



**Guilherme Demberg Vaz**

**Quantificação das Perdas de Ferro Metálico em Escórias  
de Forno Elétrico a Arco**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Roberto R. de Avillez  
Co-Orientador: Prof. Raimundo Augusto Ferro de Oliveira Fortes

Rio de Janeiro  
Abril de 2011



**Guilherme Demberg Vaz**

**Quantificação das Perdas de Ferro Metálico em Escórias  
de Forno Elétrico a Arco**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Roberto Ribeiro de Avillez**

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Raimundo Augusto Ferro de Oliveira Fortes**

Co-Orientador

Gerda Cosigua

**Prof. Francisco José Moura**

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. André Luiz Vasconcellos Costa e Silva**

Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear - IBQN

**Prof. Jose Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de abril de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Guilherme Demberg Vaz**

Graduou-se em Engenharia de Metalúrgicas na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2008. Atuou, durante o desenvolvimento de seu trabalho de mestrado, no processamento de escórias de fornos de aciarias elétricas. Trabalha no ramo de siderurgia desde 2010.

#### Ficha Catalográfica

Vaz, Guilherme Demberg

Quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco / Guilherme Demberg Vaz; orientador: Roberto Ribeiro de Avillez. – PUC, Departamento de Engenharia de Materiais, 2011.2011.

105 f. :il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2011.

Inclui referências bibliográficas.

1. 1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Metalurgia. 3. Siderurgia. 4. Forno elétrico a arco escória. 5. Beneficiamento da escória. 6. Teor de ferro metálico da escória. 7. Rendimento metálico. I. Avillez, Roberto R. de. II. Fortes, Raimundo Augusto F. O. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Dedico esta tese à minha família, em especial a memória de meu Pai Jair Vaz, que durante sua vida me orientou e me deu todo o seu amor. Falar sobre o meu pai é lembrar de muitos momentos alegres. Cara durão que ao receber um abraço se desmanchava em lágrimas. Não só o mestrado mais tudo durante toda a minha vida será dedicado à ele. Espero ser para o meu filho a mesma referência de pai que ele é para mim. Pois a dor da saudade nada mais é do que a quantificação da falta que ele me faz. Eu te amo muito meu querido pai.

## Agradecimentos

Esta dissertação só foi concluída, pois contou com o apoio de muitas pessoas que me motivaram nos momentos difíceis e se dedicaram em me ajudar nas tomadas de decisões e na orientação para a obtenção dos objetivos.

Como fonte de motivação, cito a minha família em especial a minha esposa Erika, minha mãe Sandra, meu irmão Gustavo, meu Sogro Jayme, minha sogra Margaret, minha cunhada Fernanda e o meu cunhado Bernardo.

Como fonte de conhecimento os meus orientadores o professor Roberto R. de Avillez, o engenheiro Raimundo Augusto Ferro de Oliveira Fortes e o sempre atuante e imprescindível o engenheiro Mauricio Waineraich Scal.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À equipe do CETEM que trabalhou diretamente no processamento das amostras em especial ao Marcelo Andrade e ao Wagner.

À Telma do laboratório da USIBA que se empenhou ao máximo para realizar as análises químicas com qualidade e em tempo hábil para a conclusão dos experimentos.

Aos meus companheiros de trabalho que me ajudaram desde o início.

A Deus que colocou todas estas pessoas em meu caminho permitindo tornar o que era sonho realidade.

## Resumo

Vaz, Guilherme Demberg; De Avillez, Roberto Ribeiro. **Quantificação das Perdas de Ferro Metálico em Escórias de Forno Elétrico a Arco**. Rio de Janeiro, 2011. 105p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A metalurgia é a ciência que estuda os diversos meios para a transformação dos metais em materiais úteis à sociedade. A metalurgia do ferro representa a maior fatia da aplicação dos metais. Por ser tão representativa é chamada de Siderurgia. Dentre as diversas rotas para a transformação do ferro em aço, as usinas semi-integradas apresentam um forte apelo ecológico, pois utilizam a sucata, oriunda da reciclagem de ferro, e o ferro gusa como matérias-primas para a fusão no Forno Elétrico a Arco. Naturalmente, em todo processo industrial há a geração de resíduos e, neste caso, o principal é a escória, composta de óxidos formados e adicionados ao longo da fusão. Seus principais constituintes são:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ . No entanto, ainda há a presença de Ferro Metálico, um fato indesejável, pois atua negativamente no rendimento metálico e, conseqüentemente, aumenta o custo do aço. Toda escória gerada é beneficiada com o intuito de recuperar a parte metálica. Este material beneficiado retorna para as usinas como sucata metálica, contendo teores definidos de ferro metálico. O teor de ferro presente na sucata recuperada é avaliado pelas empresas processadoras de escória de maneira indireta por um ensaio de densidade específica. Havia dúvidas se a sucata recuperada da escória do forno apresentava teores de ferro que justificasse seu emprego como matéria-prima ferrosa. Assim sendo, foi proposta uma rota de processamento capaz de mensurar o teor de ferro presente e permitir a comparação com os teores obtidos com o ensaio de densidade. Os resultados mostram que i) é possível calcular o impacto no rendimento, ii) que as sucatas recuperadas apresentam valores inferiores ao esperado, iii) que a equação de densidade superestima o teor de ferro e iv) que modificações propostas nos coeficientes da equação vigente melhoram seu grau de assertividade. Estes resultados foram comprovados em 3 plantas siderúrgicas.

## Palavras-chave

Metalurgia; Siderurgia; Forno Elétrico a Arco Escória; Beneficiamento da Escória; Teor de Ferro metálico da escória; Rendimento metálico.

## Abstract

Vaz, Guilherme Demberg; De Avillez, Roberto Ribeiro (Advisor).

**Quantification of Metallic Iron Losses in Electric Arc Furnace Slags.**

Rio de Janeiro, 2011. 105p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Metallurgy is the science that studies the various processes for the transformation of metals into society useful materials. The iron metallurgy represents the largest body of the metals application, hence it is called Steel industry. Among the various routes for the transformation of iron into steel, semi-integrated plants have a strong ecological appeal due to their extensive use of scrap, derived from the recycling of iron, and pig iron as raw materials for the Electric Arc Furnace. Of course, industrial processes generate waste. The major waste of the Electric Arc Furnace is the slag, a mixture of oxides produced during the process, containing CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO, MnO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. However, there is also the presence of metallic iron, a fact undesirable, because it acts negatively on the metallic yield and therefore increases the cost of steel. All slag generated is processed in order to recover the metallic iron. The slag beneficiation returns to the mills a material containing defined levels of iron. The content of recovered iron is assessed by slag processing companies indirectly by a specific gravity test. There have been doubts whether the recovered scrap iron content justify its use as raw ferrous materials. Therefore, it is proposed a processing route capable of measuring the amount of iron present in the recovered scrap. The measured iron content is also compared with the levels obtained from the test density. The results show that i) it is possible to calculate the impact on iron yield, ii) the recovered iron content is lower than expected, iii) the density equation overestimates the amount of iron and iv) a correction is proposed to improve the assertiveness of the density equation. Three steel plants confirmed the results from this research.

## Keywords

Metallurgy; Steel industry; Slag; Electric Arc Furnace; slag processing; metallic iron content of slag; iron yield.

## Sumário

1	Introdução	17
2	Revisão Bibliográfica	19
2.1	Produção do Aço	19
2.2	Escória	27
2.3	Beneficiamento da Escória	35
3	Método Experimental	41
3.1	Liberação do Ferro Metálico	41
3.1.1	Método 1 – Separação Magnética	41
3.1.2	Método 2 – Separação por Cominuição	45
3.1.3	Metodologia Empregada	55
3.2	Outros Métodos Experimentais	62
3.2.1	Análise Química	62
4	Resultados e Discussões	63
4.1	Resultados e discussões Forno 1	63
4.2	Resultados e discussões Forno 2	74
4.3	Resultados e discussões Forno 3	78
5	Conclusões	84
6	Referências Bibliográficas	85
	Apêndice I	87
	Apêndice II	88
	Apêndice III	92



## Lista de Figuras

Figura 1. Fluxo de produção de aço via Usina Integrada e Semi-Integrada. [1]	20
Figura 2. Evolução tecnológica do FEA ao longo da sua história. [3]	23
Figura 3. Instalações de uma típica Aciaria com FEA e seus principais equipamentos auxiliares: Cestão, Pote de escória, Panela, Ponte rolante e sistema de despoeiramento [4].	24
Figura 4. Etapas do processo de fusão e refino primário no FEA [5].	25
Figura 5. Desenho 3D de um típico FEA e sua vista superior.	26
Figura 6. Layout químico do forno. A área em vermelho é conhecida como área quente do forno devido à proximidade com os eletrodos.	27
Figura 7. Diagrama esquemático do fluxo de emulsão.[7]	30
Figura 8. Formação de um filme na bolha gasosa. [8]	31
Figura 9. Posicionamento da lança dentro do banho.	32
Figura 10. Desenho esquemático dos possíveis casos de reações do óxido de ferro com fontes de carbono. [11]	33
Figura 11. Diagrama esquemático da redução do FeO contido na escória pelo carbono dissolvido no banho Fe-C e pelo carbono sólido. [12]	34
Figura 12. Processo de boleamento da escória na planta de recuperação.	36
Figura 13. Desenho esquemático da Planta de beneficiamento de escória para a recuperação de ferro metálico no Modelo 1.	37
Figura 14. Desenho esquemático da planta de beneficiamento de escória para a recuperação de ferro metálico Modelo 2.	38
Figura 15. Gráfico que correlaciona densidade da escória com o percentual em massa do Óxido de Ferro.[13]	40
Figura 16. Separador magnético de rolo induzido, RE-ROLL.	42
Figura 17. Separador magnético de carrossel CF-5.	42
Figura 18. Separador magnético de tambor rotativo.	43

Figura 19. Imagem do britador de mandíbula da primeira etapa de cominuição.	45
Figura 20. Vista lateral e superior do britador de mandíbula da segunda etapa.	46
Figura 21. Peneira de 19mm e calha.	47
Figura 22. À esquerda Ferro Metálico que ficou retido na peneira (P2) e à direita o material passante que ainda possui Ferro Metálico, em granulometrias menores que a peneira, e escória (P3).	47
Figura 23. Vista frontal e superior do Britador de Rolos.	48
Figura 24. Na Figura à parte metálica retida (P5) e à direita parte metálica e escória com granulometria inferior à 14mm(P6).	49
Figura 25. À esquerda Ferro metálico retido na peneira de 9,6 mm e à direita material passante.	50
Figura 26. Foto da operação do moinho de barras.	51
Figura 27. Produtos da moagem com bolas e barras após um mesmo tempo de processamento.	51
Figura 28. Homogeneização em pilha à esquerda e plana à direita.	52
Figura 29. Curva de moagem para uma amostra de 1.500g.	53
Figura 30. Fluxo de Processamento para os produtos e co-produtos do beneficiamento da escória.	54
Figura 31. Dados de identificação da amostra nos barris e na etiqueta.	58
Figura 32. Barris com as amostras de Recuperada e Agregado sendo enviadas para o CETEM.	59
Figura 33. Homogeneizador em “Y”.	60
Figura 34. Fluxograma empregado em todas as amostras processadas no CETEM.	61
Figura 35. Balanço de massa da planta de beneficiamento de Escória do Forno 1.	64
Figura 36. Sucata Recuperada $d > 5"$ não boleada antes da primeira etapa de britagem.	66
Figura 37. Sucata Recuperada $2,5" < d < 5"$ antes do processamento no CETEM.	66

Figura 38. Amostras de material metálico da Recuperada 2,5”<d<5” removidos na etapa de catação manual.	67
Figura 39. Histórico dos testes de metalização realizados pela empresa terceirizada nas amostras de Recuperada 2,5”<d<5” do forno 1.	68
Figura 40. Histórico dos testes de metalização realizados pela empresa terceirizada nas amostras de Recuperada 0,5”<d<2,5”.	68
Figura 41. Sucata Recuperada 0,5”<d<2,5” durante a etapa de catação manual.	71
Figura 42. Agregado 0,5”<d<2,5” antes de passar no Britador de Mandíbulas.	72

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Resultados compilados do teste de separação magnética a seco e a úmido.	43
Tabela 2. Resultados compilados do teste de separação magnética com tambor rotativo.	44
Tabela 3. Resultado do peneiramento 2.	47
Tabela 4. Avaliação da perda de amostra durante a etapa de britagem com rolos.	48
Tabela 5. Resultado do peneiramento em tela de 14mm.	49
Tabela 6. Avaliação da perda amostral durante a segunda etapa de britagem com rolos.	49
Tabela 7. Resultado do peneiramento em tela de 9,6mm.	50
Tabela 8. Curva de moagem para determinação do tempo de processamento.	52
Tabela 9. Resultado da moagem após remoção de material passante.	53
Tabela 10. Plano de atividades para a realização do processamento.	55
Tabela 11. Resumo da Recuperação de escória do Forno 1 e as quantidades enviadas para o CETEM.	64
Tabela 12. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 1.	65
Tabela 13. Teste da equação 1 comparando as premissas iniciais com o novo método proposto e o obtido nos experimentos nas sucatas Recuperadas $2,5'' < d < 5''$ e $0,5'' < d < 2,5''$ .	69
Tabela 14. Teste da equação 1 utilizando as premissas empregadas pela empresa terceirizada e o novo método proposto em 4 novas amostras.	70
Tabela 15. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico.	72
Tabela 16. Quantificação da perda metálica na forma de $Fe^{2+}$ .	73
Tabela 17. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 2.	74
Tabela 18. Percentual gerado de co-produtos no beneficiamento da	

escória do Forno 2.	76
Tabela 19. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico.	76
Tabela 20. Estimativa da perda de ferro na forma de ferro metálico baseado na análise da escória In natura.	77
Tabela 21. Quantificação da perda metálica na forma de $Fe^{2+}$ .	77
Tabela 22. Estimativa da perda de ferro na forma de $Fe^{2+}$ baseado na análise da escória In natura.	78
Tabela 23. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 3.	79
Tabela 24. Percentual gerado de co-produtos no beneficiamento da escória do Forno 3.	79
Tabela 25. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico do forno 3.	80
Tabela 26. Estimativa da perda de ferro na forma de Ferro metálico baseado na análise da escória In natura do forno 3.	81
Tabela 27. Quantificação da perda metálica na forma de $Fe^{2+}$ do forno 3.	81
Tabela 28. Estimativa da perda de ferro na forma de $Fe^{2+}$ baseado na análise da escória In natura do forno 3.	81
Tabela 29. Comparativo entre os fornos dos materiais que retornam como metálico recuperado para reemprego no forno.	82
Tabela 30. Comparativo entre os fornos dos agregados gerados no beneficiamento da escória.	83
Tabela 31. Tabela comparativa das perdas no rendimento entre os fornos.	83
Tabela 32. Separação magnética a seco no rolo induzido com amostra da Usina 2.	88
Tabela 33. Separação magnética a seco no rolo induzido com amostra da Usina 1.	88
Tabela 34. Resultados no separador magnético a úmido das amostras -14 malhas da usina 2.	88
Tabela 35. Resultados no separador magnético a úmido das amostras -35 malhas da usina 2.	89

Tabela 36. Resultados no separador magnético a úmido (CF5) das amostras -14 malhas da usina 1.	89
Tabela 37. Resultados no separador magnético a úmido (CF5) das amostras -35 malhas da usina 1.	89
Tabela 38. Separação magnética no tambor rotativo na faixa de -1/2 a +4 da usina 2.	90
Tabela 39. Separação magnética no tambor rotativo na faixa de -4 a +8 da usina 2.	90
Tabela 40. Separação magnética no tambor rotativo na faixa de -8 a +14 da usina 2.	90
Tabela 41. Separação magnética no tambor rotativo na faixa de -8 a +14 da usina 2.	91
Tabela 42. Tabela de compilação dos resultados do processamento das amostras no CETEM.	92
Tabela 43. Resultados obtidos no processamento das amostras de Recuperada $d > 5''$ não boleada forno 1.	96
Tabela 44. Resultados obtidos no processamento das amostras de Recuperada $2,5'' < d < 5''$ forno 1.	96
Tabela 45. Resultados obtidos no processamento das amostras de Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$ forno 1.	96
Tabela 46. Resultados obtidos no processamento das amostras de Agregado $0,5'' < d < 2,5''$ forno 1.	97
Tabela 47. Resultados obtidos no processamento das amostras de Agregado $d < 0,5''$ forno 1.	97
Tabela 48. Resultados obtidos no processamento das amostras da escória In natura do forno 2.	98
Tabela 49. Resultados obtidos no processamento das amostras da Recuperada $d > 5''$ do forno 2.	98
Tabela 50. Resultados obtidos no processamento das amostras da Recuperada $2'' < d < 5''$ do forno 2.	98
Tabela 51. Resultados obtidos no processamento das amostras da Recuperada $1'' < d < 5''$ do forno 2.	99
Tabela 52. Resultados obtidos no processamento das amostras do	

Agregado 1" < d < 2" do forno 2.	99
Tabela 53. Resultados obtidos no processamento das amostras do Agregado d < 1".	100
Tabela 54. Resultado obtido do processamento da escória In natura do forno 3.	100
Tabela 55. Resultado obtido do processamento da Recuperada d > 5" do Forno 3.	101
Tabela 56. Resultado obtido do processamento da Recuperada 1" < d < 5" do forno 3.	101
Tabela 57. Resultados obtidos do processamento do Agregado 1" < d < 2" do forno 3.	102
Tabela 58. Resultado obtido do processamento do Agregado d < 1" do Forno 3.	102

## Lista de Símbolos

$W_t$	Concentração em massa	[%]
$Fe^0$	Ferro metálico em massa	[%]
$Fe_xO_y$	Ferro na forma de óxidos	[%]
$Fe_T$	Ferro Total ( $\% wtFeT = \% wtFe^0 + \% wtFe_xO_y$ )	[%]
$n_u$	Número de unidades industriais aonde as amostras serão coletadas	[-]
$n_c$	Número de condições operacionais no processo do FEA	[-]
$n_{CoP}$	Número de co-produtos (escória in natura e seus derivados pós-processamento)	[-]
$n_R$	Número de repetições de análises químicas	[-]
$n_A$	Número de amostras para cominuição	[-]
$n_{AQ}$	Número de amostras para análise	[-]
$C_0$	Condição operacional típica da unidade	[-]
$C_{BC}$	Condição operacional forçada para baixo carbono	[-]
$C_{MC}$	Condição operacional forçada para médio carbono	[-]