist Crystal Structure Database – AMSCD 0017947), clinochlore (AMSCD 0000119) e phlogopite (AMSCD 0000024; Figura 1a). Além disso, a granulometria do sedimento foi inferior à da areia (Figura 1b) e sua morforlogia é típica de quartzo (AMSCD 0004264) com superfície porosa em algumas partículas (Figura 1c). Além desses materiais, utilizou-se água potável, com temperatura de 28°C e pH 6.

Uma premissa chave do presente estudo é que o sedimento exibe um elevado teor de SiO_2 em forma de quartzo (Tabela 1, composição determinada por FRX) além de caulinita, sendo o primeiro inerte em matriz cimentícia e, o segundo, um argilomineral podendo atuar com os componentes do cimento Portland para formação de novos produtos hidratados ou como carga reforçando a matriz e aumentando a resistência. O sedimento também apresenta um elevado teor de Al_2O_3, similar a quantidade encontrada no cimento.

Figura 1 - Características físicas e morfológica dos agregados. (**a**) Difração de raios X. (**b**) granulometria dos agregados. (**c**) Microestrutura eletrônica de varredura do sedimento.



Fonte: Autores

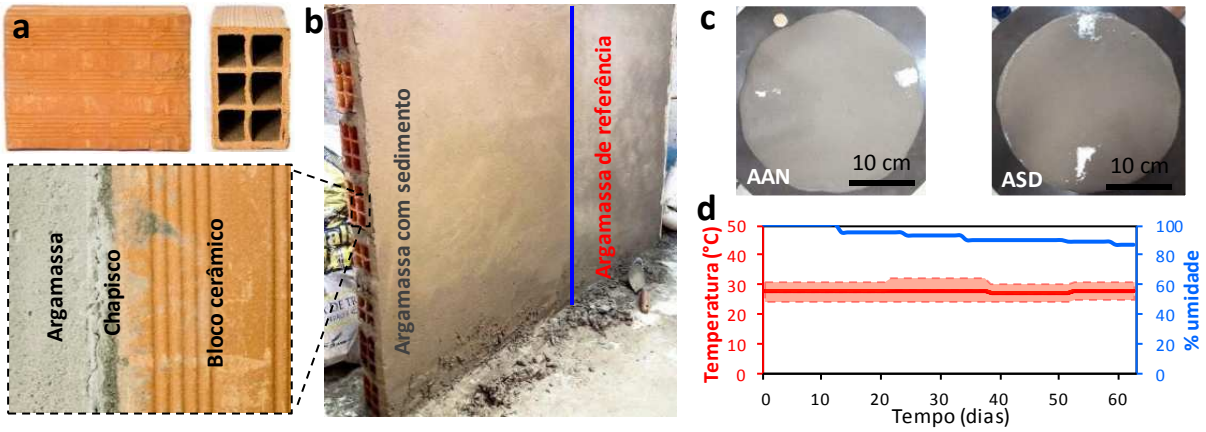
Tabela 1 – Composição química dos materiais. Valores em (%). PF é perda ao fogo

Material	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	Na_2O	K_2O	MnO_2	P_2O_5	TiO_2	PF
Areia	94,34	-	-	3,27	-	-	-	-	-	-	-	2,39
Sedimento	78,87	0,89	0,67	3,14	9,48	-	1,44	1,57	0,01	0,12	0,71	3,04
Cimento	31,00	44,83	4,02	3,51	9,70	1,21	0,18	0,90	-	-	-	4,65

Para avaliar os efeitos da substituição da areia por sedimento na resistência de aderência e na microestrutura das argamassas, confeccionou-se uma argamassa de referência (AAN) sem substituição da areia por sedimento, de traço 1:5 (cimento:areia, em massa) e relação água/cimento de 1,19. Além desta, foi dosada uma argamassa com substituição, em massa, de 25% da areia por sedimento (ASD). As argamassas foram executadas em uma betoneira de eixo inclinado e a ordem de adição na betoneira foi: agregado, cimento e água, respectivamente, misturando-se completamente em um intervalo de tempo de 5 minutos. A

resistência de aderência à tração das argamassas[6] foi realizada em dois painéis, com dimensões de (1,2x1,5)m^2 confeccionados com blocos cerâmicos de vedação (Figura 2a e 2b). Estes foram executados com argamassa de assentamento industrializada e após 7 dias, aplicou-se o chapisco (1:3: cimento:areia, em massa). Passados 21 dias, aplicou-se as argamassas nos painéis. A consistência das argamassas foi de (300 ± 10) mm (Figura 2c). As condições de umidade e temperatura variaram ao longo do tempo (Figura 2d) até a idade de ensaio (63 dias). Os resultados de aderência à tração direta foram avaliados estatisticamente utilizando o teste T de Student e, representados como média aritmética ± desvio padrão por terem apresentado distribuição normal, considerou-se diferença significativa, quando P<0,05.

Figura 2 – (**a**) bloco cerâmico de vedação. (**b**) painel com argamassa aplicada. (**c**) consistência e (**d**) condições de temperatura e umidade ao longo do tempo do painel até a idade de ensaio.



Fonte: Autores

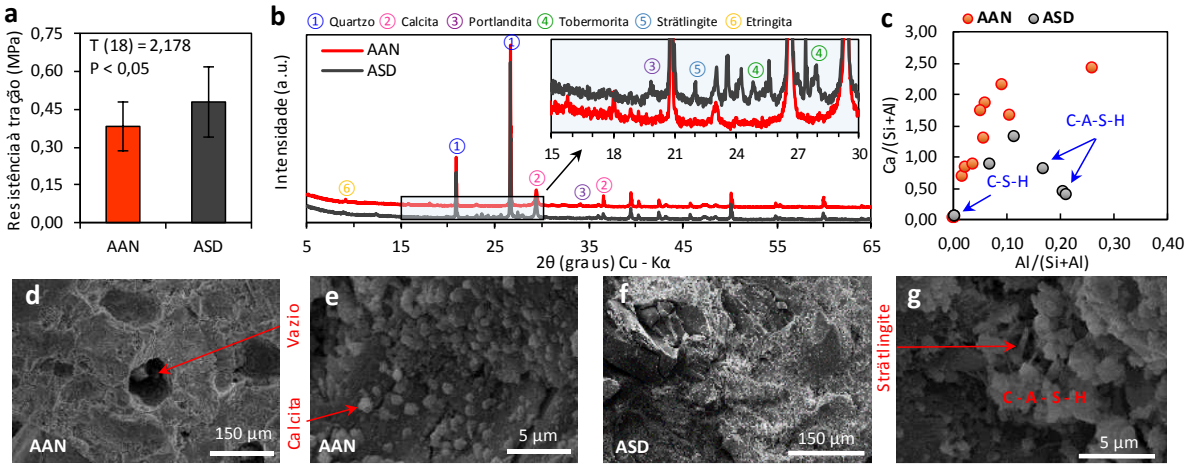
Para as análises microestruturais, as amostras foram removidas da superfície do painel por meio do uso de uma serra copo diamantada, buscando-se evitar contaminações. Estas foram pulverizadas para análise de difração de raios X (DRX), pelo método do pó. A análise de DRX foi realizada em um difratômetro de feixe divergente equipado com um goniômetro θ-θ, um tubo de raios X de Cu com radiação de Cu (Kα1=1,540598 Å), um filtro de Ni Kβ. As condições do instrumento foram as seguintes: 40kV e 40mA; fenda Soller de 2,5° (feixe incidente e refratado); faixa angular (2θ) de 5° a 65°. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e tempo por passo de 0,5s°, fenda divergente de 0,6mm.

A microscopia eletrônica de varredura das argamassas (MEV) foi realizada em um microscópio Zeiss modelo Sigma-VP, as amostras foram preparadas com extração dos fragmentos e fixação em um suporte de fita de carbono (C) e metalizadas com ouro (Au). As análises foram efetivadas utilizando-se elétrons secundários para obtenção das imagens a 20kV, com uma distância de trabalho de 15 mm. Além disso, foi realizado o mapeamento dos elementos por energia dispersiva (EDS) e calculado as proporções atômicas (Ca/(Si+Al)) e (Al/(Si+Al)).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resistência de aderência à tração direta foi significativamente maior para a argamassa com sedimento, quando comparada com a argamassa de referência (Figura 3a). O aumento dessa propriedade pode ter sido ocasionado pela formação de cristais de stratlingita ($2CaO.SiO_2$ $Al_2O_3.8H_2O$, AMSCD 0006404) um filossilicato hexagonal com clivagem paralela perfeita (0001) e uma camada basal com espaçamento de 12,5 Å[7], identificado somente na argamassa com sedimento por meio de DRX (Figura 3b). Além disso, na argamassa com sedimento houve a formação de tobermorita (AMSCD 0002329), um composto hidratado de composição química similar ao C-S-H. A argamassa de referência (AAN) apresentou em seu difratograma halo amorfo no intervalo de 2θ de 21,5° a 22,5° e de 23,5° a 26° enquanto que a ASD apresenta a formação de material cristalino, sugerindo maior estabilidade a longo prazo. Dos cristais semelhantes formados na AAN e ASD, somente os de portlandita (AMSCD 0000116) apresentaram alteração no tamanho, sendo menor para a argamassa ASD com distância interplanar de 2,56 Å (011), quando comparada com a AAN (2,62 Å (011)). Esta menor dimensão da portlandita formada na argamassa ASD, pode ter ocasionado uma densificação de sua microestrutura e que se refletiu no valor mensurado da resistência de aderência. Elucubrando-se ainda a este respeito, como a portlandita é um cristal com tendência a lixiviar-se em ambientes que, por ventura, estejam sujeitos a um ataque de águas agressivas (ácidas), a menor dimensão deste cristal pode tornar a argamassa mais estável frente a esta envoltória. Ressalta-se, no entanto, que há necessidade de ensaios relacionados à durabilidade do material que comprove tal fato[8].

Figura 3 – Desempenho e microestrutura das argamassas. (**a**) resistência à tração. (**b**) Difração de raios X. (**c**). Relações atômicas dos elementos por EDS. (**d**, **e**, **f** e **g**) microestruturas das argamassas.



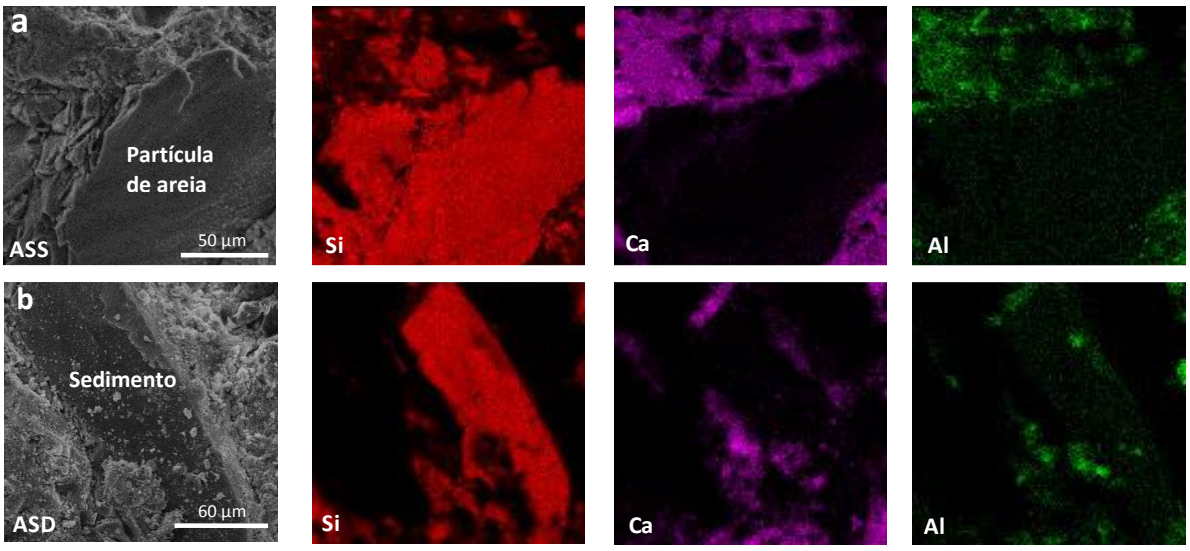
Fonte: Autores

A análise de EDS realizada em vários pontos nas argamassas indicou a formação heterogênea de C-A-S-H além de C-S-H (Figura 3c) principais produtos de hidratação em cimentos que substituem parte do clínquer por material pozolânico. Esses compostos heterogêneos provavelmente refletem a disponibilidade de Al^{3+} e Si^{4+} nos locais de

nucleação do gel, por isso a ASD formou C-A-S-H mais ricas em alumínio, possivelmente, devido ao sedimento apresentar maiores reservas de Al (Tabela 1). Outros fatores como granulometria dos agregados podem ter contribuído para alterar a microestrutura das argamassas, sendo que a AAN apresentou uma microestrutura com poros da ordem de 75 µm (Figura 3d) e a formação densa de cristais de calcita depositados nos poros (Figura 3e). A ocorrência da formação desses cristais é comum em ambientes com reservas de $Ca(OH)_2$, CO_2 e umidade para formar o $CaCO_3$. Como os painéis com as argamassas ficaram expostos as condições naturais, a difusão do CO_2 atmosférico foi favorecida na argamassa AAN em virtude dos poros maiores. Já a argamassa ASD apresentou uma microestrutura densa com evidentes ligações epitáxicas na zona de transição (Figura 3f). Essa região é rica em compostos de C-A-S-H e estruturas de stratlingita (Figura 3g). A coalescência de C-A-S-H e cristalização de stratlingita podem produzir maior tenacidade e resistência à tração[9] na argamassa com sedimento. Os cristais de stratlingita na argamassa, se assemelham a microfibras que são adicionados na matriz de concreto e argamassas para aumentar resistências mecânicas como tenacidade e resistência à flexão[9], com a diferença que os cristais de stratlingita cristalizam-se preferencialmente nas zonas interfaciais, componente mais vulnerável da estrutura de concretos e argamassas[10].

Um mapa realizado por EDS para os espectros de Si, Ca e Al em áreas microestruturais reforçam as evidências da formação de coalescência de C-A-S-H e stratlingita na região interfacial da argamassa ASD. As combinações dos elementos mapeados da argamassa AAN (Figura 4a) mostram a distribuição homogênea da composição de Si, Ca e Al em volta de uma partícula do agregado. Enquanto que as combinações dos elementos supracitados na argamassa ASD mostra núcleos ricos em Al na região de interface do sedimento com a matriz (Figura 4b).

Figura 4 – Microestrutura e mapeamentos dos elementos silício (Si), cálcio (Ca) e alumínio (Al) por EDS. (**a**) argamassa de referência. (**b**) argamassa com sedimento.



Fonte: Autores

ISSN 1984-8757

Assim, os resultados mostram que o sedimento do rio Amazonas é um agregado promissor para utilização em argamassas de revestimentos. Sua composição mineralógica, especialmente a presença de argilominerais, proporciona a formação de estruturas cristalinas nas argamassas que, por sua vez, podem vir a ocasionar estabilidade a longo prazo aos sistemas de revestimentos. Destaca-se, que outras pesquisas já mostraram seu potencial de utilização como agregado de construção[12] ou como material suplementar ao cimento Portland, após tratamento térmico[11].

Assim, por meio de uma "holística" mais tecnológica, porém, embasada em mensurações de base científica, vê-se que a utilização de sedimentos de rios como agregado em concretos e argamassas gera uma alternativa para as localidades que possuem uma extensa bacia hidrográfica, composta por inúmeros rios navegáveis, e que necessitam ser dragados. Estima-se que suas barragens retiveram mais de 100 bilhões de toneladas de sedimentos[13], ao longo do último meio século. Assim, o emprego deste material pode trazer implicações, inclusive, de alterações de custos para as obras de infraestruturas que possuem abundância do mesmo (sedimentos).

4. CONCLUSÕES

Aqui, investigou-se as alterações ocasionadas pela utilização do sedimento do rio Amazonas, como substituto parcial do agregado natural, em argamassas de revestimento. As análises mostraram diferenças relevantes relacionadas a formação microestrutural dos compostos e que alteraram a porosidade da argamassa, ao se inserir o sedimento em sua composição. A maior cristalinidade dessa argamassa e, principalmente, os cristais de stratlingita e tobermorita refletiram-se em maiores valores mensurados na propriedade de resistência de aderência à tração, quando comparado à uma argamassa de referência. Além disso, a referida propriedade pode ter sido incrementada pela presença de argilominerais, que proporcionam a formação de estruturas cristalinas na região interfacial da argamassa densificando-a e, ainda, proporcionar estabilidade química, a longo prazo, para os sistemas de revestimentos. Assim, com uma abrangência tecnológica e científica, os resultados revelam que o sedimento do rio Amazonas se apresenta como um agregado promissor para utilização em argamassas de revestimentos.

REFERÊNCIAS

1. KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; LAUK, C.; HAAS, W.; TANIKAWA, H.; FISHMAN, T.; MIATTO, A.; SCHANDL, H.; HABERL, H. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use", **Proceedings of the National Academy of Sciences** 114, 1880-1885, 2017.

2. WANG, D. **Solidification et valorization de sediments du port de Dunkerque en travaux routiers**. 2011 (Ph.D Thèse de doctorat en Génie Civil) - École doctorale Sciences pour l'Ingénieur. Douai, 2011.

3. PARK, E.; LATRUBESSE, E. M. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data, **Remote Sensing of Environment** 147, 232-242, 2017.

4. MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; DEMATTE, J. L. I.; RICHEY, J. E.; DEVOL, A. H. Chemical and mineralogical composition of Amazon River floodplain sediments, Brazil. **Applied Geochemistry**, v. 8, n. 4, p. 391-492, 1993.

5. VALENTE, V. J. S. B. **Concreto Estrutural com Silte Tucujuara - II, na cidade de Macapá/AP**. 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal de Pará, Belém, 2017.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de janeiro, 2010.

7. RINALDI, R.; SACERDOTI, M.; PASSAGLIA, E. Straetlingite; crystal structure, chemistry, and a reexamination of its polytype vertumnite. **European Journal of Mineralogy**, v. 2, p. 841-849, 1990.

8. SEETHARAM, S. C.; PATEL, R. A.; PERKO, J.; JACQUES, D. Quantification of leaching kinetics in OPC mortars via a mesoscale model. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 614-628, 2018.

9. JACKSON, M. D.; LANDIS, E. N.; BRUNE, P. F.; VITTI, M.; CHEN, H.; LI, Q.; KUNZ, M.; WENK, H.; MONTEIRO, P. J. M.; INGRAFFEA, A. R. Resilience of Imperial Roman architectural mortar. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, p. 18484-18489, 2014.

10. HERNÁNDEZ-CRUZ, D.; HARGIS, C. W.; BAE, S.; ITTY, P. A.; MERAL, C.; DOMINOWSKI, J.; RADLER, M. J.; KILCOYNE, D. A.; MONTEIRO, P. J. M. Multiscale characterization of chemical–mechanical interactions between polymer fibers and cementitious matrix. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 9-18, 2014.

11. BENZERZOUR, M.; AMAR, M.; ABRIAK, N. E. New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 432-444, 2017.

12. PIMENTEL, M. G.; ARAUJO, J.; PAES, I. N. L. Propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado miúdo por sedimento do rio amazonas. *In*: SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 12, 2017, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2017, p. 1-10.

13. MCCARNEY-CASTLE, K.; VOULGARIS, G.; KETTNER, A. J. Analysis of Fluvial Suspended Sediment Load Contribution through Anthropocene History to the South Atlantic Bight Coastal Zone, U.S.A. **The jornal of geology**, v. 118, p. 399-416, 2010.