

# UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA DO PROCESSO LINZ-DONAWITZ COMO ADIÇÃO EM CIMENTOS

Adriana Guerra Gumieri<sup>1</sup>  
Denise Carpena Coitinho Dal Molin<sup>2</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>3</sup>

## Resumo

A reciclagem de resíduos siderúrgicos é uma alternativa de preservação do meio ambiente. Esse trabalho avalia a viabilidade técnica do uso de escória granulada de aciaria Linz-Donawitz como adição em cimentos. A escória sofreu, previamente, processo de granulação por resfriamento brusco. O uso da escória como substituição de clínquer na fabricação de cimento foi avaliada segundo a norma NBR 7215 – cimento portland – determinação da resistência à compressão. Os teores de substituição de clínquer por escória foram de 0%, 6%, 20% e 34%, em massa. O traço das argamassas adotado foi de 1:3, em massa, e a relação água/aglomerantes igual a 0,48. A resistência à compressão das argamassas foi avaliada para as idades de três, sete, 28 e 91 dias. As argamassas contendo clínquer e escória apresentaram níveis de resistência à compressão axial compatíveis com as especificações referentes ao cimento portland composto, apesar desses resultados serem inferiores aos obtidos para as argamassas de referência. A influência do teor de escória na resistência à compressão diminuiu com o aumento da idade das argamassas.

**Palavras-chave:** reciclagem de resíduos, escória de aciaria, cimento

## The Utilization of Blast Oxygen Furnance Slagas Mineral Admixture in Cement

### Abstract

The recycling of waste provides many environment benefits. This report evaluates the use of blast oxygen furnance slag as a mineral admixture in cement. Previously, the steel slag was granulated by quenching method. The behavior of granulated steel slag as mineral admixture in cement was investigated according to NBR 7215 brazilian standard. The contents of steel slag were defined as 0%, 6%, 20% and 34% of the clinker mass. The mixture proportion of mortars used were 1:3 (agglomerates:aggregates) and the water/agglomerates ratio was 0,48. The compressive strength of mortars was valued at 3, 7, 28 and 91 days. Results of the axial compression test indicate that the mortars with granulated slags are satisfactory relative to portland cement composite specifications containing blast-furnace slags. These results, however, are minor when compared to reference mortars. The results shown that the the influence of slag proportion at the compressive strength decreases when the age of mortars increases.

**Key-words:** wastes recycling, steel slag, cement.

## INTRODUÇÃO

Mundialmente, a produção de aço gera mais de 300 milhões de toneladas de resíduos, e as escórias correspondem a mais de 80% deste volume (HILTUNEN, 2000, p. 2). Anualmente, as escórias de aciaria LD representam 90 milhões de toneladas (VIKLUND-WHITE e YE, 1999, p. 338). Essas escórias apresentam características expansivas, tornando restrita sua aplicação em materiais de construção. A expansão é provocada pela hidratação do

CaO livre e do MgO não-reagido, pelo polimorfismo do silicato dicálcico, e pela oxidação e corrosão do ferro metálico presentes nas escórias (GOLDRING e JUCKES, 1997, p. 449). Essas escórias podem passar por tratamento que propicie a estabilização dos óxidos expansivos através de envelhecimento ou cura. Quando líquidas, podem ser tratadas alterando-se o processo de resfriamento, visando a estabilização da expansão e

<sup>1</sup>Professora Adjunta, Dep<sup>to</sup>. Engenharia de materiais e construção, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, adriana@demc.ufmg.br

<sup>2</sup>Professora Adjunta, Dep<sup>to</sup>. Engenharia Civil, Núcleo Orientado Para Inovação das Edificações, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dmolin@vortex.ufrgs.br

<sup>3</sup>Professor Adjunto, Dep<sup>to</sup>. Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Siderurgia, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, vilela@vortex.ufrgs.br

Tabela 1. Composição química da escória LD granulada

Óxidos	CaO	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	40,15	24,73	10,24	10,56	7,16	1,70	2,27	1,77	0,54	0,65

a melhoria de suas propriedades cimentícias. Uma opção para o emprego das escórias de aciaria, após o tratamento, é o uso como matéria-prima para cimentos Portland, diminuindo o consumo de matérias-primas e a energia gasta na obtenção do clínquer. Este trabalho tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica do uso de escória granulada de aciaria Linz-Donawitz como adição em cimentos.

Montgomery e Wang (1991, p. 1083) mencionam a possibilidade de estabilização da expansão das escórias de aciaria LD através do processo de granulação, no qual as mesmas apresentaram teores de CaO livre menores que as resfriadas lentamente. O MgO combina com FeO e MnO, formando solução sólida, não se apresentando na forma de periclásio, considerada instável.

No resfriamento brusco, normalmente as escórias siderúrgicas se solidificam na forma vítrea, apresentando estrutura amorfa, e são conhecidas como escórias granuladas. A composi-

ção química influencia na fluidez, exercendo influência sobre a vitrificação. As escórias LD são mais difíceis de solidificarem-se na forma vítrea devido à alta basicidade que apresentam, geralmente superior a 2 (GEISELER, 2000, p. 10), em relação às de menor basicidade, como as escórias de alto-forno (MOSTAFA *et al.*, 2001, p. 899). Malhotra e Mehta (1996, p. 169) citam que é complexa a relação entre o estado vítreo e a formação de produtos cimentícios, e em determinados materiais, os componentes SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem estar na forma cristalina. O grau de vitrificação de escórias de alto-forno usadas em cimentos deve ser no mínimo 67%. Segundo Hogan (1983, p. 71), esse valor geralmente é superior a 95%. O índice de refração varia entre 1,635 a 1,67 (LEA, 1970, p. 465) Murphy *et al.* (1997, p. 322) obtiveram picos cristalinos de baixa intensidade em DRX para escória de aciaria granulada, contendo índice de basicidade de 1,98.

Escórias de aciaria elétrica foram refundidas e granuladas por Masuero (2001, p. 157). As escórias, usadas em argamassas como substituição de cimento, apresetaram resistências similares às argamassas de referência. Murphy *et al.* (1997, p. 327) também analisaram o efeito da adição de escória de aciaria granulada ao cimento, sendo os melhores resultados obtidos para teor de adição de 10%. As escórias de aciaria resfriadas lentamente possuem limitadas propriedades cimentícias devido ao menor teor de C<sub>3</sub>S que apresentam em relação aos cimentos; devido aos silicatos apresentarem-se não-hidráulicos, e à presença de wustita como fase predominante (MURPHY *et al.*, 1997, p.316). Lea (1970, p. 460) cita que a hidráulidade das escórias cresce com a relação CaO/SiO<sub>2</sub> até um valor limite, pois o aumento do CaO aumenta o CaO não-dissolvido, elevando a viscosidade e dificultando a granulação. As propriedades hidráulicas crescem com o aumento da finura das escórias Hogan (1983, p. 75) e Dongxue *et al.* (1997, p. 983).

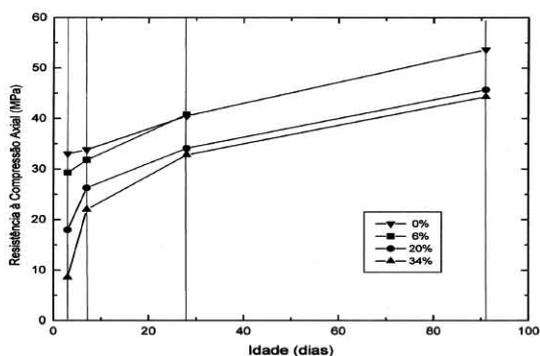


Figura 1. Resistência à compressão em função da idade dos corpos-de-prova

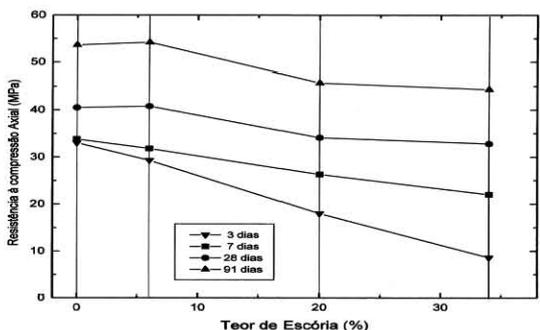


Figura 2. Resistência à compressão em função do teor de escória

## MATERIAIS E MÉTODOS

A granulação por resfriamento brusco da escória de aciaria LD foi realizada em uma usina siderúrgica, tendo como objetivo a estabilização da expansibilidade e a melhoria das características e propriedades da escória, visando sua utilização como adição em cimentos. A escória líquida foi vazada do conversor LD para o pote de escória e o mesmo foi conduzido ao pátio de resfriamento. Em seguida, o pote de escória foi deslocado para próximo à uma caçamba, com capacidade de 5m<sup>3</sup>, contendo água, e procedeu-se o vazamento de uma quantidade de escória líquida na mesma. O pote foi deslocado para a área de resfriamento lento do pátio e o restante da escória líquida foi vazada nesse local. Após a granulação, procedeu-se o vazamento da água da caçamba e a retirada da escória da mesma. A amostra foi levada ao laboratório para análise.

Tabela 2. Resistência à compressão axial de argamassas de escória granulada

Teor de 0% de escória								
Parâmetros avaliados	3 dias	3 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
	Carga (KN)	Tensão (MPa)						
no desvio relativo	66,15	33,7	65,40	33,3	76,50	39,0	109,0	55,5
	61,25	31,2	69,80	35,6	79,10	40,3	91,1	46,4 •
	55,15	28,1 •	63,70	32,5	82,65	42,1	99,1	50,5
	66,70	34,0	56,50	28,8 •	96,40	49,1 •	107,5	54,8
M (MPa)		31,8		32,6		42,6		51,8
DRM (%)		11,6		11,7		15,3		10,4
NM (MPa)		33,0		33,8		40,5		53,6
NDRM (%)		5,5		5,3		4,0		5,8

Teor de 6% de escória								
Parâmetros avaliados	3 dias	3 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
	Carga (KN)	Tensão (MPa)						
no desvio relativo	55,15	28,1	66,0	33,6	79,35	40,4	101,6	51,8
	59,30	30,2	60,65	30,9	78,40	39,9	78,9	40,2 •
	58,05	29,6	63,55	32,4	82,90	42,2	113,0	57,5
	45,95	23,4 •	59,40	30,3	97,50	49,7 •	104,7	53,3
M (MPa)		27,8		31,8		43,1		50,7
DRM (%)		15,8		5,7		15,3		20,7
NM (MPa)		29,3				40,8		54,2
NDRM (%)		4,1				3,4		6,0

Teor de 20% de escória								
Parâmetros avaliados	3 dias	3 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
	Carga (KN)	Tensão (MPa)						
no desvio relativo	34,55	17,6	50,30	25,6	64,15	32,7	86,0	43,8
	36,20	18,4	51,05	26,0	68,50	34,9	93,9	47,8
	35,45	18,1	53,15	27,1	83,30	42,4 •	89,7	45,7
	34,80	17,7	51,80	26,4	67,95	34,6	89,5	45,6
M (MPa)		18,0		26,3		36,2		45,7
DRM (%)		2,2		3,0		17,1		4,6
NM (MPa)						34,1		
NDRM (%)						4,1		

Teor de 34% de escória								
Parâmetros avaliados	3 dias	3 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	91 dias	91 dias
	Carga (KN)	Tensão (MPa)						
no desvio relativo	17,30	8,8	44,05	22,4	51,05	26,0 •	89,8	45,8
	16,75	8,5	42,05	21,4	63,25	32,2	86,8	44,2
	19,55	10,0	44,90	22,9	66,20	33,7	84,2	42,9
	16,50	8,4	42,05	21,4	63,70	32,5	72,1	36,7 •
M (MPa)		8,9		22,0		31,1		42,4
DRM (%)		12,4		4,1		16,4		13,4
NM (MPa)		8,6				32,8		44,3
NDRM (%)		2,3				2,9		3,4

A massa específica da escória granulada foi determinada pela NBR 6474 (1984) – cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Sua composição química foi obtida por fluorescência de raios-X. O teor de CaO livre total foi obtido pelo método da NBR 7227 (1989) – cimento portland - determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol; e o teor de CaO referente ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  da escória foi obtido por análises térmicas. As fases mineralógicas foram obtidas por difração de raios-X. O grau de vitrificação foi determinado segundo o método *Mac Master*, por microscopia óptica de luz transmitida e o índice de refração foi determinado sob microscópio polarizador de luz transmitida.

A expansão da escória granulada foi avaliada segundo a NBR 11582 (1991) – cimento portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier. As pastas foram compostas por 70%, em massa, de escória passante na peneira 75 $\mu\text{m}$ , e 30% de cimento CPIS-32. Essa proporção foi escolhida utilizando um teor mínimo de cimento possível que garantisse a moldagem dos corpos-de-prova. A relação água/aglomerante da pasta com escória e cimento foi de 0,23 e para a pasta com somente cimento foi de 0,32, e foram determinadas de acordo com a NBR 11580

(1991) – cimento portland – determinação da água de pasta de consistência normal.

O uso da escória de aciaria granulada como substituição de clínquer para cimento foi avaliado pelo desempenho mecânico de argamassas, conforme a NBR 7215 (1996) – cimento portland – determinação da resistência à compressão. Empregou-se clínquer de cimento portland e gesso, já misturados previamente pelo fabricante, em proporções usuais na fabricação de cimentos. A superfície específica do clínquer mais gesso é de 4,357 m<sup>2</sup>/g e da escória granulada é de 4,460 m<sup>2</sup>/g. O diâmetro médio da escória foi de 10mm. Os teores de substituição de clínquer por escória foram de 0%, 6%, 20% e 34%, em massa. Os teores de 6% e de 34% foram adotados considerando os limites mínimo e máximo, respectivamente, conforme as prescrições da NBR 11578 (1991) – cimento portland composto, estabelecidas para as escórias de alto-forno usadas na fabricação do cimento CPII-E. O teor de substituição de 20% foi considerado como sendo um teor médio entre estes dois limites. Os corpos-de-prova foram rompidos nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra a composição química da amostra.

A massa específica da escória granulada e moída é igual a 3,72g/cm<sup>3</sup>. Este elevado valor está relacionado às partículas de ferro ainda presentes na escória após a granulação. O índice de basicidade (CaO/SiO<sub>2</sub>) da escória é igual a 3,92. O CaO livre total foi de 1,40%, sendo considerado baixo em relação aos das escórias LD de resfriamento lento. O CaO livre devido à dehidroxilação do Ca(OH)<sub>2</sub>, obtido nas análises térmicas, foi igual a 0,31%. Dessa forma, o CaO livre não-hidratado é igual a 1,09%. Nos ensaios de expansibilidade não foram detectadas aberturas das agulhas Le Chatelier. A norma NBR 11582 prescreve o valor máximo de 5mm de abertura das agulhas Le Chatelier após o ensaio. Segundo Lea (1970, p. 369), a expansão nos cimentos é danosa quando o CaO livre não-hidratado excede a 2%. Os resultados indicam que, no caso dessa escória ser empregada em cimentos, problemas de expansão não ocorreriam.

Apesar da granulação, a escória apresentou picos cristalinos na difração de raios-X, sendo os

Tabela 3. Análise de variância

Fator	GDL	MQ	F calculado	Significância
Teor de escória	3	529,644	251,246	DS
Idade	3	1833,527	869,766	DS
Teor de escória x idade	9	35,604	16,889	DS
Erro	38	2,1081		
Total	53			

GDL = grau de liberdade; MQ = médias quadradas; DS = diferença significativa.

compostos encontrados: silicato dicálcico na forma de bredigita  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S; silicato tricálcico C<sub>3</sub>S; silicato de cálcio e manganês Mn<sub>0,8</sub>Ca<sub>0,2</sub>SiO<sub>3</sub>; óxido de cálcio e ferro na forma de ferrita dicálcica 2CaO.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; óxido de ferro e magnésio Mg<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O; óxido de cálcio, magnésio e ferro Ca<sub>2</sub>MgFe<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; ferro metálico Fe<sup>0</sup>. O C<sub>3</sub>S, considerado como o principal responsável pelas propriedades cimentícias, e o  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S, que apresenta moderadas propriedades cimentícias, foram detectados. Já o  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, considerado como metaestável, não foi encontrado. O MgO na forma de periclásio, mais propício à expansão, não foi detectado, e o FeO não mais se apresentou na forma de wustita pura, mas na forma de óxidos de ferro e magnésio. O grau de vitrificação foi de 82%, sendo este valor inferior a 95%, geralmente obtido para as escórias de alto-forno. No entanto, a escória LD granulada atende ao valor mínimo de 67% para cimentos. O índice de refração da escória granulada é de 1,65, estando dentro da faixa de 1,635 e 1,67, usual para as escórias de alto-forno vítreas.

Os resultados da resistência à compressão axial das argamassas com a substituição de clínquer por escória granulada estão descritos na Tabela 2. Esses resultados estão na forma de gráficos que avaliam o comportamento da resistência à compressão com a idade dos corpos-de-prova (Figura 1), e com o teor de escória (Figura 2). Foi realizada uma análise de variância desses resultados para comparar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, ou seja, o teor de escória utilizado e a idade dos corpos-de-prova de argamassa, bem como a interação entre essas variáveis, conforme a Tabela 3, para um nível de confiabilidade de 95%.

A Tabela 3 mostra que tanto o teor de escória quanto a idade dos corpos-de-prova apresentam influência significativa na resistência das argamassas, assim como existe uma interação entre essas duas variáveis. Observa-se que as argamassas com 6% de substituição atingiram os mesmos níveis de resistência que as argamassas de referência para as idades de 28 e 91 dias (Tabela 2, Figura 1). Para 20% de substituição, houve redução de 15,8% e 14,7%, nas idades de 28 e 91 dias, respectivamente. No teor de 34% a resistência reduziu 19,0% e 17,4% aos 28 e 91 dias, respectivamente. Apesar da redução da resistência, no geral, as argamassas atingiram as resistências mínimas, especificadas pela NBR 11578 para o cimento portland composto, atingindo o mínima de 10 MPa, 20 MPa e 32 MPa para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. A influência do teor de escória na resistência diminui com o aumento da idade das argamassas, sendo o crescimento mais lento para argamassas com maiores teores de escória (Tabela 2, Figura 2). Esses resultados estão relacionados à

composição química da escória, cujo teor de CaO presente na amostra contribui, em maior parte, para a formação da fase  $C_2S$  em relação à fase  $C_3S$ . O aumento de resistência nas idades mais avançadas está relacionado à lenta hidratação do  $C_2S$  e à reação cimentante que ocorrem mais lentamente na escória.

As argamassas foram moldadas com a relação água/aglomerante fixa em 0,48, conforme a NBR 7215. Na moldagem ocorreu um aumento da consistência das argamassas com o aumento do teor de escória, relacionado à elevada massa específica da escória, proporcionando menor quantidade de grãos dessa para uma

mesma relação água/aglomerante. Conseqüentemente, a menor superfície de molhagem destes grãos conferiu às argamassas maior quantidade de água livre, aumentando sua consistência. Uma alternativa para melhorar as resistências das argamassas com escória seria adotar a substituição do clínquer por escória em volume e não em massa, como recomenda a norma, considerando a diferença entre as massas específicas do cimento e da escória.

## CONCLUSÕES

Em síntese, pode-se dizer que a granulação proporcionou a estabilização da escória de aciaria LD quanto ao fenômeno da expansão e favoreceu o desenvolvimento da atividade cimentante da mesma. Apesar da redução das resistências mecânicas das argamassas com substituição de clínquer por escória granulada, as mesmas atingiram as resistências mínimas, especificadas para o cimento portland composto. Portanto, a utilização das escórias LD granuladas, como substituição de clínquer de cimento, apresenta-se como alternativa viável.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo apoio financeiro desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HILTUNEN, A. The influence of chemical and physical properties on the utilization of slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6, 2000, Stockholm. **Anais...** Stockholm: SKJ Rautaruukki Group, 2000. ICD.
2. VIKLUND-WHITE, C.; YE, G. Utilization and treatment of steelmaking slags. In: REWAS'99 – GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999. San Sebastián. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society, 1999. v.1, p. 337-345.
3. GOLDRING, D.C.; JUCKES, L.M. Petrology and stability of steel slags. **Ironmaking and Steelmaking**, London, v. 24, n. 6, p. 447-456, 1997.
4. MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Instant-chilled steel slag aggregate in concrete – strength related properties. **Cement and Concrete Research**, New York, v. 21, n. 6, p. 1083-1091, 1991.
5. GEISELER, J. Slag: approved materials for a better future. In: SCHRIFTENREIHE DER FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT EISENHÜTTENSCHLACKEN. **Iron and steel slags: properties and utilization: reports from 1972-2000**. Duisburg: FehS, 2000. p.9-23.
6. MOSTAFA, N.Y.; EL-HEMALY, S.A.S.; AL-WAKEEL, E.I.; EL-KORASHY, S.A. Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag. **Cement and Concrete Research**, New York, v.31, p.899-904, 2001.
7. MALHOTRA V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolan and cementitious materials**. Amsterdam: Taylor & Francis, 1996. 191p. (Advances in concrete technology, v. 1)
8. HOGAN, J. Study of grinding energy required for pelletized and water granulated slags. **Silicates Industriels**, Paris, n. 3, p. 71-78, 1983.
9. LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. London: Edward Arnold, 1970.

10. MURPHY, J.N.; MEADOWCROFT, T.R.; BARR, P.V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian Metallurgical Quartely**, Canada, v. 36, n. 5, p. 315-331, 1997.
11. MASUERO A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
12. DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W.; MINGSHU, T. Durability study of steel slag cement. **Cement and Concrete Research**, New York, v. 27, n.7, p. 983-987, 1997.