

4 Resultados e Discussões

Foram propostos 2 (dois) métodos de amostragem em três usinas siderúrgicas diferentes. O primeiro método seria obtido acompanhando desde a geração da escória no forno, passando pelo processamento na planta de recuperação até o seu reingresso na usina na forma de sucata recuperada. Já no outro, compostos por duas usinas, seriam analisados apenas os produtos e co-produtos gerados no processamento da escória (recuperadas ou processadas e agregados).

De acordo com o fluxograma de processamento da Figura 38 foi possível criar uma Tabela genérica para a concatenação dos resultados de cada amostra. Esta Tabela, presente no Anexo III, separa o produto gerado em cada etapa do processo para facilitar a compreensão. Todas as variáveis da tabela foram enumeradas de “X” a “X³⁶”. Esta tabela foi utilizada como base para a obtenção dos resultados de todas as amostras processadas e suas informações serão empregadas nas tabelas 12, 17 e 23.

4.1 Resultados e discussões Forno 1

Para a coleta das amostras referentes ao Forno 1 foi realizada uma corrida onde os parâmetros de processo foram acompanhados. Para esta corrida, a primeira etapa consistiu na preparação da carga fria que seria empregada no forno. Foi utilizada a Planilha de Carga Fria (PCF) que estava em uso e que apresentava um mix de sucata compatível com o cotidiano.

Com o final da corrida toda a escória gerada foi recolhida e enviada para a planta de recuperação onde foi beneficiada. É importante frisar que tanto a baía onde a escória é armazenada ao longo da corrida quanto a baía de resfriamento não possui pavimentação. Com isso, poderia haver uma pequena variação na quantidade de escória gerada. No entanto, para diminuir esta probabilidade foi solicitado que as duas baias estivessem com o mínimo de material possível. A quantidade total de escória recolhida após a corrida foi de 15.609 kg. Toda a

escória foi beneficiada na planta, seguindo o fluxograma, com o balanço de massa, apresentado na Figura 35 e na Tabela 11.

Conforme a Tabela 11 a grande parte do produto gerado do beneficiamento da escória é composta de Agregado $0,5'' < d < 2,5''$ e Agregado $d < 0,5''$, totalizando mais de 95,5%.

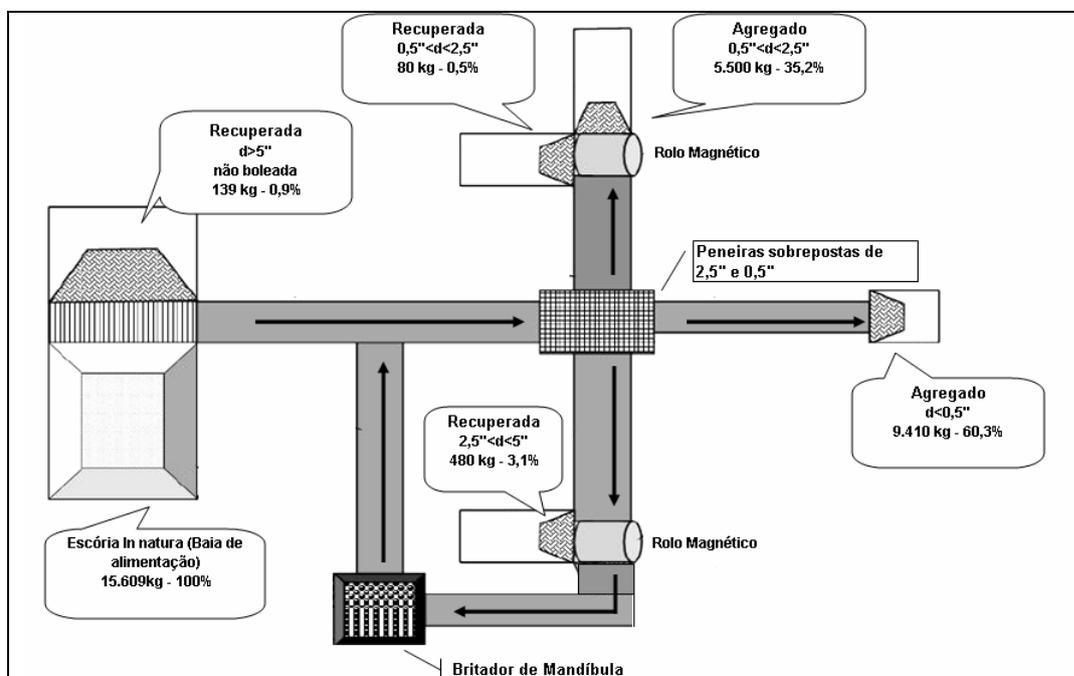


Figura 35. Balanço de massa da planta de beneficiamento de Escória do Forno 1.

Tabela 11. Resumo da Recuperação de escória do Forno 1 e as quantidades enviadas para o CETEM.

APÓS PROCESSAMENTO NA PLANTA	QUANTIDADE [KG]	%	QUANTIDADES ENVIADAS AO CETEM [kg]
Recuperada $d > 5''$ não boleada	139	0,9%	139
Recuperada $2,5'' < d < 5''$	480	3,1%	164
Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$	80	0,5%	92
Agregado $0,5'' < d < 2,5''$	5.500	35,2%	205
Agregado $d < 0,5''$	9.410	60,3%	229
TOTAL	15.609	100,0%	829

As amostras coletadas do beneficiamento da escória foram enviadas para o CETEM para serem processadas nas quantidades apresentadas na Tabela 11. Nas amostras de Recuperada $2,5'' < d < 5''$, Agregado $0,5'' < d < 2,5''$ e Agregado $d < 0,5''$ houve a necessidade de homogeneizar e quartear para separar a quantidade estipulada para envio.

Baseado nos valores obtidos do processamento das amostras e nos cálculos realizados nas tabelas presentes no Anexo III, foi criada a Tabela 12 que resume os resultados encontrados para as amostras do forno 1.

Tabela 12. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 1.

Forno 1		Recuperada $d > 5''$ não boleada	Recuperada $2,5'' < d < 5''$	Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$	Agregado $0,5'' < d < 2,5''$	Agregado $d < 0,5''$	
Peso da amostra (kg)		139	164	92	205	229	
Sucata removida por catação manual (kg)		3		12			
Peso efetivo da amostra (kg)		135	164	80	205	229	
Fe metálico refido	Catação manual (kg)		32,7				
	Penetramento	Britador de mandíbula 1 (kg)	0,3	5,8	14,1		
		Britador de mandíbula 2 (kg)		4,1	6,6	0,5	1,4
		Britador de rolo 1 (kg)	2,6	3,3	9,7	0,9	0,8
		Britador de rolo 2 (kg)		1,7	1,6	1,6	
		Britador de rolo 3 (kg)		5,3	2,2		
		Britador de rolo 4 (kg)			1,1		
		Moinho de barras (kg)	2,2	7,6	1,1	3,9	2,9
Análise química do pó (kg)	2,1	2,3	0,8	4,5	2,7		
Teor de Fe metálico (%)		5,4%	38,5%	52,8%	5,6%	3,5%	
Teor de Fe na forma de óxido (%)		32,5%	22,0%	16,5%	29,8%	30,5%	
Teor de Fe total (%)		37,9%	60,5%	69,3%	35,4%	34,0%	

Dentre os materiais apresentados na Tabela 12 a sucata Recuperada $2,5'' < d < 5''$ deveria apresentar teores de ferro metálico superiores a 85% e a sucata Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$ teores acima de 75%.

A Figura 36 apresenta a imagem da sucata Recuperada $d > 5''$ não boleada antes de iniciar o processamento no CETEM. Em todos os experimentos foi utilizado um plástico em baixo das amostras para inibir a contaminação e o risco de perda amostral.



Figura 36. Sucata Recuperada $d > 5''$ não boleada antes da primeira etapa de britagem.

A Figura 37 apresenta a sucata Recuperada $2,5'' < d < 5''$ antes da primeira etapa de britagem. Na Figura 43 são mostrados os materiais metálicos removidos na etapa de catação manual.



Figura 37. Sucata Recuperada $2,5'' < d < 5''$ antes do processamento no CETEM.



Figura 38. Amostras de material metálico da Recuperada 2,5''<d<5'' removidos na etapa de catação manual.

A Tabela 12 mostra que o teor de ferro metálico contido na sucata Recuperada 2,5''<d<5'' é de 38,5%. O teste de metalização para a mensuração do teor de ferro metálico estimou 68,9%, que representa uma diferença de 30,4% em relação ao experimento.

Foi feito o mesmo teste de metalização agora com a sucata Recuperada 0,5''<d<2,5''. O valor encontrado no teste foi de 80%. Já o valor encontrado no experimento foi de 52,8%, uma diferença de 27,8%. Assim, ou havia um erro na metodologia empregada no experimento ou o teste de metalização superestimava o teor de ferro metálico na amostra. Como no método experimental era visualmente comprovada a presença de ferro na forma metálica em praticamente todas as etapas, exceto os materiais retidos na peneira após moagem e o material que foi enviado para a análise química, iniciou-se uma análise criteriosa sobre o teste de metalização. O primeiro passo foi verificar o histórico dos testes de metalização para confirmar se os valores encontrados nestas amostras estavam compatíveis com as amostras normalmente recebidas pela empresa responsável pela recuperação. Nas Figuras 39 e 40 são apresentados os valores históricos obtidos no teste de metalização para as sucatas Recuperadas 2,5''<d<5'' e 0,5''<d<2,5''.

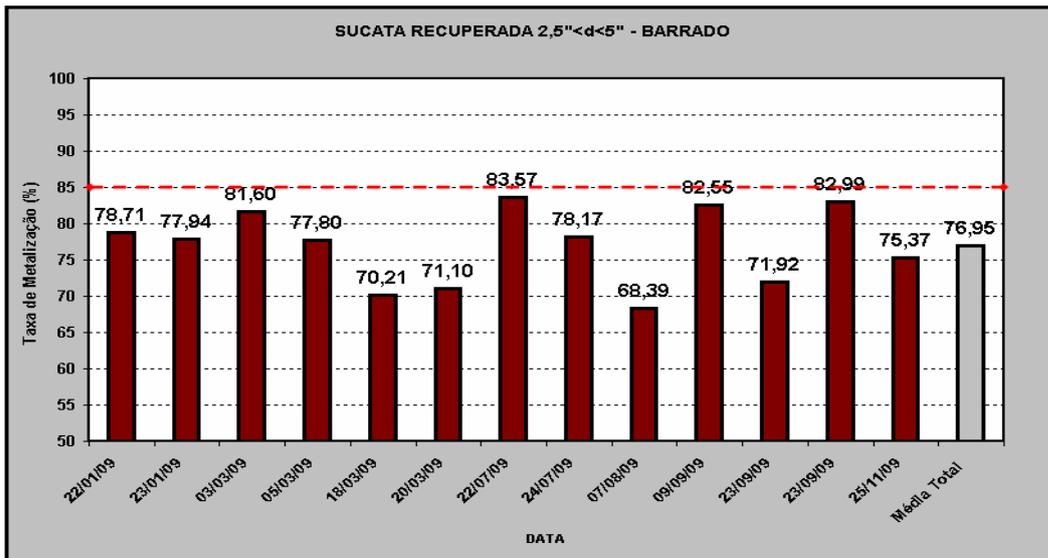


Figura 39. Histórico dos testes de metalização realizados pela empresa terceirizada nas amostras de Recuperada 2,5''<d<5'' do forno 1.

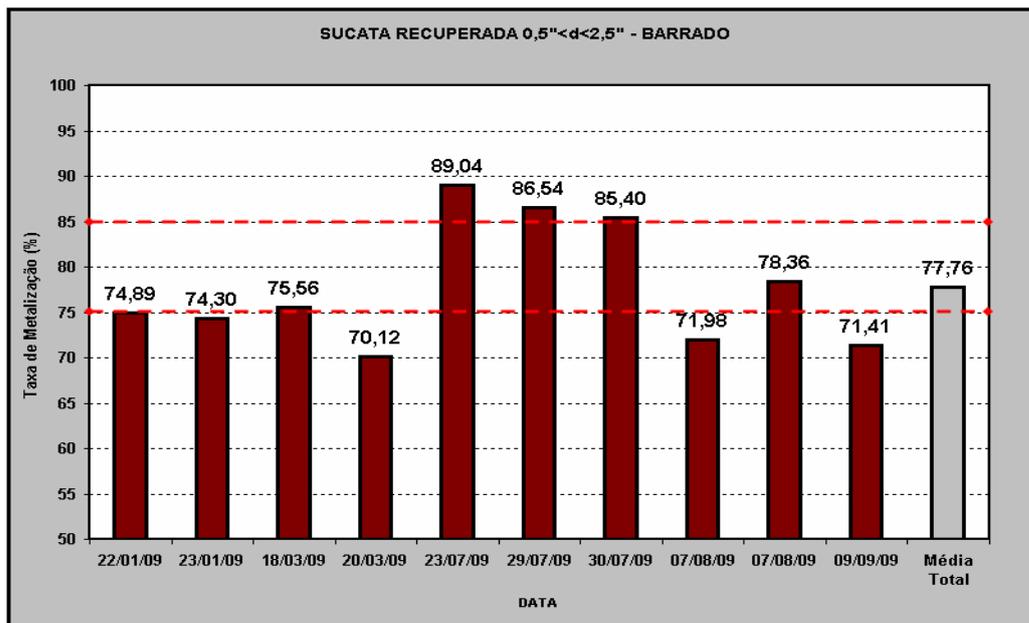


Figura 40. Histórico dos testes de metalização realizados pela empresa terceirizada nas amostras de Recuperada 0,5''<d<2,5''.

As Figuras 39 e 40 demonstram que os resultados encontrados no teste de metalização estão coerentes com os normalmente obtidos. O que significa que se houvesse algum tipo de desvio poderia estar na equação.

A empresa terceirizada responsável pelo beneficiamento da escória utiliza a equação 1 com as constantes A e B sendo iguais a 147,66 e 342,18 respectivamente.

Relembrando:

$$\text{Teor de Fe (\%)} = A - B \times \frac{1}{\rho_T} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$$A = \frac{\frac{1}{\rho_{Esc}}}{\frac{1}{\rho_{Esc}} - \frac{1}{\rho_{Aço}}} \times 100 \quad e \quad B = \frac{100}{\frac{1}{\rho_{Esc}} - \frac{1}{\rho_{Aço}}}$$

$\rho_T = \text{densidade da amostra}$

Para as constantes A e B serem iguais aos valores utilizados pela empresa terceirizada a mesma teria que considerar a densidade do aço e da escória como sendo valores constantes e iguais a 7,18 e 2,32 g/cm³ respectivamente. Porém, na literatura a densidade específica do aço é de 7,85 g/cm³ e a densidade da escória varia com a quantidade de FeO + MnO presentes de acordo com a equação 2.

$$\text{Densidade da escória (g/cm}^3\text{)} = 2,46 + 0,018 \times (\% \text{FeO} + \% \text{MnO}) \quad \text{Equação 2}$$

Assim, com o intuito de verificar se usando estas premissas a equação 1 que mensura o teor de ferro metálico presente na amostra se aproximava do encontrado no experimento, foram refeitos os cálculos. Abaixo na Tabela 13 estão apresentados os resultados encontrados.

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''.

	Recuperada 2,5''<d<5''				Recuperada 0,5''<d<2,5''		
	Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto		Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto
FeO + MnO na escória (%)			51,95			50,91	
Densidade da Amostra (g/cm ³)		4,34	4,34		5,05	5,05	
Densidade da Escória (g/cm ³)		2,32	3,40		2,32	3,38	
Densidade do Aço (g/cm ³)		7,18	7,85		7,18	7,85	
Teor de Ferro Metálico (%)	38,5%	68,9%	38,4%	52,8%	80,0%	58,2%	
Diferença entre os cálculos para estimar e o real obtido		78,9%	-0,4%		51,6%	10,4%	

Pode-se verificar que o grau de assertividade, alterando os valores de A e B da equação 1, foi bastante eficaz. Assim, para comprovar a reprodutibilidade destas alterações sobre a equação, foram separadas mais 4 (quatro) unidades de sucata Recuperada 2,5”<d<5” onde seria novamente realizado o processamento e depois comparado os valores encontrados pela empresa terceirizada com os das novas variáveis propostas. Na Tabela 14 estão os resultados encontrados.

Tabela 14. Teste da equação 1 utilizando as premissas empregadas pela empresa terceirizada e o novo método proposto em 4 novas amostras.

	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			Amostra 4		
	Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto	Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto	Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto	Obtido no experimento	Empresa Terceirizada	Proposto
FeO + MnO na escória (%)			49,1			43,4			50,3			48,9
Densidade da Amostra (g/cm ³)		3,59	3,59		4,68	4,68		3,97	3,97		4,24	4,24
Densidade da Escória (g/cm ³)		2,32	3,34		2,32	3,24		2,32	3,37		2,32	3,34
Densidade do Aço (g/cm ³)		7,18	7,85		7,18	7,85		7,18	7,85		7,18	7,85
Teor de Ferro Metálico (%)	20,6%	52,3%	11,9%	53,6%	74,5%	52,2%	22,7%	61,4%	26,5%	33,7%	66,9%	36,8%
Diferença entre os cálculos para estimar e o real obtido		154,2%	-42,4%		38,9%	-2,6%		170,7%	16,9%		98,5%	9,2%

É possível observar que o grau de assertividade continuou bem próximo ao obtido pelo experimento, exceto na amostra 1 que teve uma perda amostral significativa prejudicando a sua interpretação. Mesmo assim, as alterações propostas sempre se mantiveram mais próximas do obtido no experimento que o método da empresa terceirizada.

O teor de metalização da amostra baseado nas premissas da empresa terceirizada se manteve muito superior ao obtido pelo experimento. No entanto, estes valores deveriam ser superiores a 85%, o que não ocorreu. O novo método experimental revelou teores de ferro metálico ainda menores que os apresentados na Figura 39.

Na Figura 41 as amostras de Recuperada 0,5”<d<2,5” no centro da imagem, e no canto inferior esquerdo as sucatas removidas durante a catação manual.



Figura 41. Sucata Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$ durante a etapa de catação manual.

Através da Tabela 12 é possível verificar que o teor de ferro metálico contido nesta amostra foi de 52,8%, acima dos 38,5% obtidos na Recuperada $2,5'' < d < 5''$.

Coincidentemente a média dos valores encontrados durante todo o período de 2009 (77,8%) no teste de metalização foi apenas 2,2% inferior ao da amostra de sucata recuperada (80%) que foi utilizado para esta dissertação (ver Figura 41). Assim, além de se ter trabalhado com um valor que representa o histórico para este tipo de material, mostra que durante este intervalo foi empregado no forno sucata com um teor de ferro metálico abaixo do esperado para utilização como matéria-prima ferrosa.

A média histórica para o teor de metalização da Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$ é superior ao da Recuperada $2,5'' < d < 5''$. Além disto, a Recuperada $0,5'' < d < 2,5''$ foi a única que em três testes realizados pela empresa responsável pelo beneficiamento da escória conseguiu alcançar valores acima de 85% mesmo estes valores sendo questionáveis. No entanto, demonstra um teor de ferro metálico mais elevado que o apresentado na Recuperada $2,5'' < d < 5''$.

O Agregado $0,5'' < d < 2,5''$ é o material que por possuir quantidades pequenas de ferro metálico não sofreu imantação. Na etapa de catação manual não houve nenhuma quantidade removida. Na Figura 42 está apresentada a foto do material antes da etapa de britagem.



Figura 42. Agregado 0,5”<d<2,5” antes de passar no Britador de Mandíbulas.

Apesar da presença de ferro metálico neste material ser baixa, 5,6%. Este material representa 35,2% da escória gerada no forno. Assim, seu impacto na perda metálica é significativo. Outro exemplo é o Agregado $d < 0,5''$ que apresentou teor de ferro metálico de 3,6% e representa mais de 60% do material gerado após o beneficiamento da escória.

Além da quantificação do teor de ferro metálico nas amostras, era de interesse a mensuração da quantidade por corrida que sai de ferro pela porta do forno e, conseqüentemente, seu impacto na perda metálica da Aciaria. Como no experimento do Forno 1 foi realizado a mensuração da quantidade gerada de escória por corrida, a quantidade de produtos e co-produtos gerados do beneficiamento e o quanto de ferro metálico tem em cada amostra, este valor foi possível de ser obtido. As Tabelas 15 e 16 apresentam os valores encontrados.

Tabela 15. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico.

Produção da corrida [t]	98			
AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ⁰ na Amostra [%]	Teor de Fe ⁰ na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ⁰ [kg/t]
Recuperada d>5" não boleada	135	5,4%	7,3	0,1
Recuperada 2,5"<d<5"	480	38,5%	184,8	1,9
Recuperada 0,5"<d<2,5"	80	52,8%	42,2	0,4
Agregado 0,5"<d<2,5"	5.500	5,6%	307,9	3,1
Agregado d<0,5"	9.410	3,5%	324,7	3,3
TOTAL	15.605	5,6%	866,9	8,8

É interessante observar que 6,04kg/t da perda metálica na forma de Ferro metálico hoje em dia não é recuperável, pois está na forma de Agregado 0,5"<d<2,5" e d<0,5", o que representa 72,7% da perda.

Outra informação ilustrada nesta Tabela é a quantidade de Ferro metálico que foi encontrado na escória. O valor de 5,6% significa que das 15.605kg de escória gerada numa corrida 866,9kg era de Ferro Metálico. O que representa uma perda de 8,8kg de ferro por tonelada de aço produzido.

Tabela 16. Quantificação da perda metálica na forma de Fe²⁺.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [%]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ²⁺ [kg/t]
Recuperada d>5" não boleada	135	32,5%	44,0	0,4
Recuperada 2,5"<d<5"	480	22,0%	105,7	1,1
Recuperada 0,5"<d<2,5"	80	16,5%	13,2	0,1
Agregado 0,5"<d<2,5"	5500	29,8%	1636,8	16,7
Agregado d<0,5"	9410	30,5%	2874,7	29,3
Total	15.605	30,0%	4.674,4	47,7

Utilizando as Tabelas 23 e 24 foi possível mensurar a geração de escória *in natura* que saiu pela porta do forno em 159 kg/t. A perda de Ferro Metálico representou 8,8 kg/t e a perda de ferro na forma de FeO representou 47,7 kg/t. A perda total de ferro foi de 56,5 kg/t, equivalendo, a 5,7% no rendimento.

4.2 Resultados e discussões Forno 2

A planta de beneficiamento de escória empregada pela empresa responsável nas unidades 2 e 3 é similar ao Modelo 2 (ver Figura 14).

Para este Forno as amostras enviadas foram coletadas nas pilhas onde havia o produto gerado do beneficiamento da escória de aproximadamente 20 corridas.

Os produtos enviados para análise gerados no beneficiamento foram:

1. Recuperada $d > 5''$;
2. Recuperada $1'' < d < 5''$;
3. Recuperada $2'' < d < 5''$ não há nas plantas do fornos 1 e 3, se trata de uma catação manual realizada antes do britador de mandíbula;
4. Agregado $1'' < d < 2''$;
5. Agregado $d < 1''$; e
6. Escória In natura.

O material Recuperada $0,5'' < d < 1''$ é de pequeno volume de geração sendo o mesmo contabilizado como Recuperada $1'' < d < 5''$. Durante as etapas de processamento os materiais se comportaram de maneira semelhante aos do Forno 1. Vale lembrar que este forno não produziu uma corrida específica para ser beneficiada. Assim, para permitir a confirmação da coerência dos resultados foi enviada uma amostra de escória In natura. Ao final da análise de todas as amostras e, posteriormente da In natura, seria possível através do balanço de massa confirmar o resultado global do Forno 2.

Na Tabela 17 o resultado das amostras analisadas. Para a compreensão detalhada dos cálculos utilizados verificar as planilhas contidas no anexo III.

Tabela 17. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 2.

Forno 2		In natura	Recuperada d>5"	Recuperada 2"<d<5"	Recuperada 1"<d<5"	Agregado 1"<d<2"	Agregado d<1"	
Peso da amostra (kg)		202,17	266	267	309	268	290	
Sucata removida por catação manual (kg)					3,77			
Peso efetivo da amostra (kg)		202,17	266	267	305,23	268	290	
Fe metálico retido	Catação manual (kg)	3,75	11,8	70	136,23			
	Peneiramento	Britador de mandíbula 1 (kg)	0,92	19,45	8,43	25,7		
		Britador de mandíbula 2 (kg)	0,72	5,95	3,97	11,25	3,83	0,73
		Britador de rolo 1 (kg)	1,05	4,44	5,45	7	2,84	1,17
		Britador de rolo 2 (kg)	0,72	5,78	2,79	2,62	1,5	0,65
		Britador de rolo 3 (kg)	2,85	2,89	6,82	8,23	2,73	1,32
		Britador de rolo 4 (kg)		6,19				
		Moinho de barras (kg)	5,85	9,64	12,55	10,30	6,98	3,11
	Análise química do pó (kg)	4,98	4,66	4,39	2,51	5,58	6,40	
Teor de Fe metálico (%)		10,31%	26,65%	38,60%	66,93%	8,77%	4,62%	
Teor de Fe na forma de óxido (%)		22,85%	18,43%	17,41%	8,88%	23,86%	24,29%	
Teor de Fe total (%)		33,15%	45,08%	56,02%	75,80%	32,62%	28,91%	

A quantidade de Ferro metálico contido na amostra de escória *In natura* foi de 10,3% e de ferro na forma de Fe^{2+} de 22,8%.

Nas amostras de Recuperada d>5" foi obtido um teor de ferro metálico de 26,6%. Este material deveria conter teores acima de 85%, assim como, a sucata Recuperada 2"<d<5" que é o material obtido por catação. Por haver dúvidas sobre os teores de ferro contidos neste material, o mesmo já não era mais empregado no forno como opção de sucata metálica, mesmo antes destes experimentos, no entanto, o baixo valor encontrado de 38,6% ratifica a sua não utilização.

A Recuperada 1"<d<5" foi a amostra com o maior teor de ferro metálico, 66,9%, porém, este valor ainda está inferior à 85%.

Similar ao forno 1 não foi possível encontrar nenhuma amostra com o teor de ferro metálico acima de 85%.

Tanto o Agregado 1"<d<2", quanto o Agregado d<1" foram processados para que fosse possível fechar o balanço de massa deste forno e, assim, permitir estimar a perda de ferro total pela escória. Além destas informações era necessário o percentual de geração dos produtos da planta de beneficiamento. Como não foi feito o processamento de uma corrida específica, utilizou-se os dados históricos. Na tabela 18 os percentuais empregados.

Tabela 18. Percentual gerado de co-produtos no beneficiamento da escória do Forno 2.

Produção de aço da corrida [t]	20
APÓS PROCESSAMENTO NA PLANTA	Quantidade gerada após recuperação [%]
Recuperada d>5"	2,5
Recuperada 2"<d<5"	1,0
Recuperada 1"<d<5"	2,8
Agregado 1"<d<2"	37,0
Agregado d<1"	56,7
TOTAL	2.650,0

Com base nas informações contidas nas Tabelas 17 e 18 foi possível estimar a perda de ferro na forma de ferro metálico, cujos valores estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico.

Produção da corrida [t]	20			
AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe^o na Escória [%]	Teor de Fe^o na Escória [kg]	PERDA METÁLICA - Fe^o [kg/t]
Recuperada d>5"	66	26,6%	17,7	0,9
Recuperada 2"<d<5"	27	38,6%	10,2	0,5
Recuperada 1"<d<5"	74	66,9%	49,7	2,5
Agregado 1"<d<2"	981	8,8%	86,0	4,3
Agregado d<1"	1.503	4,6%	69,4	3,5
TOTAL	2.650	8,8%	232,9	11,6

Para confirmar o valor de 11,6 kg/t, foi considerado que o valor encontrado na amostra de escória *In natura* representava o teor de ferro metálico contido na

escória, e que a quantidade de escória gerada foi de 2.650 kg. Levando estas premissas em consideração a perda de ferro na forma de ferro metálico seria de 13,7 kg/t, resultado apresentado na Tabela 20.

Tabela 20. Estimativa da perda de ferro na forma de ferro metálico baseado na análise da escória In natura.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ⁰ na Escória [%]	Teor de Fe ⁰ na Escória [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ⁰ [kg/t]
In natura	2.650	10,3%	273,2	13,7

Para quantificar a perda ferro total pela escória é necessário mensurar também o que sai na forma de Fe²⁺. A Tabela 21 resume os cálculos realizados para a obtenção do valor de 31,1 kg/t.

Tabela 21. Quantificação da perda metálica na forma de Fe²⁺.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [%]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ²⁺ [kg/t]
Recuperada d>5"	66	18,4%	12,2	0,6
Recuperada 2"<d<5"	27	17,4%	4,6	0,2
Recuperada 1"<d<5"	74	8,9%	6,6	0,3
Agregado 1"<d<2"	981	23,9%	233,9	11,7
Agregado d<1"	1503	24,3%	365,0	18,2
Total	2.650	23,5%	622,3	31,1

Novamente foi realizada a estimativa utilizando a escória In natura como base para a confirmação do valor obtido de perda metálica. A tabela 22 apresenta o valor encontrado.

Tabela 22. Estimativa da perda de ferro na forma de Fe^{2+} baseado na análise da escória In natura.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe^{2+} na Amostra [%]	Teor de Fe^{2+} na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe^{2+} [kg/t]
In natura	2650	22,8%	605,4	30,3

A utilização da escória In natura foi uma boa ferramenta de confirmação, pois demonstrou que os valores encontrados pelo fechamento do balanço de massa estavam próximos ao da amostra antes do beneficiamento na planta de recuperação.

Somando a perda metálica na forma de ferro metálico de 11,6 kg/t com a perda na forma de Fe^{2+} de 31,1 kg/t tem-se a perda total de ferro na escória de 42,7 kg/t, o equivalente a 4,3% do rendimento metálico.

4.3 Resultados e discussões Forno 3

A planta de beneficiamento de escória nesta usina é similar a da Usina 2 (Figura 14). A única diferença está nos produtos obtidos, pois não há a geração de Recuperada 2”<d<5” por catação manual.

Foram enviadas 5 tipos de amostras deste forno. São elas:

1. Recuperada d>5”;
2. Recuperada 1”<d<5”;
3. Agregado 1”<d<2”;
4. Agregado d<1”;
5. Escória In natura.

Na Tabela 23 os resultados obtidos do processamento das amostras e dos cálculos realizados nas tabelas presentes no anexo III.

Tabela 23. Tabela resumo do experimento com as amostras do Forno 3.

Forno 3		In natura	Processada d>5"	Recuperada 1"<d<5"	Agregado 1"<d<2"	Agregado d<1"	
Peso da amostra (kg)		340	266	363,6	293	243	
Sucata removida por catação manual (kg)		0	4,7	32,1			
Peso efetivo da amostra (kg)		340	261,3	331,5	293	243	
Fe metálico refido	Catação manual (kg)	0	84,3	68,65	0	0	
	Peneiramento	Britador de mandíbula 1 (kg)	0,89	7,5	19,2		
		Britador de mandíbula 2 (kg)	2,21	3,8	13,7	0,81	0,16
		Britador de rolo 1 (kg)	0,69	5,2	21,5	0,1	0,09
		Britador de rolo 2 (kg)	1,33	4,85	12,05	0,65	0,38
		Britador de rolo 3 (kg)		4,95	22,65		
		Britador de rolo 4 (kg)		4,65			
		Moinho de barras (kg)	7,45	29,44	26,93	0,55	5,88
Análise química do pó (kg)	12,12	3,65	5,25	7,06	7,93		
Teor de Fe metálico (%)		6,90%	57,92%	57,45%	3,13%	5,96%	
Teor de Fe na forma de óxido (%)		26,26%	11,68%	13,07%	26,18%	23,64%	
Teor de Fe total (%)		33,17%	69,60%	70,52%	29,32%	29,60%	

Das amostras do forno 3 a que teve o maior teor de ferro metálico foi a Recuperada 1"<d<5" com o valor de 57,5%, no entanto, novamente este valor é inferior a 85%.

Visando obter uma estimativa da perda de ferro pela escória do forno 3, foi verificado a quantidade média de escória gerada ao longo do ano (130 kg/t) e o percentual de cada produto obtido do beneficiamento da escória. Assim, com os valores informados nas Tabelas 23 e 24 foi possível estimar as perdas metálicas expressas nas tabelas 25 e 27.

Tabela 24. Percentual gerado de co-produtos no beneficiamento da escória do Forno 3.

Produção de aço da corrida [t]	80
APÓS PROCESSAMENTO NA PLANTA	Quantidade gerada após recuperação [%]
Recuperada d>5"	2,2
Recuperada 1"<d<5"	3,8
Agregado 1"<d<2"	37,0
Agregado d<1"	57,0
TOTAL [kg]	10.400,0

Tabela 25. Quantificação da perda metálica na forma de Ferro Metálico do forno 3.

Produção da corrida [t]	80			
AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ^o na Escória [%]	Teor de Fe ^o na Escória [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ^o [kg/t]
Processada d>5"	229	57,9%	132,5	1,7
Recuperada 1"<d<5"	395	57,4%	227,0	2,8
Agregado 1"<d<2"	3.848	3,1%	120,6	1,5
Agregado d<1"	5.928	6,0%	353,0	4,4
TOTAL	10.400	8,0%	833,2	10,4

Com os teores de ferro metálico obtidos no processamento da escória In natura e a média de escória gerada de 130 kg/t, estimou-se a perda na forma de ferro metálico de 9,0 kg/t (ver Tabela 26), valor este próximo ao apresentado na Tabela 25.

Tabela 26. Estimativa da perda de ferro na forma de Ferro metálico baseado na análise da escória In natura do forno 3.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ⁰ na Escória [%]	Teor de Fe ⁰ na Escória [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ⁰ [kg/t]
In natura	10.400	6,9%	718,1	9,0

As mesmas premissas foram utilizadas para mensurar a perda metálica na forma de Fe²⁺. A Tabela 27 apresenta o resultado obtido.

Tabela 27. Quantificação da perda metálica na forma de Fe²⁺ do forno 3.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [%]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ²⁺ [kg/t]
Processada d>5"	229	11,7%	26,7	0,3
Recuperada 1"<d<5"	395	13,1%	51,6	0,6
Agregado 1"<d<2"	3848	26,2%	1007,6	12,6
Agregado d<1"	5928	23,6%	1401,5	17,5
Total	10.400	23,9%	2.487,5	31,1

A Tabela 28 apresenta a mesma estimativa sendo agora calculada a perda na forma de Fe²⁺, considerando o resultado obtido no experimento da escória In natura.

Tabela 28. Estimativa da perda de ferro na forma de Fe²⁺ baseado na análise da escória In natura do forno 3.

AMOSTRA	QUANTIDADE [kg]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [%]	Teor de Fe ²⁺ na Amostra [kg]	PERDA METÁLICA - Fe ²⁺ [kg/t]
In natura	10400	26,3%	2731,3	34,1

Os valores obtidos para as perdas na forma de Fe^{2+} nas Tabelas 27 e 28 mantiveram-se próximos demonstrando coerência nos resultados.

Somando a perda metálica na forma de ferro metálico de 10,4 kg/t com a perda na forma de Fe^{2+} de 31,1 kg/t tem-se a perda total de ferro na escória de 41,5 kg/t, o equivalente a 4,2% do rendimento metálico.

A tabela 29 apresenta uma comparação entre as sucatas recuperadas que retornam para as usinas como opção de matéria-prima ferrosa. Das seis sucatas informadas abaixo, a Recuperada 0,5”<d<2,5” do Forno 1 deveria apresentar teores de ferro metálico acima de 75% e nas demais o valor deveria superar 85%. Pode-se observar que nenhuma das sucatas atendeu a estes requisitos. Isto significa que as sucatas recuperadas estão com um nível de impureza mais elevado que o permitido, impactando negativamente nos indicadores do processo, principalmente, no rendimento metálico.

Tabela 29. Comparativo entre os fornos dos materiais que retornam como metálico recuperado para reemprego no forno.

Geral 1		Forno 1		Forno 2		Forno 3	
		Recuperada 2,5”<d<5”	Recuperada 0,5”<d<2,5”	Recuperada d>5”	Recuperada 1”<d<5”	Processada d>5”	Recuperada 1”<d<5”
Peso da amostra (kg)		164	92	266	309	266	364
Sucata removida por catação manual (kg)		0	12	0	3,77	4,7	32,1
Peso efetivo da amostra (kg)		164	80	266	305	261	332
Fe metálico retido Peneiramento	Catação manual (kg)	32,7	0,0	11,8	136,2	84,3	68,7
	Britador de mandíbula 1 (kg)	5,8	14,1	19,5	25,7	7,5	19,2
	Britador de mandíbula 2 (kg)	4,1	6,6	6,0	11,3	3,8	13,7
	Britador de rolo 1 (kg)	3,3	9,7	4,4	7,0	5,2	21,5
	Britador de rolo 2 (kg)	1,7	1,6	5,8	2,6	4,9	12,1
	Britador de rolo 3 (kg)	5,3	2,2	2,9	8,2	5,0	22,7
	Britador de rolo 4 (kg)	0,0	1,1	6,2	0,0	4,7	0,0
	Moinho de barras (kg)	7,6	1,1	9,6	10,3	29,4	26,9
Análise química do pó (kg)		2,3	0,8	4,7	2,5	3,6	5,2
Teor de Fe metálico (%)		38,5%	52,8%	26,6%	66,9%	57,9%	57,4%
Teor de Fe na forma de óxido (%)		22,0%	16,5%	18,4%	8,9%	11,7%	13,1%
Teor de Fe total (%)		60,5%	69,3%	45,1%	75,8%	69,6%	70,5%

Na Tabela 30 foi feito um comparativo entre os fornos com os agregados gerados no processo de beneficiamento da escória. O teor de ferro na forma de Fe^{2+} nos agregados do Forno 1 são maiores do que nos demais fornos. Este fato também se repete para as sucatas recuperadas (ver Tabela 29). Como os agregados representam mais de 90% dos produtos gerados do beneficiamento da escória, quanto maior o percentual de ferro na forma de Fe^{2+} , maior será a perda metálica. Na Tabela 31 o resumo das perdas na forma de ferro metálico e na forma de Fe^{2+} .

Pode-se verificar que a perda do forno 1 na forma de Fe^{2+} é superior aos demais fornos.

Tabela 30. Comparativo entre os fornos dos agregados gerados no beneficiamento da escória.

Geral 2		Forno 1		Forno 2		Forno 3		
		Agregado 0,5" < d < 2,5"	Agregado d < 0,5"	Agregado 1" < d < 2"	Agregado d < 1"	Agregado 1" < d < 2"	Agregado d < 1"	
Peso da amostra (kg)		205	229	268	290	293	243	
Sucata removida por catação manual (kg)		0	0	0	0	0	0	
Peso efetivo da amostra (kg)		205	229	268	290	293	243	
Fe metálico retido	Catação manual (kg)	0	0	0	0	0	0	
	Peneiramento	Britador de mandíbula 1 (kg)	0	0	0	0	0	0
		Britador de mandíbula 2 (kg)	0,5	1,4	3,8	0,7	0,8	0,2
		Britador de rolo 1 (kg)	0,9	0,8	2,8	1,2	0,1	0,1
		Britador de rolo 2 (kg)	1,6	0,0	1,5	0,7	0,7	0,4
		Britador de rolo 3 (kg)	0,0	0,0	2,7	1,3	0	0
		Britador de rolo 4 (kg)	0,0	0,0	0	0	0	0
		Moinho de barras (kg)	3,9	2,9	7,0	3,1	0,5	5,9
		Análise química do pó (kg)	4,5	2,7	5,6	6,4	7,1	7,9
Teor de Fe metálico (%)		5,6%	3,5%	8,8%	4,6%	3,1%	6,0%	
Teor de Fe na forma de óxido (%)		29,8%	30,5%	23,9%	24,3%	26,2%	23,6%	
Teor de Fe total (%)		35,4%	34,0%	32,6%	28,9%	29,3%	29,6%	

Tabela 31. Tabela comparativa das perdas no rendimento entre os fornos.

	Forno 1	Forno 2	Forno 3
Perdas no rendimento na forma de Fe^0 [kg/t]	8,8	11,6	10,4
Perdas no rendimento na forma de Fe^{2+} [kg/t]	47,7	31,1	31,1
Impacto total no rendimento metálico [kg/t]	56,5	42,8	41,5