

**ANÁLISES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM
ADIÇÕES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO, VISANDO O REAPROVEITAMENTO DO
RESÍDUO DA SIDERÚRGICA DO PECÉM – CEARÁ**

Nídia da Paz Palácio (*), Perboyre Barbosa de Alcântara, Mayara da Silva Lima

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus de Fortaleza; nidiapalacio9@gmail.com

RESUMO

Os resíduos sólidos gerados nas mais diversas atividades da sociedade é uma problemática contemporânea. Pode-se afirmar que o desenvolvimento econômico está em constante conflito com o desenvolvimento sustentável, principalmente pelo uso de recursos naturais ou pela geração de resíduos e consequentemente, por todos os seus impactos. O objetivo deste trabalho é avaliar, através de comparações de traços, o comportamento da argamassa de revestimento com a introdução gradual da escória de alto-forno em substituição ao aglomerante principal, cimento. As comparações foram realizadas utilizando o traço tradicional para revestimento externo argamassado 1:1:6 (cimento, cal e areia – em volume) como referência, e a inserção gradual da escória de alto-forno nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, substituindo o cimento para constituição dos traços alternativos. Para todos os traços, o índice de consistência foram de 260 ± 5 mm, regulando a quantidade de água. Os ensaios para o estado endurecido foram realizados após 28 dias de idade a fim de caracterizar os traços de argamassa quanto a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão. A escolha pela escória de alto forno como material da pesquisa se faz jus ao seu uso já empregado na construção civil, estando presente seja como agregado, ou sendo reutilizado pela indústria cimenteira para composição de cimento Portland. Este material residuário é gerado no processo de fabricação do ferro gusa como resíduo, na Siderúrgica do Pecém, localizada em São Gonçalo do Amarante – Ceará, e pela qualidade do material, o mesmo é considerado um co-produto por ter valor agregado.

PALAVRAS-CHAVE: escória de alto-forno, argamassa, resíduo sólido, sustentabilidade.

ABSTRACT

Solid waste generated in the most diverse activities of society is a contemporary problem. It can be said that economic development is in constant conflict with sustainable development, mainly by the use of natural resources or by the generation of waste and, consequently, by all its impacts. The objective of this work is to evaluate, by means of trait comparisons, the behavior of the coating mortar with the gradual introduction of the blast furnace slag instead of the main cement. The comparisons were made using the traditional 1: 1: 6 mortar external coating (cement, lime and sand - by volume) as reference, and the gradual insertion of the blast furnace slag in the proportions of 5%, 10%, 15 %, 20% and 25%, replacing the cement to constitute the alternative traces. For all traits, the consistency index was 260 ± 5 mm, regulating the amount of water. The tests for the hardened state were performed after 28 days of age in order to characterize the mortar traces for flexural tensile strength and compressive strength. The choice of blast furnace slag as research material is justified by its use already used in civil construction, being present either as an aggregate or being reused by the cement industry for Portland cement composition. This waste material is generated in the process of manufacturing pig iron as waste, at Siderúrgica do Pecém, located in São Gonçalo do Amarante - Ceará, and for the quality of the material, it is considered a co-product for added value.

KEY WORDS: blast furnace slag, mortar, solid waste, sustainable.



INTRODUÇÃO

Dar uma destinação correta aos diversos tipos de resíduos gerados pelas atividades humanas representa um grande desafio para a sociedade contemporânea. O desenvolvimento econômico, principalmente as atividades ligadas às indústrias, no qual requer o uso de muitos recursos naturais para o processo de transformação da matéria-prima e por fim, a geração do produto, está em constante conflito com o desenvolvimento sustentável. Para minimizar os impactos negativos, exige-se a aplicação de soluções ao tratamento dos resíduos produzidos no processo industrial, sejam eles inservíveis ou de passivos ambientais.

O reaproveitamento da escória, resíduo e co-produto gerado na indústria siderúrgica, na indústria cimenteira (inserindo na fabricação dos cimentos CP II E e CP III, conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT), na construção civil (substituindo agregados) e na infraestrutura (como base ou sub-base para pavimentos) já é comum, inclusive possui inúmeros estudos que endossam o seu uso, além de ser um destino ambientalmente correto, atendendo assim à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Para ser ter uma ideia do volume gerado, a cada uma tonelada de ferro-gusa produzido, na siderúrgica do Pecém, parte do Complexo Industrial do Porto do Pecém (CIPP) e instalado na cidade de São Gonçalo do Amarante-CE, são gerados, em média, 300 quilos de escória de alto-forno, e para cada uma tonelada de aço líquido processado, são gerados 100 a 150 quilos de escória de aciaria (CSPECem, 2019). Assim, mesmo com o uso de grandes quantidades de escória granulada na fabricação cimento, parte desse resíduo não é reaproveitado por falta de demanda o que torna importante o estudo de incorporação da escória na produção de argamassas.

OBJETIVOS

Comparar o comportamento físico/mecânico de argamassa de revestimento através da elaboração de seis (06) traços, introduzindo-se gradualmente a escória de alto-forno nas proporções de 0 % 5%, 10%, 15 %, 20% e 25 % em substituição ao cimento Portland.

METODOLOGIA

Argamassas

Neste trabalho foi utilizado um traço de argamassa na proporção de 1:1:6, cimento, cal e areia média, em volume. O traço é comumente utilizado para a produção de argamassa de revestimento externo na região de Fortaleza - CE e está especificado no Caderno Técnico de Composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) de março de 2017, para a localidade de Fortaleza - CE.

Foram preparadas 06 (seis) argamassas, uma utilizando como aglomerantes somente o cimento e a cal (argamassa convencional) e as outras, a escória de alto-forno nas proporções de 5%, 10%, 15 %, 20% e 25 % em substituição ao cimento Portland. Para todos os traços, os índices de consistência das argamassas foram de 260 ± 5 mm, regulando a quantidade de água de amassamento.

Escória de Alto-Forno (EAF)

A escória de alto-forno utilizada nos traços das argamassas é originária da Siderúrgica do Pecém. Ela é considerada um co-produto por ter um valor agregado e, portanto, é vendido para outras empresas como matérias prima, exemplo da indústria cimenteira. Este material é resíduo industrial gerado no processo da produção do ferro gusa.

A escória utilizada é granular e com características granulométricas próximas de uma areia, sendo assim foi necessário à sua moagem. Para isso utilizou-se o equipamento de abrasão Los Angeles, o mesmo utilizado pela norma NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. O processo consiste em triturar o material por abrasão, onde o desgaste é gerado entre o choque do material e esferas de fundição. De acordo com a norma, as esferas possuem em torno de 48 mm de diâmetro e massa compreendida entre 390g e 445g e são confinadas em um equipamento que mantém rotação contínua por um tempo determinado, conhecida como máquina “Los Angeles”.

Finalmente, os tamanhos das partículas de escórias foram reduzidos até adquirir granulometria tal que 50% do material necessário passasse na peneira nº 100 e a outra 50% passasse na peneira nº 200, obtendo-se em torno de 747 gramas de escória moída, tentando obter granulometria tal qual o cimento possui.

Cimento



O cimento selecionado para moldagem dos corpos de prova foi o cimento Portland CP II F – 40, da marca POTY fabricado pela empresa Votorantim Cimentos e adquirido no comércio varejista da Região Metropolitana de Fortaleza-CE. Trata-se de um cimento com filer ou material carbonático na composição, em proporções de 6% a 10%, conforme o fabricante.

Cal Hidratada

Utilizou-se a cal hidratada CH-I do fabricante Carbomil Química S/A, adquirido no comércio varejista de Fortaleza-CE e que atende as especificações da norma ABNT NBR 7175.

Agregado Miúdo

A seleção do material como agregado miúdo foi uma areia média de rio, comum da região que foi adquirido em um depósito de Fortaleza-CE. Excluiu-se materiais com granulometria superior a 4,75 mm, utilizando somente o material passante na peneira nº 4 (4,75mm), sendo previamente seco em estufa a 100 °C por pelo menos 24 horas.

Água para mistura

A água utilizada para preparo da argamassa foi proveniente da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE), sendo ela, tratada e potável. Uma quantidade foi definida com antecedência em cálculos para determinação do traço, e sendo ajustada conforme o índice de consistência obtido.

Ensaio de caracterização dos materiais

Os ensaios de caracterização dos materiais, foram realizados conforme as normas da ABNT, de acordo com a seguinte ordem: 1. Determinação da massa unitária da areia (NM 45:2006, ABNT), 2. Determinação da absorção de água e da massa específica do agregado (NM 52:2009, ABNT), 3. Determinação da composição granulométrica (NM 248:2003, ABNT), 4. Determinação da densidade real (ME 093:1994, DNER), a fim de se conhecer os materiais disponíveis e poder quantificar os materiais necessários para elaborar cada traço da argamassa. Para uma maior precisão os materiais foram medidos em massa, sendo assim utilizou-se os resultados da massa unitária de cada material para o cálculo do quantitativo de cada material para composição do traço.

Seguem algumas imagens do processo de caracterização, a determinação da granulometria do agregado miúdo (Figura 1) e a determinação da densidade real da escória de alto forno (Figura 2).



Figura 1: Ensaio de granulometria do agregado miúdo. Fonte: Autor do Trabalho.

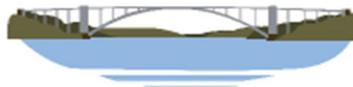


Figura 2: Determinação da densidade real para a escória de alto-forno. Fonte: Autor do Trabalho.

Para cada traço da argamassa (Figura 3), determinou-se a quantidade de água ser incorporada inicialmente, e posteriormente, levando em consideração que o Índice de Consistência deveria atender os 260 +/- 5 mm de espalhamento na mesa de adensamento seguindo a NBR 13276:2016 (ABNT).



Figura 3: Preparo do traço na argamassadeira. Fonte: Autor do Trabalho.

Execução dos ensaios para as argamassas no estado endurecido

Para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, determinação da resistência à tração e determinação da resistência à compressão, foram moldados três corpos de provas prismáticos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada traço, de acordo com a NBR 13279:2005 (ABNT), sendo desmoldados após 48 horas. Os corpos de prova foram acondicionados no laboratório para a cura conforme recomendações da referida norma.

Ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

De acordo com a norma NBR 15259 (ABNT, 2015), o ensaio de capilaridade é realizado após os 28 dias em que os corpos de prova foram moldados. Cada amostra deve ficar posicionado na vertical, expondo ao contato com a água (Figura 4), sua base (4 cm x 4 cm), e mantendo constante uma altura de 5mm. A amostra deverá ser pesada inicialmente seca, aos 10 minutos, e finalmente, aos 90 minutos.

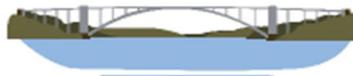


Figura 4: Ensaio de absorção de água (esquerda), coleta de informações aos 10 minutos (direita). Fonte: Autor do Trabalho.

Ensaio de resistência à flexão e resistência à compressão

Os corpos de prova com idade de 28 dias e seguindo as recomendações da norma NBR 13279 (ABNT, 2005), foram submetidos aos ensaios de resistência a tração (Figura 5) e com as duas partes após a ruptura à tração (Figura 6), posteriormente, determinou-se a resistência à compressão (Figura 7). Utilizou-se uma prensa do tipo eletro-hidráulica universal, comandada por computador e que permite a aplicação de incrementos de carga conforme estabelecido em norma. Os referidos ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, UFC – Campus do Pici. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IFCE – Campus de Fortaleza.



Figura 5: Ensaio para determinação da resistência a flexão. Fonte: Autor do Trabalho.



Figura 6: Corpo de prova rompido no ensaio de resistência a flexão e preparação para o ensaio de resistência à compressão. Fonte: Autor do Trabalho.

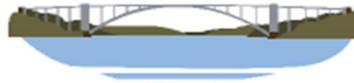


Figura 7: Ensaio de Resistência à Compressão. Fonte: Autor do Trabalho.

RESULTADOS

Caracterização dos materiais

Os parâmetros definidos para caracterização dos materiais foram a massa unitária, massa específica e índice de absorção de água estando os resultados na Tabela 1, e granulometria do agregado miúdo conforme a Tabela 2. Os resultados estão dentro do esperado para os materiais analisados.

Tabela 1. Ensaio de caracterização.

Fonte: Autor, 2019.

Caracterização dos materiais	Areia	Cimento	Cal	Escória
Massa unitária (g/cm ³)	1,440	1,208	0,539	1,775
Massa específica (g/cm ³)	2,600	-	-	-
Absorção de água (%)	0,580	-	-	-

Tabela 2. Ensaio de granulometria.

Fonte: Autor, 2019.

Amostra	Módulo de finura	Dim. Máx. Característica (mm)
Areia média	2,55	2,4

Caracterização da argamassa no estado endurecido

Para uma melhor identificação dos traços, preferiu-se enumerá-los de 0 a 5 e os três (3) corpos de prova moldados para cada traço foram identificados por a, b e c. O traço comum, usado como referência para a pesquisa, sem adições de escória foi identificado como Traço 0. Já os traços alternativos, foram identificados como 1 para a substituição de 5% de cimento pela escória de alto forno, 2 para o traço que substituiu 10% do cimento pela escória, 3 para a substituição de 15%, 4 para a substituição de 20% e 5 para substituição de 25%.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados para a densidade de massa aparente no estado endurecido, obtidos conforme a norma ABNT NBR 13280. Observam-se que os valores foram bem uniformes para cada um dos traços analisados. O Traço 0 apresentou a maior densidade de massa em relação aos demais traços, sendo classificado como M6 (> 1800 Kg/m³) e a mesma classificação também pode ser atribuída aos traços 4 e 5, enquanto o demais traços podem ser classificados como M5 já que os valores obtidos (Tabela 3) estão dentro do intervalo de 1600 a 2000 Kg/m³, conforme os requisitos da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).



Tabela 3. Resultados para a densidade de massa aparente da argamassa no estado endurecido. Número de repetições (n) = 3
Fonte: Autor, 2019.

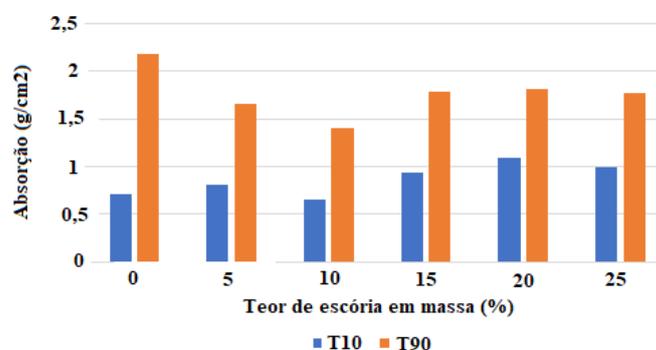
Densidade da massa (Kg/m ³) ρ						
Traço	0	1	2	3	4	5
a	1844,6	1766,1	1771,6	1785,6	1801,3	1817,9
b	1833,2	1781,6	1783,5	1832,5	1810,3	1807,0
c	1815,4	1762,0	1812,9	1830,1	1821,1	1816,7
Média	1831,06	1769,93	1789,33	1816,04	1810,90	1813,89
Desvio padrão	12,0	8,4	17,4	21,6	8,1	4,9

No estado endurecido, após os 28 dias, foram registrados os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade como descrito na Tabela 4, em conformidade com a norma NBR 15259 (ABNT, 2005). Considerando os valores médios (Figura 8), nota-se que para o tempo de 10 minutos (T10) houve um aumento da absorção em função do acréscimo de escória. Enquanto para 90 minutos (T90) verifica-se uma redução na absorção em relação a argamassa convencional (0). Em relação ao coeficiente de capilaridade, o valor observado na argamassa de referência (Tabela 5) foi bem superior as argamassas com adições de escória. Mesmo assim todos os valores foram superiores a 10 g/(dm².min^{0,5}) e todas as argamassas são classificadas na Classe C6, conforme as especificações da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 4. Resultados para absorção de água por capilaridade. Número de repetições (n) = 3
Fonte: Autor, 2019.

Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)												
TRAÇO	0		1		2		3		4		5	
	T10	T90										
a	0,97	2,25	0,80	1,61	0,54	1,30	0,90	1,76	1,30	2,02	0,97	1,69
b	0,51	2,02	0,74	1,51	0,69	1,46	0,90	1,65	0,87	1,52	0,91	1,59
c	0,66	2,27	0,91	1,84	0,71	1,46	1,00	1,95	1,12	1,90	1,11	2,03
Média	0,72	2,18	0,82	1,65	0,65	1,41	0,93	1,79	1,10	1,81	1,00	1,77
Desvio padrão	0,35	0,95	0,36	0,73	0,29	0,61	0,41	0,78	0,50	0,81	0,44	0,78

Figura 8. Absorção média de água em função do teor de escória para 10 (T10) e 90 minutos (T90).
Fonte: Autor do Trabalho.



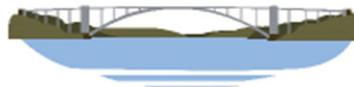


Tabela 5. Resultado do coeficiente capilaridade. Número de repetições (n) = 3
Fonte: Autor, 2019.

Coeficiente de Capilaridade C (g/(dm ² .min ^{0,5}))						
Traços	0	1	2	3	4	5
a	20,4	12,9	12,2	13,8	11,5	11,5
b	24,1	12,4	12,4	11,9	10,4	10,8
c	25,7	14,9	12,0	15,3	12,5	14,7
Média	23,4	13,4	12,2	13,6	11,5	12,3
Desvio Padrão	2,2	1,1	0,2	1,4	0,9	1,7

Para os ensaios de resistências, os resultados de resistência a tração dos 18 corpos estão apresentados na Tabela 6, representada pela média dos valores obtidos para cada traço, desconsiderando os valores com desvio absoluto máximo maior que 0,3 MPa, representado pelo asterisco ao lado. Os resultados de resistência à compressão, são apresentados na Tabela 7, pela média dos valores obtidos para cada traço, desconsiderando os valores que apresentaram desvio absoluto máximo maior que 0,5 MPa. Em relação à flexão a maior parte dos valores observados nas argamassas com adições foram um pouco menores do que o observado na argamassa padrão, porém com adições de 10 % (2) e 20 % (4) de escória (Tabela 6) a resistência à flexão foi superior à argamassa de referência. Conforme as especificações da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas foram enquadradas na categoria “R1”, com resistências menores ou iguais a 1,5 MPa.

Na resistência à compressão (Tabela 7), todos os resultados das argamassas com adições foram da mesma ordem de grandeza ou maiores que o observado na argamassa padrão. De acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas foram enquadradas na Classe “P3”, com resistências de 2,5 MPa a 4,5 MPa.

Tabela 6. Resultados para o ensaio de resistência à flexão. Número de repetições (n) = 3.
Fonte: Autor, 2019.

Resistência a flexão média (MPa)														
Traço	0		1		2		3		4		5			
	MPa	D.Abs												
a	0,40	*	0,8	1,20	-0,1	1,50	0,0	1,00	0,0	1,30	0,0	1,10	0,0	
b	1,20	-0,1	0,20	*	0,9	1,40	0,1	1,00	0,0	1,30	0,0	1,10	0,0	
c	1,10	0,0	1,00	0,1	1,60	-0,1	0,50	*	0,5	1,30	0,0	0,70	*	0,4
Média das resistências a tração por traço (MPa)														
	1,15		1,10		1,50		1,00		1,30		1,10			
Desvio Absoluto Máximo (MPa)														
	0,8		0,9		0,1		0,5		0,0		0,4			

Desvio absoluto (D.Abs) = diferença entre a resistência média e a resistência individual
*Valores desconsiderados para a média, por ter Desvio Absoluto Máximo maior que 0,3 MPa.

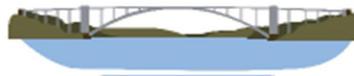


Tabela 7. Resultados para o ensaio de resistência à compressão. Número de repetições (n) = 6.
Fonte: Autor, 2019.

Resistência a flexão média (MPa)												
Traço	0		1		2		3		4		5	
	MPa	D.Abs										
a	4,15	-0,5	4,34	-0,5	4,52	-0,5	3,48	0,2	3,93	-0,2	4,61	-0,4
	3,28	0,4	3,79	0,0	3,93	0,1	3,22	0,4	3,34	0,4	3,93	0,3
b	4,18	-0,5	4,14	-0,3	4,38	-0,4	4,1	-0,5	4,26	-0,5	4,72	-0,5
	3,21	0,4	3,34	0,5	3,52	0,5	3,61	0,0	3,68	0,1	4,08	0,1
c	3,89	-0,2	3,91	-0,1	4,16	-0,1	3,85	-0,2	3,98	-0,2	3,96	0,2
	3,19	0,5	3,27	0,5	3,59	0,4	3,49	0,1	3,28	0,5	3,76	0,4
Média das Resistências por traço (MPa)												
	3,65		3,80		4,02		3,63		3,75		4,18	
Desvio Absoluto Máximo (MPa)												
	0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5	

D.Abs = diferença entre a resistência média e a resistência individual

Obs.: Se o Desvio Absoluto Máximo for maior que 0,5 MPa o valor é desconsiderado na média

CONCLUSÕES

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece aos padrões para enquadrar a argamassas em classes. Com os resultados obtidos nos ensaios de massa específica, coeficiente de capilaridade, resistência à tração e resistência à compressão é possível classificar os traços 0 (sem escória), 4 (20 % de escória) e 5 (25% de escória) em M6-C6-R1-P3 e os demais traços com adições de escória nas classes M5-C6-R1-P3.

Os resultados obtidos sugerem que a substituição do cimento Portland por escória de alto-forno nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% na produção de argamassa de revestimento, considerando os traços analisados e os parâmetros medidos, pode ser uma solução tecnicamente viável. Entretanto, seria importante o estudo do comportamento da argamassa em condições de uso e em médio e longo prazo, bem como a investigação de outros parâmetros como a resistência de aderência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) pela doação da escória de alto-forno utilizada neste trabalho e ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici, pela realização de parte dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira nº 7175**. Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira nº 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira nº 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira nº 13280**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira nº 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005



6. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira n° 15259**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira NM n° 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira NM n° 51**. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.
9. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira NM n° 52**. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
10. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Norma Brasileira NM n° 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2006.
11. BRASIL. **Lei n° 12.305, 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010
12. Companhia Siderúrgica Do Pecém (CSpecem). **Co-produtos – Escórias de Aciaria e Alto-Forno**. Disponível em <http://www.cspecem.com/pt-br/produtos/co-produtos/>. Acesso: 20 de março de 2019.
13. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER). **DNER ME 093**: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.