

PRODUÇÃO DE CONCRETO SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL ATRAVÉS DA INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA *DRY-PIT* E RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.

Lucas Carvalho da Silva (Graduado em Engenharia Civil, Faculdade Multivix) E-mail:

lucascarvalhodasilva36@gmail.com

Débora Frasson Costa (Graduada em Engenharia Civil, Faculdade Multivix) E-mail: deborafcosta18@gmail.com

Poline Fernandes Fialho (Professora, Faculdade Multivix) E-mail: poline.fialho@gmail.com

Resumo: A quantidade de resíduos sólidos gerados pelas atividades industriais tem crescido em escala mundial e ambiental, representando globalmente, milhões de toneladas anuais. Assim, a reutilização de subprodutos industriais se apresenta como alternativa de produção de materiais de construção e processos construtivos mais sustentáveis. Esta pesquisa, visa verificar a viabilidade técnica da utilização de resíduos industriais, a exemplo, a escória bruta de alto forno (Escória *dry-pit*) e o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como substituto dos agregados naturais e adição sobre a massa de cimento, respectivamente, para produção de concreto sem função estrutural. As amostras de escória *dry-pit* foram disponibilizadas por uma siderúrgica do município de Serra/ES, enquanto a de RBRO foi fornecida por uma empresa de beneficiamento localizada no município de Nova Venécia/ES. Os materiais foram caracterizados por análises físicas e mineralógicas. Foram produzidas três misturas de concreto para avaliação das propriedades no estado fresco por meio da massa específica e abatimento do tronco de cone e no estado endurecido através do ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os resultados encontrados não atenderam ao objetivo da pesquisa, visto que o agregado fornecido possui granulometria fora dos limites estabelecidos pelas normas, fator este que pode ser uma variável de restrição ao seu emprego, sendo necessário prévio beneficiamento para possível utilização como insumo para construção civil.

Palavras-chave: Aproveitamento de Resíduos, Escória *dry-pit*, Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais, Reutilização.

CONCRETE PRODUCTION WITHOUT STRUCTURAL FUNCTION THROUGH THE INCORPORATION OF DRY-PIT SLAG AND RESIDUAL PROCESSING ORNAMENTAL STONES.

Abstract: The amount of solid waste generated by industrial activities has been growing on a global and environment scale, representing millions of tons globally per year. Thus, the reuse of industrial by-products presents itself as an alternative for the production of more sustainable building materials and construction processes. This research aims at verifying the technical viability of the use of industrial waste, for example, the blast furnace slag (*dry-pit* slag) and the ornamental stones processing residue (RBRO) as a substitute for natural aggregates and addition on mass of cement, respectively, for concrete production without structural function. The samples of *dry-pit* slag were made available by a steel mill in the municipality of Serra/ES, while that of RBRO was supplied by a beneficiation company located in the municipality of Nova Venécia/ES. The materials were characterized by physical and mineralogical analysis. Three concrete mixtures were prepared to assess the properties in the fresh state by means of the specific mass and cone trunk abatement and in the hardened state through the axial compressive strength test at the ages of 7, 28 and 91 days. The results obtained did not meet the objective of the research, since the aggregate provided has granulometry outside the limits established by the norms, which can be a restriction variable to its use, being necessary prior improvement for possible use as an input for construction civil.

Keywords: Waste Utilization, Dry-pit Slag, Residual Processing of Ornamental Stones, Reuse.

1. INTRODUÇÃO

A busca por concretos mais duráveis e que utilizem menor quantidade de recursos minerais não renováveis têm conduzido as universidades, bem como os centros de pesquisa de multinacionais à busca por alternativas para utilização dos resíduos gerados em diferentes seguimentos da indústria mundo afora, objetivando a criação de possibilidades para

incorporação e produção de concretos mais sustentáveis. Assim, relacionado à geração de resíduos no estado do Espírito Santo, as indústrias siderúrgicas e de beneficiamento de rochas ornamentais, respectivamente, em suas rotinas de processos geram a escória *dry-pit* e o resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em quantidades significativas e por não possuírem destinação específica, se acumulam em estoques inutilizáveis nos pátios dessas indústrias ou são conduzidas a aterros sanitários o que acarreta em custos.

Um dos resíduos gerados em função do processo de beneficiamento do aço é a escória de alto forno, obtida no processo de redução do minério de ferro. As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério, fundentes (calcário e dolomita) e cinzas do coque (carvão mineral). No estado líquido, quando depositada em pátios, o subproduto recebe o nome de escória bruta de alto forno (SBRIGHI NETO, 2011) e após conclusão de seu processo de resfriamento ao ar livre, o material é destinado para pátios descobertos e recebe o nome de escória *dry-pit* (SOUZA FILHO, 2005; ARRIVABENI, 2000).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2016) cerca de 43% dos coprodutos gerados no ano de 2015, foram de escória de alto forno. Apenas no estado do Espírito Santo, são gerados mensalmente, aproximadamente 5000 toneladas de escória *dry-pit* oriundas de paradas emergenciais por problemas operacionais ou de períodos de manutenção preventiva dos granuladores (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2017).

Semelhante à indústria siderúrgica, a produção mundial de rochas ornamentais, no ano de 2014 foi de 136,5 milhões de toneladas (DEGEN, 2017) sendo China, Índia, Turquia e Brasil os principais produtores (ABIROCHAS, 2017). No Brasil, o estado do Espírito Santo engloba a maior parcela da produção nacional de rochas ornamentais, encerrando o ano de 2016 com 75% de representatividade no volume físico e 81% no faturamento das exportações brasileiras, ou seja, 1,8 milhão de toneladas de rochas ornamentais foram exportadas (ABIROCHAS, 2017). No entanto, junto ao processo de beneficiamento, ocorre o problema da geração de resíduos, a exemplo, o resíduo da extração do bloco; da serragem para enquadramento nas dimensões padrão e de processos de polimento. Cerca de 25% a 30% do volume do bloco transforma-se em resíduos provenientes dos processos de beneficiamento (GONÇALVES, 2000; GONÇALVES, MOURA e DAL MOLIN, 2002), ou seja, acarretando em custos altos com descarte final adequado. Então, considerando-se o volume exportado pelo estado do Espírito Santo, estima-se uma geração de RBRO na ordem de 450 mil toneladas, apenas em 2016. Como forma de colaborar com a redução da exploração de matérias-primas, mitigar a problemática da geração de resíduos e com a quantidade de gás carbônico lançado na atmosfera é proposta a utilização desses resíduos incorporados ao concreto.

Neste sentido, utilizar subprodutos industriais como a escória *dry-pit* e o RBRO na produção de concreto sem função estrutural, pode possibilitar vantagens como: redução do consumo de agregados naturais, bem como a destinação mais eficiente desses resíduos. Ademais, serve como opção para as indústrias geradoras comercializarem os subprodutos resultantes, visto que é uma forma de lucratividade, à medida que os consumidores também podem se beneficiar ao adquirirem insumos com desempenho similar ou até superior aos materiais naturais. Logo, o objetivo do estudo era avaliar a viabilidade técnica da utilização de escória *dry-pit* em substituição total dos agregados naturais e a incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como adição à massa de cimento, para produção de concreto sem função estrutural.

1.1. EXPERIÊNCIAS NA UTILIZAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS E DA INDÚSTRIA DE ROCHAS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO

É notório que, pela imensa capacidade produtora da indústria da construção civil, evidencia-se também um grande volume de resíduos gerados em seus processos produtivos. Sendo assim, visando trazer benefícios como: preservação de recursos naturais, economia de energia, redução do volume de aterros e custos com controle ambiental; o reaproveitamento de resíduos torna-se uma alternativa para o aumento da sustentabilidade econômica do setor.

Em países como Japão, Estados Unidos e países da Europa, a utilização de escória *dry-pit* como agregado graúdo e miúdo para concreto, tem sua aplicação definida por meio das mesmas normas empregadas à agregados naturais. Agora, Bélgica, Reino Unido e França estabelecem limites claros e rigorosos através de normas técnicas específicas para o uso desse resíduo. Já no Brasil, não há normas técnicas específicas que norteiem o uso da escória em questão como agregado graúdo ou miúdo. A maior parte da escória de alto forno gerada é granulada, cujo mercado são as cimenteiras para uso na fabricação de Cimento Portland de alto forno (CP III). Portanto, a escória *dry-pit* só é gerada em decorrência de falhas operacionais nos granuladores ou em períodos de manutenção preventiva destes. Sendo nesses casos, resfriadas ao ar livre e sem destino específico para utilização (SBRIGHI NETO, 2011).

Pesquisas realizadas no estado do Espírito Santo com a utilização de escória de alto forno, destacam-se os estudos dirigidos por Arrivabeni (2000) que investigou à utilização da escória nas formas: escória *dry-pit* como agregado graúdo, escória de alto forno granulada moída (EAFGM) e escória de alto forno granulada (EAFG) como agregado miúdo. Os resultados encontrados demonstraram a viabilidade técnica do uso de escórias em todas as formas como insumos para produção de concreto, uma vez que, os resultados dos concretos contendo escória foram similares ao referência e o resíduo se mostrou inerte. Neste mesmo seguimento, Coelho *et al.* (2009) desenvolveram na Universidade Federal do Espírito Santo, estudos para avaliar o comportamento do concreto contendo escória de alto forno ativada quimicamente para produção de estruturas hidráulicas do tipo quebra-mar. Foi percebido que, os concretos contendo escória com ativação química obtiveram os melhores resultados em relação às misturas de controle; apresentaram valores de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral superiores; baixa absorção de água e redução da capacidade de penetração de agentes agressivos.

Outras pesquisas aproveitando escória *dry-pit* como agregado graúdo em concretos, a apresentam com potencial de substituir até 100% dos agregados naturais, uma vez que, melhoram a resistência e durabilidade das misturas em comparação às de controle (SADEK e EL-ATTAR, 2012; OZBAKKALUGLU, GU e POUR, 2016). Por sua rugosidade e maior porosidade, os agregados grosseiros de escória, possuem maior contato com a pasta. O preenchimento das cavidades superficiais com pasta de cimento acarreta no aumento da resistência de ligação nesta zona (WANG, *et al.*, 2012). Portanto, demandam maior quantidade de água para obtenção de uma mesma trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Nas aplicações como agregado miúdo, a escória *dry-pit* mostrou resultados satisfatórios para utilização na produção de tijolos de cimento sólidos, demonstrando boa resistência à abrasão e alta resistência à ação de intempéries, sendo recomendada para substituir até 100% dos agregados para a fabricação de tijolos de cimento portadores de carga (SADEK, 2014). O resíduo se mostrou viável também na confecção de tijolos prensados, quando aplicada junto à escória granulada de alto forno e resíduo de corte de rochas, sem utilização de Cimento Portland e agregados minerais. Assim, resultou em um produto com valores satisfatórios de resistência à compressão; absorção de água; abrasão; pequenas alterações dimensionais e menor custo (SOUZA FILHO, 2005). Contudo, em concretos de Cimento Portland, notou-se potencial de substituição parcial do agregado natural por escória

dry-pit para o teor de 25% (BABU, MAHENDRAN, 2014; RAO, RANI e TEJA, 2015). Entretanto, foi observado que nas misturas contendo 50% de escória e 50% de areia, as misturas de concreto obtiveram resultados satisfatórios e bem semelhantes ao concreto de referência (RAO, RANI e TEJA, 2015).

Equidistante, visando melhoria do preenchimento de poros presentes no concreto com escória *dry-pit*, o RBRO é um material que atribui aumento das propriedades mecânicas (GONÇALVES, MOURA e DAL MOLIN, 2002). Sobre esta ótica, Dal Molin (2011) aponta o resíduo como adição mineral inerte ou *filler*, pois preenche os microporos do concreto promovendo melhor empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Avaliando adições de resíduo nas porcentagens de 20%, as pesquisas de Alves (2008) e Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002) denotam concretos com melhoria na resistência à compressão, característica também observada por Degen (2017) após tratamento térmico do material, além da redução de absorção de água e porosidade. Os estudos de Soares (2014) expressam também incremento na resistência ao ataque de sulfatos, coesão, consistência e redução da exsudação para teores de 5% de adição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A referente pesquisa abordará a metodologia experimental para elaboração do artigo devido a quantidade de variáveis que influenciam nas respostas dos experimentos.

2.1. Caracterização da escória *dry-pit*

Nesta pesquisa, a escória *dry-pit*, foi utilizada como substituta total dos agregados naturais. O resíduo é proveniente dos pátios de estocagem de uma siderúrgica, localizada no município de Serra/ES. Foi coletada e disponibilizada em frações granulométricas distintas, isto é: escória *dry-pit* 0 a 5 mm, 5 a 12 mm e 12 a 19 mm. Posteriormente a coleta, o material foi transportado para o laboratório da Faculdade Brasileira Multivix, em Vitória/ES para estocagem e posterior caracterização. Foi necessário secar a escória em estufa, com temperatura de 100°C, durante 24 horas e em seguida resfriá-la à temperatura ambiente.

2.1.1. Análise mineralógica

Para identificação das fases cristalinas e dos minerais presentes no material, foi realizada a técnica de difração de raios-X (DRX). Para isto, o material foi peneirado (peneira de nº 200) e acondicionado em porta amostras de alumínio para análise em equipamento DRX 6000 Shimadzu no laboratório da UFES. A amostra foi analisada sob voltagem 40 KV e amperagem de 30 mA, e sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,02°/seg, de 10° a 90° 2θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (cátodo) e o tubo de raios-X é de cobre (ânodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta 1$ 1,3922 Å. Os dados foram interpretados a partir de software, acoplado ao difratômetro.

2.1.2. Desgaste por Abrasão *Los Angeles*

Para medir o índice de desgaste do agregado graúdo de escória *dry-pit*, realizou-se o ensaio de Abrasão *Los Angeles* no laboratório de materiais de construção da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 51 (ABNT, 2000), sendo utilizada a graduação B, 11 esferas e emprego de 500 rotações.

2.1.3. Caracterização física da escória *dry-pit* como agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo a escória *dry-pit* na fração 0 a 5 mm. A verificação da conformidade do material foi através dos ensaios indicados na Tabela 1, com valores comparados aos parâmetros especificados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 1 - Caracterização física dos agregados miúdos

Características analisadas	Escória 0 a 5 mm	Unidade	Método de ensaio
Dimensão máxima característica	4,75	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Módulo de finura	3,34	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Massa específica	2,74	kg/dm ³	NBR 9776 (ABNT, 1987).
Massa unitária - método c	1,45	kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006).
Teor de material pulverulento	5,31	%	NBR NM 46 (ABNT, 2003).

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

2.1.4. Caracterização física da escória *dry-pit* como agregado graúdo

Neste estudo, o agregado graúdo utilizado, foi a escória *dry-pit* nas frações de 5 a 12 mm e 12 a 19 mm, respectivamente, análogas a brita 0 e brita 1. Na Tabela 2, estão apresentadas as principais análises realizadas no material, bem como os valores comparados aos parâmetros especificados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 2 - Caracterização física dos agregados graúdos

Características analisadas	Escória 5 a 12mm	Escória 12 a 19mm	Unidade	Método de ensaio
Dimensão máxima característica	12,5	25	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Módulo de finura	5,97	6,90	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Massa específica aparente	2,65	2,58	kg/dm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009).
Massa unitária - método c	1,26	1,23	kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006).
Volume de vazios	52	52	%	NBR NM 45 (ABNT, 2006).
Absorção de água	3,30	3,73	%	NBR NM 53 (ABNT, 2009).
Teor de material pulverulento	1,85	1,35	%	NBR NM 46 (ABNT, 2003).
Abrusão <i>Los Angeles</i>	25,13	25,13	%	NBR NM 51 (ABNT, 2000).

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

2.2. Caracterização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

Tabela 3 - Caracterização do RBRO

Características analisadas	RBRO	Unidade	Método de ensaio
Dimensão máxima característica	0,25	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Massa específica	2,64	kg/dm ³	NBR NM 23 (ABNT, 2001).
Finura peneira 75µm	17,55	%	NBR 11579 (ABNT, 1991).

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

O RBRO utilizado nessa pesquisa é proveniente de uma empresa de beneficiamento de rochas, situada no município de Nova Venécia/ES. Foi efetuada a caracterização do material, através da composição granulométrica, massa específica, finura na peneira n° 200 conforme Tabela 3, além da caracterização mineralógica por meio da técnica de DRX cujo procedimento e aparelhagem seguem os descritos para escória *dry-pit*.

2.3. Materiais para produção do concreto

Na produção dos 36 corpos de prova moldados para pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cimento CP-V ARI, escória *dry-pit*, RBRO, aditivo plastificante polifuncional (ADI-POLI 523 da ADITIBRAS), cuja dosagem seguiu o recomendado pelo fabricante e água da concessionária local.

2.4. Determinação do traço de concreto

A dosagem seguiu o método ABCP/ACI (Associação Brasileira de Cimento Portland/*American Concrete Institute*). Segundo o item 5.6.3 da NBR 12655 (ABNT, 2006) foi previsto 22 MPa à idade de 28 dias com desvio-padrão de 4MPa como parâmetros de resistência, para atendimento à classe C15 da NBR 8953 (ABNT, 2015), cuja utilização é destinada a concretos sem função estrutural. Também considerou-se os requisitos de desempenho da NBR 12655 (ABNT, 2006). A Tabela 4 indica o quantitativo de cada insumo.

Tabela 4 - Dosagem dos materiais em massa (secos ao ar)

Misturas	Cimento	RBRO (%)	Escória 0 a 5mm	Escória 5 a 12mm	Escória 12 a 19mm	Consumo de cimento (kg/m ³)	A/C	Aditivo (ml)
TE1	1	20	6,65	2,75	4,05	150	0,75	0,0090
TE2	1	20	4,72	2,06	3,01	200	0,75	0,0090
TE3	1	20	3,58	1,65	2,42	250	0,70	0,0090

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

2.5. Produção dos concretos

Baseados no objetivo geral do estudo e de acordo com a metodologia de reciclagem de resíduos proposta por John (2000, p. 71), nenhum tipo de beneficiamento foi realizado nos resíduos para produção do concreto. Foram confeccionadas 3 (três) misturas com variação do consumo de cimento nas proporções de 150 kg/m³, 200 kg/m³ e 250 kg/m³, respectivamente, denominadas TE1, TE2 e TE3, totalizando 36 corpos de prova. As misturas utilizaram a escória *dry-pit* 0 a 5 mm em substituição total ao agregado miúdo e as escórias *dry-pit* 5 a 12 mm e 12 a 19 mm nas proporções de 40 e 60% respectivamente, em substituição total aos agregados graúdos. Ainda, foi feita a incorporação de RBRO como adição mineral no teor de 20% em relação à massa de cimento e como aglomerante o cimento CPV ARI.

No estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento do tronco de cone para medir o índice de consistência do concreto de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e ensaio de massa específica, conforme NBR 9833 (ABNT, 2009). Já a moldagem e cura dos corpos de prova seguiram a NBR 5738 (ABNT, 2003), sendo o adensamento manual. Os corpos de prova foram curados em solução aquosa até as idades de ensaio de 7, 28 e 91 dias.

2.6. Análise estatística

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente através da técnica de análise de variância (ANOVA), com intuito de comprovar a influência de cada variável sobre os resultados finais. O software utilizado foi o Statsoft Statistica, versão 10 (2011), cujo nível de confiabilidade utilizado foi de 95%, conforme adotado na engenharia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização física do agregado miúdo

A Tabela 1 apresenta a caracterização física do agregado miúdo. A escória *dry-pit* na fração 0 a 5 mm, com dimensão máxima característica (DMC) de 4,75 mm e módulo de

finura (MF) de 3,34, se mostrou acima dos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) nas peneiras 2,36 mm e 1,18 mm, o que a torna de modo genérico, como um material intermediário à areia grossa e ao pedrisco. A heterogeneidade na granulometria pode estar vinculada a falhas na britagem do resíduo. Para análise comparativa dos materiais, o Gráfico 1 apresenta a curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos utilizados.

É um consenso na engenharia de materiais que a composição granulométrica dos agregados, especialmente dos miúdos, está relacionada à coesão, aspereza, exsudação e segregação do concreto. De acordo com Sbrighi Neto (2011) e Mehta e Monteiro (2008) areias muito grossas comumente produzem concretos ásperos, pouco trabalháveis e com tendência à segregação. Então, a curva granulométrica apropriada para concretos depende da finalidade de sua aplicação e da consistência requerida. Assim, granulometrias contínuas, sem falta ou excesso de grãos retidos nas peneiras, conferirão melhores resultados as misturas.

Acredita-se que, em virtude da descontinuidade da granulometria da escória *dry-pit* 0 a 5 mm, textura superficial visivelmente rugosa e a forma do grão aparentemente lamelar, como se observa na Figura 1, as misturas de concreto não apresentaram coesão e consistência aceitável. Isso ocorreu, provavelmente, pela maior demanda de água e pasta que esses agregados requerem. Para Mehta e Monteiro (2008) usualmente, quanto mais angulosas, alongadas e ásperas são as partículas, mais pasta será exigida para envolver maior área específica, compensar as dificuldades no rolamento e de produzir misturas mais trabalháveis. Por isso, as características físicas do agregado podem ter prejudicado a resistência dos traços.

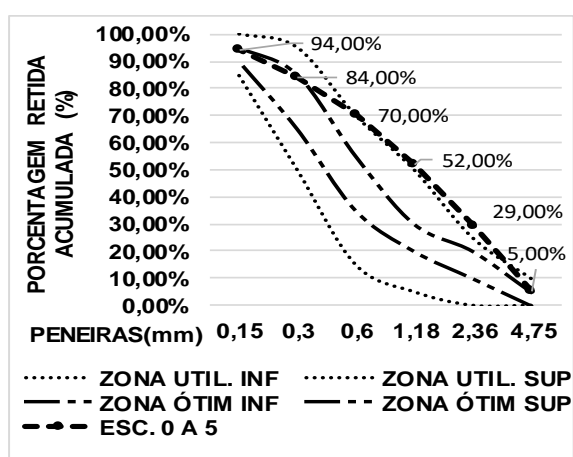


Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.



Figura 1 - Fração da escória (0 a 5 mm) retida na peneira de 2,36 mm.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

3.2. Caracterização física do RBRO

O resíduo RBRO apresentou massa específica de 2,64 g/cm³, encontrada conforme NBR NM 23 (ABNT, 2003); DMC de 250 µm e finura na peneira nº 200 (75 µm) de 17,55%, determinados de acordo com procedimento da NBR NM 248 (ABNT, 2001) e NBR 11579 (ABNT, 1991). Vale destacar que o material foi utilizado sem passar pelo processo de beneficiamento.

3.3. Caracterização mineralógica dos resíduos

Foi realizada a análise mineralógica por meio da técnica de difração de raio-X que auxilia na verificação da estrutura cristalina do material, bem como os minerais presentes.

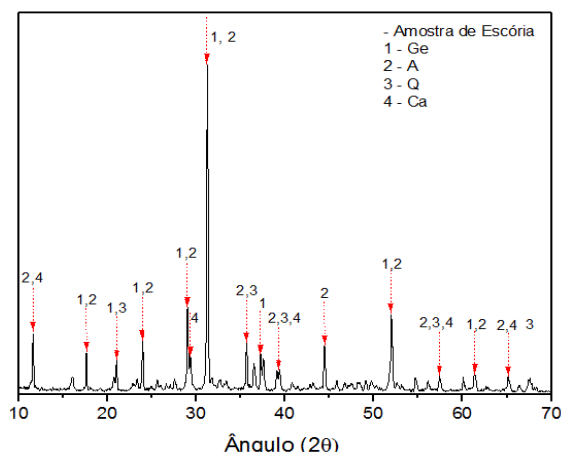


Figura 2 - Difratograma da escória *dry-pit*.
Fonte: Acervo pessoal, 2017.

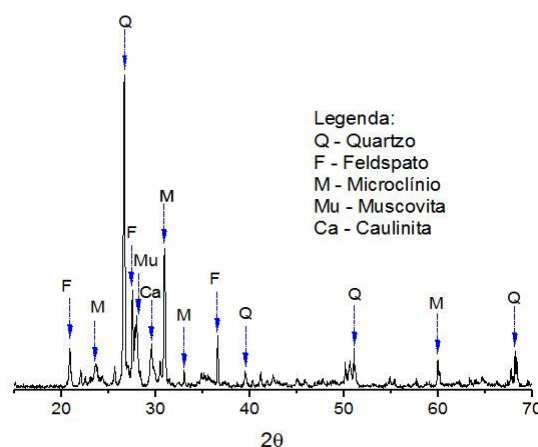


Figura 3 - Difratograma do RBRO.
Fonte: Acervo pessoal, 2017.

No que se refere à caracterização mineralógica da escória *dry-pit*, a interpretação do difratograma apresentado na Figura 2 mostra que foram encontrados os minerais Gehlenita (Ge) e Akermanita (A) em maiores concentrações. Os resultados obtidos para a análise de difração de raios-X são afins aos encontrados por El-Didamony *et al.* (2013) e Sadek (2014) e indicam a característica cristalina do material, o que resulta em carência de propriedades hidráulicas e capacidade para utilização como agregado termodinamicamente estável em relação às escórias granuladas. Assim, comportando-se como agregado inerte (MOREIRA, 2006) e classificando-se como resíduo classe II A – não inerte e classe II B – inerte (ARRIVABENI, 2000; SOUZA FILHO, 2005), não apresentando riscos à saúde.

Já o RBRO, apresentou o mineral Quartzo (Q) em maior concentração como mostra a Figura 3. Os resultados da difração de raios-X são similares aos encontrados por Gonçalves (2000); Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002); Alves (2008) e Soares (2014) em que o resíduo apresentou estrutura cristalina típica de compostos estáveis quimicamente, ou seja, isento de atividade pozolânica, sendo classificado como adição mineral tipo fíler; restringindo sua ação ao efeito físico de melhorar o empacotamento granulométrico, do mesmo modo que atuar como ponto de nucleação na hidratação do cimento (DAL MOLIN, 2011). Em relação à sua classificação ambiental tal qual a NBR 10.004 (ABNT, 2004) o RBRO apresenta-se como resíduo classe II A – Não Inerte (GONÇALVES, 2000; GONÇALVES, MOURA e DAL MOLIN, 2002; SOUZA FILHO, 2005 e SOARES, 2014) o que certifica a possibilidade de ser utilizado como insumo para construção civil (SOARES, 2014).

3.4. Caracterização física do agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizada a escória *dry-pit* nas frações 5 a 12 mm e 12 a 19 mm. A escória 5 a 12 mm, com DMC de 12,5 mm e MF de 5,97, mostrou-se bem próxima à graduação da brita 0, pois se apresentou acima dos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) na peneira de malha 9,5 mm. Já a fração de 12 a 19 mm apresentou graduação similar à brita 1, com DMC de 25 mm e MF de 6,90 encontrando-se fora dos limites especificados pela norma na peneira de malha 12,5 mm. Os Gráficos 2 e 3 exibem as curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdos empregados nas misturas.

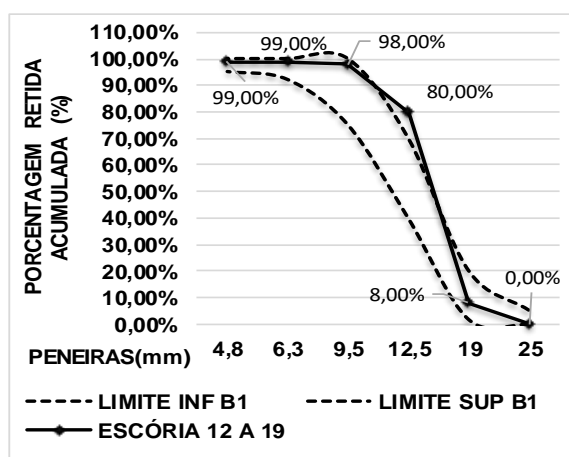


Gráfico 2 - Curva de distribuição granulométrica da escória 12 a 19 mm.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.



Figura 4 - Fração da escória 12 a 19 mm retida na peneira de 12,5 mm.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

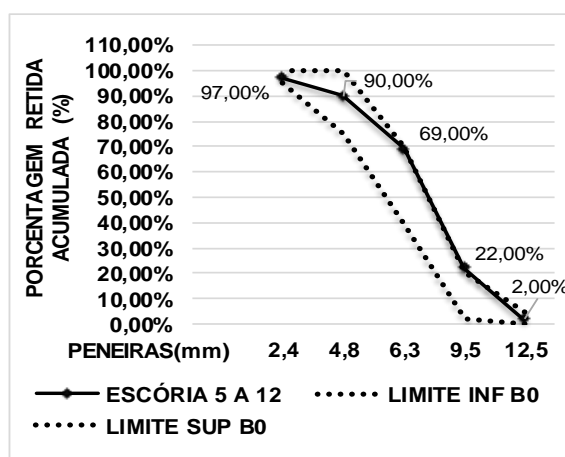


Gráfico 3 - Curva da distribuição granulométrica da escória 5 a 12 mm.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.



Figura 5 - Abatimento do tronco de cone do traço TE3.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

Foi verificada elevada absorção de água dos agregados de escória *dry-pit* 5 a 12 mm e 12 a 19 mm, respectivamente, 3,30% e 3,73%. O resultado pode estar teoricamente ligado à textura superficial porosa dos grãos (Figura 4). Arrivabeni (2000) constatou que os grãos de escória *dry-pit* apresentam textura superficial áspera/rugosa e/ou porosa/cavernosa, além de valores de absorção de água elevados o que provoca maior demanda de água. Fatores que podem ter contribuído na atenuação da resistência mecânica do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008), existem outras propriedades dos agregados graúdos e miúdos a se pensar que interferem na resistência do concreto, além da resistência à compressão, como tamanho, forma, textura superficial, distribuição granulométrica e composição mineralógica, de modo que não dependem apenas do fator água/cimento

3.4.1. Análise do desgaste por abrasão *Los Angeles*

Quanto ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, o agregado graúdo de escória *dry-pit* possui desempenho satisfatório, visto que, seu índice de desgaste por abrasão foi de 25,13%, valor inferior ao especificado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) que é de até 50% em massa do material. De acordo com Sbrighi Neto (2011) os agregados de escória cristalizada em outros países apresentam comumente massa específica entre 2,0g/cm³ a 2,5g/cm³ e resistência ao desgaste por abrasão *Los Angeles* entre 20% e 35%, além de elevada angulosidade.

3.5. Concretos

Nesta fase, foram avaliadas as propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido, cujo resultados estão apresentados e discutidos abaixo.

3.5.1. Estado Fresco

Os concretos foram submetidos a determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone, massa específica e por fim, moldados em corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm, consoante o estabelecido pela norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

3.5.1.1. Abatimento do tronco do cone

Mediante análise dos dados médios de consistência das misturas expressos na Tabela 5, percebe-se pequenas variações entre os traços, além de não terem atingido o abatimento desejado (80 a 100 mm) como mostra a Figura 5. Resultado este que, possivelmente está ligado à forma lamelar dos grãos do agregado miúdo e textura rugosa do agregado graúdo, assim como à composição granulométrica de ambas faixas granulométricas. Para Arrivabeni, (2000) e Wang *et al.*, (2012) os agregados grosseiros de escória são mais rugosos e porosos, possuem maior absorção e demandam mais água para obtenção de uma mesma trabalhabilidade em relação aos agregados naturais, sendo portanto, recomendada sua utilização na condição saturada (MEHTA e MONTEIRO, 2008; SADEK, EL-ATTAR, 2012). Logo, a falta da pré-saturação pode ter provocado a baixa trabalhabilidade das misturas. Ademais, por sua finura, o RBRO também exige maior quantidade de água da mistura e consequentemente reduz o índice de consistência. Fato observado nas pesquisas de Gonçalves; Moura e Dal Moulin (2002), Soares (2014), Degen (2017) e que pode ser solucionado com a incorporação de aditivos plastificantes e superplastificantes (DAL MOLIN, 2011).

Tabela 5 - Propriedades do concreto no estado fresco

Misturas	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Consumo de cimento (Kg/m ³)	A/C	Aditivo (ml)
TE1	8	2260	150	0,75	0,0090
TE2	18	2280	200	0,75	0,0090
TE3	37	2299	250	0,70	0,0090

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

3.5.1.2. Massa específica

Em relação à massa específica, a NBR 12655 (ABNT, 2006) classifica os concretos como normais, quando as massas específicas estão compreendidas entre 2,0 e 2,8 kg/dm³. Assim, como mostra a Tabela 5, os resultados encontrados se enquadram nesta classificação.

3.5.2. Estado endurecido

No estado endurecido, a propriedade analisada do concreto com escória *dry-pit*, foi a resistência à compressão axial, verificada nas idades de 7, 28 e 91 dias de cura, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994). Os resultados e discussões obtidos são apresentados a seguir.

3.5.2.1. Resistência à compressão axial

A resistência é um atributo normalmente especificado no projeto e serve como parâmetro para o controle de qualidade do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008) o

teste é de fácil execução e permite a dedução de outras propriedades. Os resultados médios e o percentual do coeficiente de variação das resistências estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de resistência à compressão axial

Traços	Idade de 7 dias			Idade de 28 dias			Idade de 91 dias		
	Fcm (MPa)	C.V (%)	Fcj (MPa)	Fcm (MPa)	C.V (%)	Fcj (MPa)	Fcm (MPa)	C.V (%)	Fcj (MPa)
TE1	8,12	3,61	1,52	11,23	4,76	4,63	12,40	3,54	5,80
TE2	9,05	2,10	2,45	11,97	1,36	5,37	13,13	2,41	6,53
TE3	13,30	2,57	6,70	19,48	2,94	12,88	22,91	6,24	16,31

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

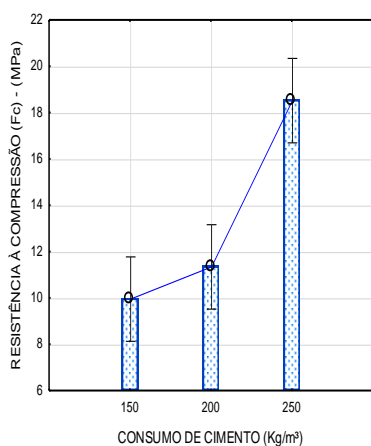


Gráfico 4 - Consumo de cimento em relação aos resultados médios de resistência à compressão.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

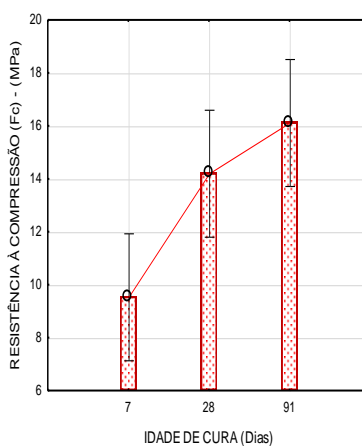


Gráfico 5 - Idade de cura em relação aos resultados médios de resistência à compressão.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

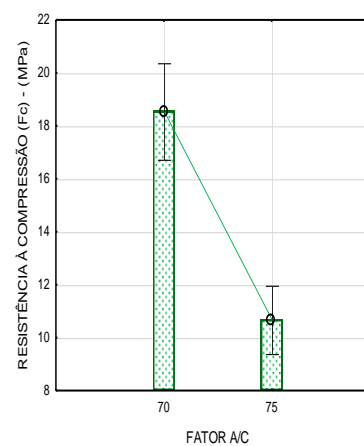


Gráfico 6 – Fator A/C em relação à média dos resultados de resistência à compressão.

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

Observa-se ganho de resistência nas misturas com o passar do tempo e aumento do teor de cimento, resultado provavelmente explicado, em decorrência do processo de hidratação constante da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Autores como Andrade e Tutikian (2011), revelam que a resistência final do concreto é influenciada também pelas características do agregado graúdo como: composição mineralógica, granulometria, forma e textura superficial das partículas. Contudo, estas propriedades não são consideradas na dosagem, uma vez que a maioria dos agregados convencionais possuem propriedades mecânicas superiores à da zona de transição agregado/pasta onde normalmente ocorre a ruptura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Considerando o objetivo do estudo, que era obter um concreto de resistência de 15MPa aos 28 dias, o traço TE3, com o maior consumo de cimento e menor relação a/c alcançou os melhores resultados. Contudo, só atingiu este parâmetro aos 91 dias. A partir da análise dos Gráficos 4, 5 e 6 observar-se à relação do consumo de cimento, idade e fator a/c com o ganho de resistência. O ganho de resistência notado entre os traços TE1 e TE2 para o TE3 também pode estar atribuído ao maior consumo de cimento e menor fator a/c, em acordo com a Lei de Abrams que evidencia a redução da resistência à compressão com o aumento da relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 2008 *apud* ANDRADE e TUTIKIAN, 2011).

Tabela 7 - Análise de variância do efeito isolado da idade; consumo de cimento e fator água/cimento sobre a média dos resultados de resistência à compressão.

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	Valor de Fcal	Valor de P	Significância
---------------------	--------------------	--------------------	-----------	---------------	------------	---------------

Consumo de cimento	507,364	2	253,682	26,3717	0,000000	SIM
Erro	317,443	33	9,619	-	-	-
Idade	275,185	2	137,593	8,2612	0,001234	SIM
Erro	549,662	33	16,655	-	-	-
Fator A/C	495,578	1	495,578	51,2257	0,000000	SIM
Erro	329,049	34	9,678			

Fonte: Acervo pessoal, 2017.

A partir da análise dos resultados da Tabela 7, perceber-se que a confiabilidade dos resultados. Considerando como prática na engenharia civil a adoção de 5% como nível de significância, o valor de P menor que 0,05 (5%) representa que todas as variáveis analisadas são significativas sobre o resultado de resistência à compressão, conforme esperado.

4. CONCLUSÕES

4.1. Quanto à caracterização dos resíduos

Constatou-se, a partir da análise granulométrica da escória *dry-pit*, foram observadas algumas limitações, o que podem resultar em possíveis dificuldades em seu emprego. A fração de 0 a 5 mm se mostrou acima da zona utilizável superior nas peneiras 2,36 e 1,18 mm, demonstrando excesso de grãos médios, assemelhando-se à areia grossa e ao pedrisco. Já as escória disponibilizadas nas faixas 5 a 12 mm e 12 a 19 mm se revelaram como materiais similares à brita “0” e “1”, de modo respectivo. Assim, todas as granulometrias se apresentaram fora dos limites estabelecidos pelas normas. A forma dos grãos de agregados miúdos de escória *dry-pit* apresentou tendência à lamelaridade ao passo que, os agregados graúdos, demonstraram textura porosa e áspera. Tais observações podem ter impactado na consistência, coesão, consumo de pasta, consumo de água de amassamento e por conseguinte na resistência à compressão das misturas. Portanto, as propriedades (forma e textura) dos grãos podem ser fatores prejudiciais ao emprego da escória *dry-pit*. Já no que concerne a estrutura dos agregados de escória *dry-pit*, esta se apresenta cristalina, o que resulta em carência de propriedades hidráulicas e capacidade para utilização como agregado inerte. Fato este observado no RBRO que também possui estrutura cristalina, o que o isenta de atividade hidráulica e proporciona utilização como adição mineral tipo filer de acordo com a literatura.

4.2. Quanto aos concretos

Foram confeccionadas três misturas denominadas TE1, TE2 e TE3 substituindo 100% os agregados miúdos e graúdos, com baixos consumos de cimento, adição de 20% de RBRO à massa de cimento e aditivo polifuncional. A integral substituição dos agregados naturais por escória *dry-pit* altera consideravelmente as propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto endurecido.

As misturas TE1 e TE2 apresentaram resultados de resistência à compressão insatisfatórios. O baixo consumo de cimento; atrelado ao alto fator água/cimento; forma e textura do agregado miúdo, colaboraram para atenuação dos resultados. No estado fresco, as misturas mostraram baixa consistência e ausência de coesão basicamente, em virtude das propriedades da escória 0 a 5 mm. Por sua vez, o traço TE3 foi o que mais se aproximou dos requisitos almejados, apresentando resistência à compressão aos 28 dias de 12,88 MPa, sendo que aos 91 dias superou a resistência esperada (16,31 MPa). Este traço apresentou baixa consistência pelo abatimento do tronco de cone, contudo, obteve melhoria na coesão dos materiais, provocada possivelmente, pelo maior consumo de cimento e menor relação a/c.

Salienta-se que, todas os traços exibiram relevante tendência à segregação, provavelmente pela heterogeneidade da granulometria do agregado miúdo empregado, fator este que ocasionou em falta de envolvimento da pasta aos agregados.

Os autores declaram a necessidade de mais testes utilizando a escória *dry-pit* como agregado graúdo e miúdo, uma vez que os resultados encontrados não satisfizeram aos requisitos da pesquisa a respeito da viabilidade técnica de utilização da escória *dry-pit* como substituta total dos agregados naturais e de sua influência nas propriedades mecânicas do concreto.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. S. *Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos.* 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ANDRADE, J. J. O., TUTIKIAN, B. F. *Resistência Mecânica do Concreto.* In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e tecnologia.* 1.ed. São Paulo: Ibracon, 1.v, v.7, p. 233-260. 2011.

ARCELORMITTAL TUBARÃO. *Estudos com escória dry-pit: Geração [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por lucascarvalhodasilva36@gmail.com em 21 Ago. 2017.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Balanço das exportações e importações de rochas ornamentais em 2016. Brasil, 2017. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4062/Informe_01_2017.pdf>. Acesso: 18 mar 2017.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – *Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova.* Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739** – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos Cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211** – *Agregados para concreto - Especificações.* Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 8953** – *Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.* Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9776** – *Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.* Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9833** – *Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.* Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 10004** – *Resíduos sólidos Classificação.* Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579** – *Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μ m (n^o 200).* Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12655** – *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.* Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 23** – *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.* Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 45** - *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.* Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46** - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m por lavagem (material pulverulento). Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 51** – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 53** - Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67** – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

ARRIVABENE, L. F. *Uma contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para a produção de concretos.* 2000. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

BABU, J.S.; MAHENDRAN, N. *Experimental studies on concrete replacing fine aggregate with blast furnace slags.* *International journal of engineering trends and technology [IJETI]*, Dindigul, Índia, Apr. v. 10, n. 8, p. 387-389, 2014.

COELHO, M. A. M.; SILVA, M. G.; SOUZA, F. L. dos S.; SARMENTO, R.; ZANDONADE, E.; MORIMOTO, T.; HELMER, J. L. *Bloco de Concreto Tipo Quebra-Mar com Escória de Alto-Forno Ativada Quimicamente.* *Tecnologia em Metalurgia e Materiais (São Paulo)*, v. 5, n.3, p. 186-191, jan-mar. 2009.

DAL MOLIN, D. C. C., *Adições Minerais.* In: **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA.** 1 ed. São Paulo: IBRACON, v.1, 2011. 1946 p.

DEGEN, M. K. *Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT).* 2017. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

EL-DIDAMONY, H., AMER, A. A., EL-SOKKARY, T. M., EL-AZIZ, H. B. *Effect of substitution of granulated slag by air-cooled slag on the properties of alkali activated slag.* *Ceramics international.* Egito, n. 39, p. 171-181, 2013.

GONÇALVES, J. P. *Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como Adição para Produção de Concretos.* 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande so Sul. Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, J.; MOURA, W.; DAL MOLIN, D. *Avaliação da influência da adição do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto.* *Ambiente Construído.* v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Relatório de sustentabilidade.* Brasil, 2016,14p. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.* 2000. 113 f. Tese (livre docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Construção Civil, São Paulo, 2000.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e*

materiais. 3 ed. São Paulo. IBRACON, 2008.

MOREIRA, C. C. *Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos. In: 37ª Reunião anual de pavimentação e 11º Encontro nacional de conservação Rodoviária. 2006, Goiânia/Go. [Trabalho apresentado]. Disponível em:< <http://www.solocap.com.br/trabalhotecnico002.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2017*

OZBAKKALOGLU, T.; GU, L.; POUR, A.; F. *Normal-and high- strength concrets in incorporating air-cooled blast furnace slag coarse aggregates: Effect of slag size and content on the behavior. Construction and Building Materials. Austrália, n. 126, p. 138-146, nov. 2016.*

RAO, B. K.; RANI, M. S.; TEJA, A. S. *Replacement of natural fine aggregate with air cooled blast furnace slag an industrial by product. International Journal of Engineering Research an Aplications [IJERA], Andhra Pradesh, Índia, Jul. v. 5, ISSUE 7, p. 36-40, 2015.*

SADEK, D. M. *Effect of cooling technique os blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. Journal of Cleaner Production. Egito, n. 79, p. 134-141, set. 2014.*

SADEK, D., EL-ATTAR, M. *Development of high-performance green concrete using demolition and industrial wastes for sustainable construction. Journal of American Science 8 [J. Am. Sci. 8], v. 8, n. 4. p.120-131, 2012.*

SBRIGHI NETO, C. *Agregados Naturais, Britados e Artificiais para concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ciência e tecnologia. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 1.v, v.7, p. 233-260. 2011.*

SOARES, R. B. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. 2014. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.*

SOUZA FILHO, F. L. S. *A utilização de co-podrutos da siderurgia e da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais na produção de tijolos prensados. 2005. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santos. Vitória, 2005.*

WANG, A.; DENG, M.; SUN, D.; LI, B.; TANG, M. *Effect of crushed air-cooled blast furnace slag on mechanical properties of concrete. Journal of Wuhan University of technology-mater. Sci. Ed. China. Aug. 2012. V. 27. No 4.*