

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD PÓS-PROCESSADA PARA CONCRETOS SUSTENTÁVEIS

B. P. de Souza, W. C. Fontes, J. M. F. de Carvalho, R. M. R. Mol, E. C. P. da
Costa, R. A. F. Peixoto

Universidade Federal de Ouro Preto
Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMC²
Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto/MG, Brasil.
e-mail: wannarquit@gmail.com

RESUMO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, consumindo uma elevada quantidade de matérias-primas naturais em sua produção. Assim, este trabalho tem como proposta analisar aspectos técnicos e ambientais dos concretos com substituição integral dos agregados naturais por agregados artificiais obtidos do pós-processamento de escória de aciaria LD. Foram realizados ensaios de caracterização física como distribuição granulométrica, teor de umidade, massa específica, massa unitária e caracterização química elementar e mineralógica das amostras de escória de aciaria, utilizando Fluorescência de Raios X. A caracterização morfológica utilizou lupa estereoscópica. A partir desses resultados, foram produzidos concretos com resistências à compressão de 20 e 40 Mpa aos 28 dias, pelo método ABCP. Estes foram caracterizados nos estados fresco e endurecido, obtendo resultados favoráveis à aplicação de escória de aciaria para produção de concreto de cimento Portland, apresentando propriedades semelhantes aos convencionais, e contribuindo para sustentabilidade das construções.

Palavras-chave: agregado artificial, escória de aciaria, concreto, resíduo siderúrgico, sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica, assim como a da construção civil, é responsável por impactos ambientais consideráveis, associados, principalmente, ao consumo de recursos naturais e à geração de um grande volume de resíduos. O setor consome cerca de 75% de todos os recursos minerais extraídos, assim como 44% da energia produzida no país¹. Aliado a isso, a geração de aproximadamente 17 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos por ano, os quais são geralmente armazenados em pátios de rejeitos, envolvendo o consumo de recursos financeiros para sua manutenção e monitoramento e impactando significativamente o meio ambiente².

Assim sendo, ao considerar o melhor aproveitamento da matéria-prima e a reciclagem de resíduos sólidos, aplicando-se o conceito de sustentabilidade em vista a possibilidade de unir duas grandes forças da cadeia produtiva do país, surge a proposta de substituir integralmente os agregados naturais por agregados artificiais siderúrgicos, obtidos do pós-processamento de escória de aciaria, dado que o concreto é capaz de incorporar, como material constituinte, resíduos provenientes da indústria siderúrgica.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para produção das matrizes cimentícias (concreto) empregadas neste trabalho é a escória de aciaria tipo LD, coletada no pátio de rejeitos de uma usina siderúrgica localizada na região sudeste do estado de Minas Gerais. As amostras foram submetidas a processos de estabilização dos óxidos de cálcio e magnésio, através de ciclos de molhagem e revolvimento durante período de 12 meses.

Com o objetivo de corrigir a granulometria do material utilizado, construíram-se duas peneiras com dimensões de 1,00 x 2,00m com malha de aberturas de 2,4mm e 1,18mm. A granulometria foi montada de forma a ficar contida nos limites utilizáveis. As porcentagens das frações utilizadas foram:

- Material abaixo de 1,18mm: 74,60%
- Material entre 1,18mm e 2,36mm: 11,35%
- Material acima de 2,36mm: 14,05%

Essas amostras de escória de aciaria, foram submetidas a processo convencional de tratamento para a recuperação de metálicos, utilizando um imã com tambor magnético modelo HF-Ø12"x12", com potência de Principal em torno de 1350 Gauss. Foram realizados vários testes e observou-se que o processamento mais eficiente ocorria quando o material era passado no imã 2 vezes. Para produção das matrizes de cimento Portland, foram coletados 600kg de material, devidamente homogeneizados, quarteados e estocados.

Os ensaios de caracterização foram realizados nos agregados artificiais e agregados naturais, a fim de comparação.

Caracterização físico-química dos agregados

Os agregados artificiais de escória de aciaria e natural utilizados na produção do concreto foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterização: análise granulométrica³; massa específica dos agregados miúdos⁴; massa específica dos agregados graúdos⁵; massa unitária⁶; material pulverulento⁷; teor de umidade⁸; umidade superficial⁹ e absorção de água¹⁰.

Os agregados artificiais foram caracterizados segundo sua morfologia. Para identificação das características microscópicas desses materiais foram conduzidas análises com auxílio de estereoscópio modelo XTB-3AT, marca Coleman, com aumento de 45X. As imagens foram adquiridas de um sistema digital modelo HDCE-50B, também da marca Coleman, a fim de que fossem identificadas propriedades como forma, rugosidade e distribuição dos grãos.

Para a determinação da constituição química dos agregados artificiais utilizados, foram conduzidas análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) – NanoLab – RedeMat/UFOP, equipamento da Shimadzu RayNy EDX-720. As amostras utilizadas foram secas em estufa à 105°C por 24 horas, cominuídas em moinho Retsch PM100 de alta eficiência, durante 5 minutos a uma rotação de 300rpm. Após a caracterização físico-química dos agregados foram dimensionados os traços dos concretos, que foram produzidos em laboratório e moldados corpos de prova necessários para a determinação das propriedades físicas e mecânicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização físico-química dos agregados

As amostras de escória utilizada como agregados apresentaram teores significativos de óxidos de ferro magnéticos, conforme resultados apresentados na Figura 1, a seguir.

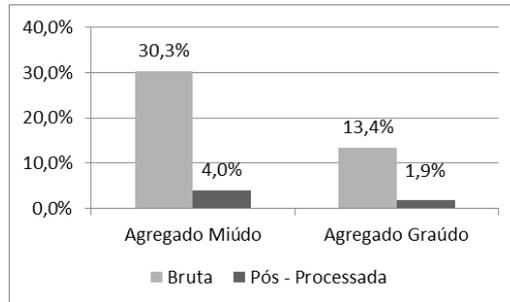


Figura 1: Teor de metálico das escórias

Os materiais utilizados na produção dos concretos de referência (NAT 20, NAT 40) e nos concretos de escória (ELD 20, ELD 40) foram classificados segundo faixas granulométricas para agregados miúdos³, conforme ilustrado na

Figura 1, apresentada a seguir.

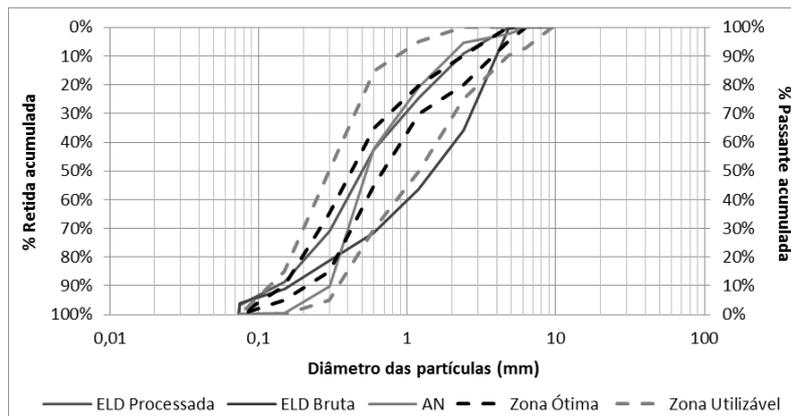


Figura 1: Distribuição granulométrica – Agregado miúdo

Comprova-se a necessidade do processo de segregação das escórias brutas a fim de que sua granulometria seja adaptada a padrões normativos mínimos.

A classificação dos materiais utilizados na produção dos concretos citados acima, segundo faixas granulométricas para agregados graúdos³, é ilustrada na Figura 2 a seguir.

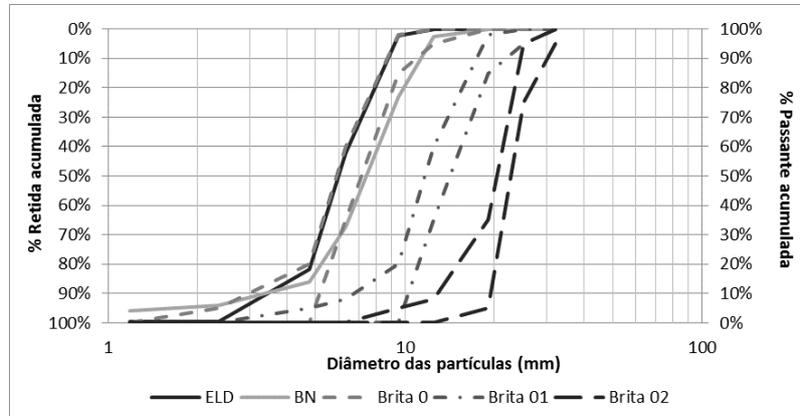


Figura 2: Distribuição granulométrica – Agregado graúdo

Ambos se encontram no limite descrito pela faixa ABNT³, apresentando-se a amostra ELD um pouco mais fina, podendo criar demandas relativas ao incremento do teor de água.

A

Figura 1, a seguir, mostra os resultados de módulo de finura e DMC dos agregados.

Tabela 1: Dimensão máxima característica e módulo de finura

	Agregado miúdo			Agregado graúdo	
	ELD Processada	ELD Bruta	AN	ELD	BN
DMC	4,8	4,8	2,4	9,5	12,5
Módulo de Finura	2,36	3,37	2,60	5,82	5,87

Verificam-se teores de materiais finos idênticos para todos os agregados, embora as areias obtidas do processamento da escória apresentem maior dimensão característica. Para os agregados graúdos, verifica-se maior DMC para os agregados naturais. Observa-se, ainda, que os grãos de escória apresentam maior higroscopicidade que os grãos naturais. Dessa forma, a presença discreta de grãos de menores dimensões favorece o desempenho das matrizes no estado fresco¹².

Os resultados para massa específica e unitária dos agregados apresentam-se na Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.. Para todos os tratamentos, as escórias de aciaria apresentam maior densidade que os agregados naturais, em função da presença de óxidos metálicos ¹³.

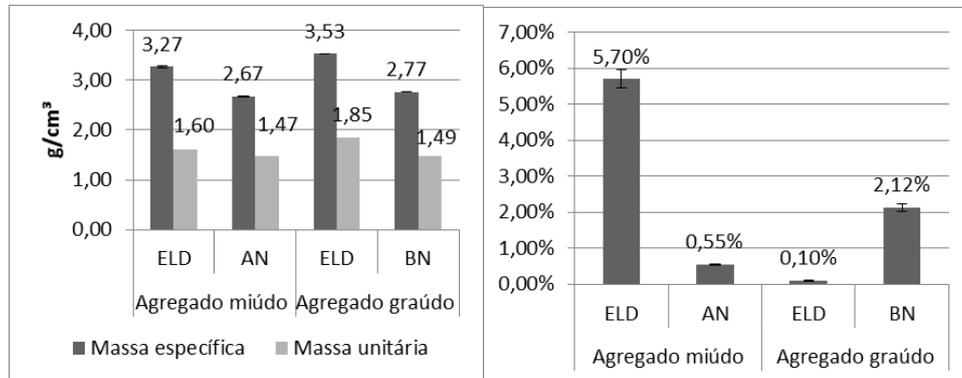


Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.:
Massa específica e unitária **Figura 3: Material pulverulento**

Os resultados, obtidos para presença de materiais pulverulentos dos agregados utilizados, apresentam-se na Figura 3 acima, e indicam valores superiores aos limites admitidos, para a areia ELD e para a brita BN, o que pode influenciar nas propriedades dos concretos. Para adequação desses resultados seria necessária a lavagem desses agregados para retirada de fração pulverulenta.

A umidade superficial e absorção de água dos agregados miúdos, como os teores de umidade dos agregados miúdos e graúdos, encontram-se na

Figura 4.

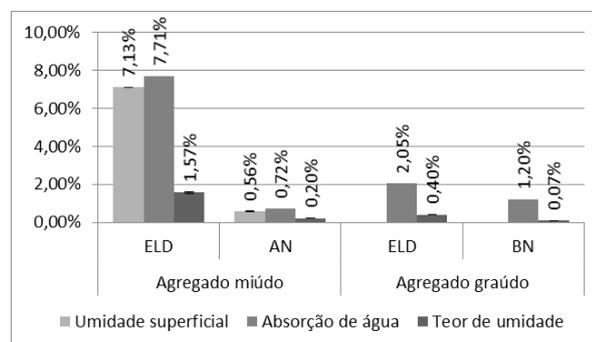


Figura 4: Umidade superficial, absorção de água e umidade

O agregado ELD apresenta maior umidade superficial e maior absorção de água que os agregados miúdos AN. A maior umidade superficial está relacionada a maior presença de finos e conseqüentemente maior área superficial da amostra. Adicionalmente, a maior absorção de água relaciona-se à higroscopicidade dos agregados ELD e, possivelmente, à morfologia dos grãos. O teor de umidade obtido ainda pode servir como parâmetro adicional a esta verificação.

A morfologia dos grãos dos agregados miúdos e graúdos ELD utilizados, apresentam-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

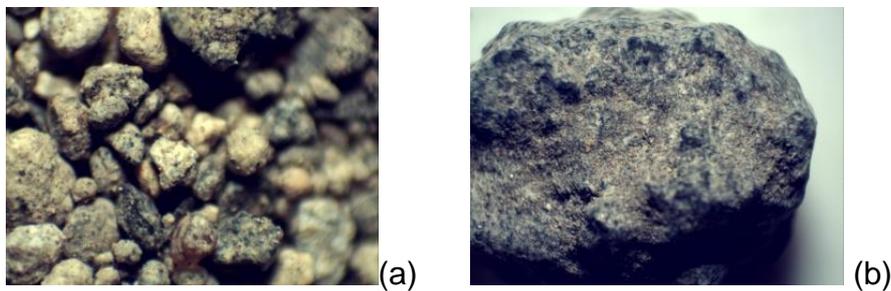


Figura 7: (a) Agregado miúdo ELD (45x) e (b) agregado graúdo ELD (15x)

Os agregados miúdos e graúdos ELD possuem maior superfície específica e maior opacidade, o que sugere maior rugosidade, como também se apresentam menos angulosos e mais volumétricos se comparados aos naturais. Características como textura, rugosidade e formas arredondadas dos grãos podem contribuir de forma positiva para o desempenho das argamassas que compõem os concretos de cimento Portland.

Os resultados obtidos para análise química por fluorescência de raios X das amostras de escória bruta (ELD_b) e da escória pós-processada (ELD_p) são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da escória

	ELD _b	ELD _p
CaO	40,1%	37,5%
Fe ₂ O ₃	37,6%	22,3%
SiO ₂	10,7%	26,1%
MnO	3,4%	2,4%
MgO	2,0%	-
Al ₂ O ₃	1,9%	6,8%
SO ₃	1,5%	2,7%

Cr₂O₃	1,2%	1,0%
TiO₂	-	0,5%

Observa-se que o pós-processamento é capaz de reduzir o teor de Fe^T, de CaO, MnO e MgO presentes nas amostras, aumentando, por outro lado, a concentração de sílica nos agregados ELD.

Propriedades dos concretos

A composição obtida para dosagem considerou fator a/c como parâmetro de referência, bem como as características físicas de cada um dos agregados (ELD e NAT). No entanto, para produção de traços idênticos no estado fresco, foram necessários ajustes nos fatores A/C, a fim de produzir concretos com mesmo SLUMP. Dessa forma, os fatores A/C reais foram ajustados, conforme a Tabela 3, a seguir.

Tabela 3: Composição dos traços em massa

	Cimento	Agregado miúdo	Agregado Graúdo	A/C	A/C real	Slump
ELD 20	1	2,05	2,66	0,55	0,65	7,5*
NAT 20	1	1,87	2,54	0,55	0,59	7,8*
ELD 40	1	1,04	1,68	0,36	0,46	8,0*
NAT 40	1	0,92	1,54	0,36	0,41	7,9*

*considera-se como intervalo de validade, valores para SLUMP (80=10) mm

Os concretos ELD produzidos, embora apresentassem teores de ar incorporado ligeiramente superiores, alcançaram maiores massas específicas em seu estado fresco. A incorporação de ar pode estar também relacionada à forma dos grãos, assim como a maior massa específica diretamente relacionada à composição química e às características físicas dos agregados ELD.

Os resultados para absorção de água e índice de vazios mostram que, como função direta do aumento do fator A/C para obtenção das mesmas propriedades no estado fresco, os concretos ELD apresentaram maior absorção de água que os concretos AN, para 20MPa e 40MPa. A mesma relação verifica-se para o índice de vazios. Esses dois parâmetros associados, podem indicar uma possível redução das propriedades mecânicas das dosagens em função do incremento do fator A/C¹⁴.

Os resultados para massa específica do concreto no estado endurecido indicam ser o concreto ELD mais denso que o concreto NAT e, embora a massa específica decresça com o aumento do teor de cimento, reduzem também a absorção de água e o índice de vazios. Essa observação está relacionada apenas com a redução da massa de agregados na dosagem.

Todos os concretos, ELD e NAT podem ser classificados como normais em relação à massa específica. Os resultados da caracterização no estado fresco são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4: Caracterização física do concreto

Propriedade		ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Estado fresco	Teor de ar incorporado (%)	2,8	2,4	2,7	2,2
	Massa específica (kg/m ³)	2653	2348	2598	2355
	Absorção de água (%)	7,53	6,17	5,50	3,74
Estado endurecido	Índice de vazios (%)	18,55	13,81	13,75	8,62
	Massa específica seca (g/cm ³)	2,46	2,24	2,47	2,29
	Massa específica saturada (g/cm ³)	2,65	2,38	2,62	2,39
	Massa específica real (g/cm ³)	3,02	2,60	2,91	2,53

Quanto as propriedades mecânicas, visto que os concretos foram produzidos com cimento CPV-ARI, observa-se aos 3 dias que as dosagens ELD 20 e ELD 40 apresentaram melhor desempenho mecânico na resistência à compressão, em torno de 20% superior ao concreto NAT 20. Para idades de 28 dias, não se verificaram diferenças. Embora dosagens ELD 20 e ELD 40 apresentassem maior fator A/C, maior absorção de água, maior índice de vazios, e maiores teores de ar incorporado, registra-se melhor desempenho para essas matrizes. Isso, devido aos grãos dos agregados ELD apresentarem-se mais volumétricos que os agregados AN, que por sua vez apresentam grãos predominantemente planos¹⁵.

As observações conduzidas para a resistência à compressão dos tratamentos ELD e NAT, apresentam-se para resistência à tração, de forma idêntica, proporcionalmente, e podem ser observadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentada a seguir.

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.:

Propriedades mecânicas do concreto

Propriedade	Idade	ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	31,10	25,68	41,55	40,88
	7 dias	34,04	30,38	45,39	44,27
	28 dias	35,43	34,67	49,12	47,45
Tração diametral (MPa)	3 dias	3,20	2,74	3,54	3,44
	7 dias	3,53	3,05	3,92	3,80
	28 dias	3,69	3,26	3,95	3,86

Os resultados para os módulos de elasticidade estático e dinâmico para os concretos ELD e NAT apresentam-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nota-se proporcionalidade entre as propriedades mecânicas e os valores obtidos para os módulos, e ainda uma boa proporcionalidade entre os valores obtidos para os módulos estático e dinâmico.

Os valores obtidos para os módulos de elasticidade refletem os achados registrados para características mecânicas e propriedades no estado endurecido, para os traços propostos, de forma coerente.

Tabela 6: Módulos de elasticidade

	ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Módulo de elasticidade estático (GPa)	27,87	26,70	31,03	31,06
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	40,45	35,63	42,34	36,84

CONCLUSÕES

O processamento da escória de aciaria através da retirada da fração metálica no imã de rolo se mostrou eficiente, como observado nos resultados de teor metálico e da fluorescência de raios X. Através do peneiramento, foi possível produzir agregados de escória granulometricamente parecidos aos agregados naturais, atendendo aos limites normativos.

O agregado de escória é mais denso que os agregados naturais e apresenta maior porosidade que o agregado natural, como indicam os resultados de umidade superficial, absorção de água, teor de umidade e as imagens estereoscópicas. O maior teor de material pulverulento presente na areia de escória, associado à sua maior porosidade contribuiu para o aumento da relação água/cimento necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada.

O dimensionamento das dosagens realizadas, com a utilização do software desenvolvido pelo grupo de pesquisa RECICLOS e adotando-se o método do ABCP, atingiu as resistências à compressão mínimas previstas aos 28 dias.

As análises físicas do concreto, mostraram que os concretos de escória apresentam maiores índices de vazios e absorção de água que os convencionais, em função da maior quantidade de água de amassamento

necessária para atingir a trabalhabilidade. Assim com os agregados, os concretos de escória são mais densos que os naturais.

Os ensaios mecânicos dos concretos, mostraram que para a classe C20, o concreto de escória alcançou melhores resultados nas primeiras idades que o concreto convencional, porém, aos 28 dias essa diferença se tornou não significativa. Para a classe C40, ambos tipos de concreto (ELD e NAT) apresentaram resultados próximos para todas as idades. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostraram que, para a classe C20, o concreto de escória possui melhor desempenho que o concreto convencional para todas as idades estudadas, já para a classe C40, os concretos apresentaram resultados próximos em todas as idades. Assim como os resultados de resistência à compressão, não houve diferença significativa para o módulo de elasticidade estático entre os concretos ELD e NAT. Os concretos ELD apresentaram maiores valores para o módulo de elasticidade dinâmico devido à maior densidade deste tipo de concreto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro concedido pela ARCELOMITTAL, agências brasileiras de pesquisa CAPES, CNPq e FAPEMIG, assim como a Fundação Gorceix e ao PROPEC - UFOP. Também agradecemos a infraestrutura e a colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos - RECICLOS – CNPq e ao NanoLAB/ RedeMat – UFOP.

REFERÊNCIAS

- 1 LAURIANO, L. A. **Como anda a gestão da sustentabilidade no setor da construção?** Disponível em <http://acervo.ci.fdc.org.br>, acessado 10/09/2016.
- 2 IABr (Instituto Aço Brasil). **Estatísticas**. Disponível em www.acobrasil.org.br/estatisticas.asp, acessado 10/09/2016.
- 3 ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- 4 _____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

- 5 _____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
- 6 _____. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- 7 _____. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.
- 8 _____. **NBR 9939: Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011.
- 9 _____. **NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 2011.
- 10 _____. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.
- 11 _____. **NBR 7211: Agregados para concreto.** Rio de Janeiro, 2009.
- 12 PEIXOTO, R. A. F.; PADULA, F. R. G. **Uso de escória de aciaria em ciclovia de pavimento rígido.** *Téchne*, v. 142, p. 58/1-62, 2009.
- 13 SOUZA, B. P.; TOFFOLO, R. M.; CHIBLI, P. A.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. F. **Aplicação de escória de aciaria como agregado em concreto para pavimentação.** In: 56º Congresso Brasileiro de Concreto, 2014, Natal.
- 14 NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Porto Alegre: Bookman. 2013. 472p.
- 15 METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON. 2014. 782p.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF STEEL SLAG POST- PROCESSED AS AGGREGATE FOR SUSTAINABLE CONCRETE

ABSTRACT

The concrete is the material most widely used in construction, consuming a large amount of natural resources for its production. Therefore, this work analyzes the technical and environmental aspects of concrete with full replacement of natural aggregates for processed LD steelmaking slag. The experimental program comprehends physical characterization - particle size

distribution, moisture content, bulk and specific density - and elemental chemical characterization with X-Ray Fluorescence, and mineralogical characterization via X-Ray Diffraction. Morphological characterization was performed through a stereomicroscope. From these results, concrete with compressive strengths of 20 and 40 Mpa were developed, with ABPC methodology. These were characterized in the fresh and hardened states, obtaining results favorable to the steelmaking slag application in Portland cement concrete. This sustainable concrete features properties similar conventional concrete, and contributing to sustainability of buildings.

Key-words: artificial aggregate, steel slag, concrete, steel waste, sustainability.