

# ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE DO EMPREGO DO REJEITO DE SINTER FEED COMO ALTERNATIVA DE SUBSTITUIÇÃO DAS AREIAS NATURAIS COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DO CONCRETO

## STUDY OF CHARACTERIZATION AND FEASIBILITY OF EMPLOYMENT FEED SINTER REJECT AS REPLACEMENT ALTERNATIVE OF THE NATURAL SANDS AS ADDED IN THE CONCRETE PRODUCTION

**COSTA, Ayrton Vianna**

Engenheiro Civil pela FUMEC, Mestre em Construção Civil pelo DEMC da EE/UFMG, doutorando em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pelo DEMET da EE/UFMG e Professor dos cursos de Graduação em Engenharia Civil e Especialização em Construção Civil da UFMG.  
E-mail: ayrton@ufmg.br;

**GUMIERI, Adriana Guerra**

Engenheira Civil pela FUMEC, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Professora dos cursos de Graduação em Engenharia Civil e Pós-graduação em Construção Civil da UFMG.  
E-mail: adriana@demc.ufmg.br;

**BRANDÃO, Paulo Roberto Gomes**

Engenheiro de Minas pela UFMG, Master em Mining and Mineral Process Engineering pela University of British Columbia, Ph.D. em Mining and Mineral Process Engineering pela University of British Columbia, Canadá e Professor Emérito da Escola de Engenharia nos cursos de Mestrado e Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG.  
E-mail: pbrandao@demin.ufmg.br;

### RESUMO

O Brasil é o sexto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro e o segundo maior produtor de minério de ferro. O rejeito de sinter-feed é um resíduo do processo de produção do minério de ferro. Durante este processo, o material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, contendo, ainda ao final, uma significativa quantidade de ferro, cuja maior concentração não é possível por processamento magnético. Este rejeito vem sendo depositado, ao longo dos anos, em pilhas junto às áreas de mineração, causando danos ao meio ambiente e exigindo uma demanda de custos relativos à sua disposição e controle ambiental. A areia natural quartzosa, utilizada em concretos e argamassas, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, no qual sua obtenção contribui para a degradação ambiental. A areia natural constitui um bem finito e não renovável e tem sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades. Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade do aproveitamento do rejeito de sinter-feed, oriundo de atividades mineradoras, como agregado na produção de concreto para a fabricação de elementos pré-moldados destinados à pavimentação, ou mesmo alvenarias para edificações em pavimento térreo. Realizou-se a caracterização física, química, mineralógica, ambiental e microestrutural do rejeito e também o estudo das suas propriedades relacionadas à durabilidade e desempenho mecânico, quando empregado como agregado. O rejeito é constituído, principalmente, por hematita, quartzo e goethita, e classifica-se inerte. No ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, o rejeito pode ser considerado como agregado inócuo. No geral, o rejeito de sinter-feed

apresentou desempenho satisfatório com relação às propriedades físicas, técnicas e ambientais, o que favorece seu emprego na fabricação de elementos de concreto para pavimentação e alvenarias citadas. Devido ao seu maior peso em relação aos agregados convencionais, maior viabilidade econômica se estabelece na condição de produção dos elementos de concreto no próprio local de sua aplicação.

**PALAVRAS-CHAVE:** sinter-feed, rejeitos de mineração, agregados, pavimentação.

## ABSTRACT

Brazil holds the world's sixth largest iron ore deposits and is the second largest producer of iron. Sinter-feed tailings are a residue from the iron ore production process. During this process, the material is subjected to washing and sieving operations and at the end of these operations it still contains a substantial amount of iron, whose higher concentration cannot be further decreased by magnetic processing. This waste is dumped around the mining areas, harming the environment and involving costs for its environmental disposal and control. The natural quartz sand used in concretes and mortars is a finite and non-renewable material that is becoming increasingly scarce in the neighborhood of large cities and whose extraction contributes toward environmental degradation. This paper discusses a study of the use of sinter-feed tailings employed as an aggregate in the production of pre-molded concrete destined to pavement applications or even to masonry ground floor buildings. The tailings were subjected to physical, chemical, mineralogical, environmental and microstructural characterization; also, a study was carried out on their properties of durability and mechanical performance as a fine aggregate. This waste consists primarily of hematite, quartz and goethite and is classified as an inert material. It is considered an innocuous aggregate at the test of alkali-aggregate potential reactivity. In general the material presented a satisfactory performance with respect to its technical and environmental properties, favoring its use in the production of concrete elements for pavement and masonry as mentioned above. Since the tailings are heavier than the conventional aggregates, more economic viability was established by producing these concrete elements at the site where they will be applied.

**KEYWORDS:** sinter-feed, tailings from mining, aggregates, paving.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca de uma destinação útil aos resíduos oriundos de atividades siderúrgicas e mineradoras tem sido uma preocupação constante por parte das empresas que se dedicam a estas atividades, de ambientalistas, bem como dos órgãos e instituições de pesquisas e controle interessados na qualidade do meio ambiente. Na área da siderurgia, grande avanço se estabeleceu no aproveitamento de determinadas escórias como componente importante na produção de alguns cimentos Portland, contribuindo para significativas economias em sua produção, melhoria de suas características e, principalmente, utilização inteligente dos resíduos gerados nas siderúrgicas. No setor de mineração de rochas, materiais que no passado eram resíduos na produção de britas, atualmente, graças a pequeno investimento e estabelecimento de mais uma fase de beneficiamento das frações finas da britagem, constituem, com crescente aceitação pelo mercado, as areias artificiais.

Não apenas nos setores da mineração e siderurgia, mas também na própria construção civil, a busca constante pelo aproveitamento de rejeitos e resíduos hoje ocupa lugar de destaque na pesquisa e busca de tecnologia de novos materiais que contribuam para a sustentabilidade ambiental. Segundo Alcântara (2009), "Com o desenvolvimento

das cidades, a ação do homem sobre o meio ambiente resultou na degradação dos recursos naturais e na poluição, comprometendo assim a qualidade da vida dele mesmo. “.....” No século XXI é tarefa dos profissionais da construção civil a adequação dos princípios da construção sustentável ao cotidiano do trabalho, pois é grande a responsabilidade e a parcela da construção civil no desenvolvimento sustentável.”

A areia natural quartzosa, seja de barranco ou de rio, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, respectivamente. Ambos os casos contribuem enormemente para a degradação ambiental dos locais e das cercanias de sua exploração, geralmente próximo aos grandes centros urbanos. A degradação do meio ambiente devido à extração de areia caracteriza-se, principalmente, pela retirada da cobertura vegetal, grande erosão das áreas exploradas, assoreamento dos leitos hídricos e significativa alteração paisagística. A areia natural constitui um bem finito e não renovável e tem sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além, evidentemente, da sua heterogeneidade. Sua obtenção em locais mais distantes aumenta significativamente o custo de transporte.

O Brasil é o quinto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro, com quase 7% das reservas mundiais e o segundo maior produtor de minério de ferro. Em 2007, o país produziu 350 milhões de toneladas, equivalentes a 18,42% da produção mundial, que é de 1,9 bilhões de toneladas (IBRAM, 2008). O alto teor de ferro contido nos minérios brasileiros (60 a 67% nas hematitas e 50 a 60% nos itabiritos) leva o Brasil a ocupar lugar de destaque no cenário mundial, em termos de ferro contido no minério. O estado de Minas Gerais é responsável por aproximadamente de 75% dessas reservas, notabilizando-se pela grande quantidade de plantas de mineração, especialmente as de ferro, espalhadas pela região.

O minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica (99%) e o restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e construção de estradas. Sua utilização pode ser feita por minérios granulados e aglomerados (sinter ou pelota). Os granulados (6 a 25 mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto que os aglomerados são fabricados com os minérios mais finos. Os principais processos de aglomeração são sinterização e pelotização. Para uso na sinterização, são obtidos concentrados tipo sinter-feed (0,15 a 6,35 mm) e na pelotização são usados concentrados denominados pellet-feed (menor que 0,15mm). O minério de ferro com teores médios de 65% de ferro, sílica e alumínio em torno de 3% cada e baixo teor de fósforo, é utilizado nos altos-fornos para a produção de ferro gusa e nos fornos de redução direta para produção de ferro-esponja. O sinter-feed é destinado às usinas siderúrgicas integradas de aço. (Quaresma, 2001).

O rejeito de sinter-feed é um resíduo do processo de produção do minério de ferro que, até o momento, não tem nenhum direcionamento comercial. Durante o processo de produção do minério de ferro, o material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, gerando um rejeito sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica. Esse material contém, ainda, uma significativa quantidade de ferro, cuja maior concentração não é possível apenas pelo processo de separação magnética ou gravimétrica. O rejeito vem sendo depositado, ao longo dos anos, em enormes pilhas junto às áreas de mineração, causando danos ao meio ambiente e exigindo uma demanda de custos relativos à sua disposição e controle ambiental.

O objetivo deste trabalho é caracterizar o rejeito de sinter-feed visando seu emprego como agregado miúdo para a produção de elementos pré-fabricados de concreto para utilização na pavimentação e em alvenarias para edificações de nível térreo. Apresentam-se os resultados da caracterização física, química, mineralógica e ambiental do rejeito e avalia-se o resíduo segundo parâmetros de qualidade adotados para os agregados empregados nos concretos. O aproveitamento deste resíduo como agregado para o concreto, certamente, virá a se constituir em mais uma alternativa de substituição das areias naturais, contribuindo para a preservação ambiental. O rejeito de sinter-feed estudado é procedente de uma planta de mineração situada no município de Sarzedo, Minas Gerais, e que representa o perfil de mineração de ferro desenvolvido na região.



Figura 1- Pilha de estoque de rejeito de sinter feed em área de mineradora

## METODOLOGIA

Na primeira etapa dos estudos, a amostragem do resíduo foi realizada conforme recomendações das normas brasileiras ABNT NBR 10007 e NBR 7216, obtendo-se amostras parciais em vários pontos das pilhas de estocagem (topo, a meia altura e base das pilhas) e em pilhas de diversas idades de formação, de tal forma que a amostra homogeneizada garantisse a representatividade do resíduo. Foram realizados os seguintes ensaios no material:

- Caracterização química;
- Caracterização mineralógica por difração de raios-X;
- Obtenção do extrato lixiviado do resíduo (ABNT NBR 10005);
- Obtenção do extrato solubilizado do resíduo (ABNT NBR 10006);
- Classificação do resíduo sólido (ABNT NBR 10004);
- Reatividade potencial álcali-agregado (ABNT NBR 9774);
- Ensaio acelerado de durabilidade do agregado – Soundness Test (DNER ME-089);
- Composição granulométrica do agregado (ABNT NM 248);
- Massa específica real (ABNT NM 52);
- Massa unitária (ABNT NBR 7251);
- Teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT NBR 7218);
- Teor de materiais pulverulentos (ABNT NM 46);
- Teor de impurezas orgânicas (ABNT NM 49);
- Ensaio de qualidade do agregado miúdo (ABNT NBR 7221). Para este ensaio, tomou-se como referência os resultados de resistência à compressão axial obtidos para argamassa utilizando uma areia natural quartzosa, de procedência conhecida e reconhecida como de boa qualidade, de uso corrente em obras de concreto na região da Grande BH;
- Seções polidas e lâminas delgadas em argamassa para análise de microscopia ótica.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Caracterização química

A Tabela 1 apresenta a composição química do rejeito de sinter-feed. O material, após a separação do ferro pelo processo de rolo magnético, ainda apresenta grande quantidade deste elemento, na condição de não magnético, razão pela qual este processo é ineficaz para uma separação mais otimizada.

**Tabela 1 - Composição percentual química do rejeito de sinter-feed.**

Elementos/Óxidos					
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	PPC
55,85	14,78	1,65	0,16	0,44	2,68

PPC = perda por calcinação.

## Difração de raios-X

Esta análise teve por objetivo identificar qualitativamente as fases mineralógicas presentes na amostra. A caracterização mineralógica do rejeito, realizada por difratometria de raios-X, foi executada no Laboratório de Mineralogia e Difratometria de Raios-X do CETEC, em Belo Horizonte, sendo apresentado a seguir o difratograma obtido, no qual foram nominados os picos mais relevantes.

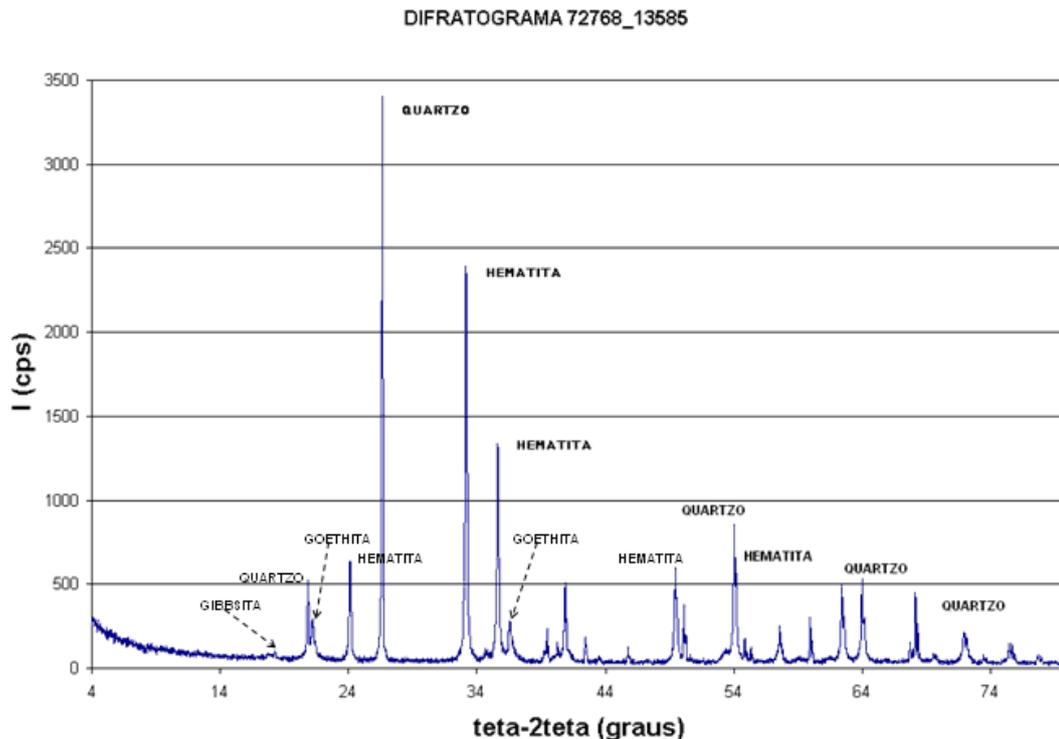


Figura 2 - Difratograma de raios-X de amostra do rejeito.

Trata-se de material que apresenta fases cristalinas compostas, em sua maior parte, por hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e quartzo (SiO<sub>2</sub>). Apresenta também pequena quantidade de goethita (FeO(OH)) e traços de gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>).

## Lixiviação e solubilização do resíduo

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados do ensaio de lixiviação e de solubilização do rejeito de sinter-feed e os valores máximos permitidos segundo a norma NBR 10004.

**Tabela 2 - Ensaio de lixiviação do rejeito de sinter-feed**

PARÂMETRO	Rejeito (mg/l)	Valor Máximo Permitido (mg/l)
Prata	< 0,01	5,0
Bário	0,007	70,0
Cromo	< 0,04	5,0
Arsênio	< 0,0003	1,0
Cádmio	< 0,0005	0,5
Chumbo	< 0,005	1,0
Mercúrio	< 0,20	0,1
Selênio	< 0,0005	1,0

**Tabela 3 - Ensaio de solubilização do rejeito de sinter-feed**

PARÂMETRO	A (mg/l)	B (mg/l)	Valor Máximo Permitido (mg/l)
Prata	< 0,01	< 0,01	0,05
Alumínio	< 0,10	< 0,10	0,2
Bário	0,005	0,007	0,7
Cromo	< 0,04	< 0,04	0,05
Cobre	< 0,004	< 0,004	2,0
Ferro	< 0,03	0,08	0,3
Manganês	< 0,012	0,018	0,1
Sódio	< 0,45	0,93	200,0
Zinco	< 0,05	0,15	5,0
Mercúrio	< 0,20	< 0,20	0,001
Selênio	< 0,0005	< 0,0005	0,01
Arsênio	< 0,0003	< 0,0003	0,01
Chumbo	< 0,005	< 0,005	0,01
Cádmio	< 0,0005	< 0,0005	0,005

O rejeito de sinter-feed não apresentou nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água segundo a norma NBR 10004. Com base nos resultados obtidos, rejeito de sinter-feed classifica-se como classe II B, correspondente aos resíduos inertes.

### **Caracterização mineralógica**

Na caracterização mineralógica do rejeito, obtida por difração de raios-X, foram obtidos os minerais seguintes: maiores constituintes: hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e quartzo (SiO<sub>2</sub>); menor constituinte: goethita (FeO(OH)); constituinte traço: gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>).

## Reatividade álcali-agregado

A Tabela 4 apresenta o resultado do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado para o rejeito de sinter-feed. O ensaio visa verificar, por método químico, a reatividade potencial de agregados com os álcalis do cimento Portland, através da reação entre uma solução de hidróxido de sódio 1N com o agregado. Os resultados são expressos pela quantidade de sílica dissolvida e pela redução da alcalinidade, podendo ser classificado como inócuo, deletério ou potencialmente deletério. Os resultados obtidos indicam que o rejeito de sinter-feed pode ser considerado inócuo.

**Tabela 4 - Reatividade álcali-agregado do rejeito de sinter-feed**

<b>Amostra</b>	<b>Sílica dissolvida (milimoles/litro)</b>	<b>Redução de alcalinidade (milimoles/litro)</b>
01	7	446

## Ensaio acelerado de durabilidade do agregado sinter-feed

Trata-se de um ensaio químico acelerado, que visa medir o desgaste total do agregado, por sua perda de massa, por faixas granulométricas, após ciclos de lavagem em soluções sulfatadas (sulfato de magnésio). O rejeito de sinter-feed apresentou desgaste de 2%, valor bastante inferior aos 12%, máximo permitido pelas especificações.

## Composição granulométrica

A Tabela 5 apresenta as composições granulométricas do rejeito de sinter-feed e de uma areia lavada considerada de boa procedência, obtidas pelo método de peneiramento e os valores especificados para agregados para concretos, de acordo com a norma NBR 7211. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas destes materiais.

**Tabela 5 - Composição granulométrica: rejeito de sinter-feed e areia lavada**

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>					
	<b>Rejeito</b>	<b>Areia</b>	<b>Faixa Utilizável</b>		<b>Faixa Ótima</b>	
<b>Inferior</b>			<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	2	0	0	7	0	0
4,8	7	0	0	10	0	5
2,4	25	2	0	25	10	20
1,2	47	8	5	50	20	30
0,6	68	42	15	70	35	55
0,3	77	91	50	95	65	85
0,15	83	99	85	100	90	95
<b>Mód. Fin.</b>	3,07	2,42				
<b>Ø Máx.</b>	6,3	2,4				

O rejeito apresenta granulometria de uma areia grossa, próxima ao limite superior da faixa utilizável, tendo esta amostra o diâmetro máximo de 6,3 mm e módulo de finura de 3,07. A areia tomada como referência é média, situando-se quase que integralmente na faixa utilizável, com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura de 2,42. Portanto, o rejeito de sinter-feed é mais grosso que a areia lavada tomada para comparação.

### **Massa específica e massa unitária**

A massa específica e a massa unitária são parâmetros importantes através do qual se classificam os agregados em leves, normais ou pesados (Mehta e Monteiro, 1994). A massa específica é um parâmetro que propicia o cálculo teórico do consumo de cimento por m<sup>3</sup> dos traços de concreto. O rejeito de sinter-feed possui massa específica igual a 3,756 kg/dm<sup>3</sup>, superior a 2,653 kg/dm<sup>3</sup>, obtida para a areia. A massa unitária (aparente) trata-se de parâmetro importante para o estabelecimento dos traços de concreto em volume, a partir das dosagens experimentais desenvolvidas. O rejeito de sinter-feed possui massa unitária igual a 1,862 kg/dm<sup>3</sup>, superior a 1,326 kg/dm<sup>3</sup>, obtida para a areia. Desta forma, o rejeito classifica-se como agregado pesado e que, por conseguinte, conduzirá a peças de concreto de peso mais elevado. A elevada densidade do rejeito em relação às areias está relacionada, diretamente, ao seu ainda elevado teor de ferro, cuja separação não foi possível pelo processo de rolo magnético comumente utilizado. Para melhorar este aspecto, seria exigida a montagem de uma instalação de jig, que possibilitaria uma separação maior do minério de ferro por sistema gravimétrico, mas que, em contrapartida, resultaria em elevado consumo de água e também investimentos, cuja relação custo/benefício, certamente, não justificou sua adoção até pouco tempo atrás. Atualmente, algumas mineradoras já cogitam deste processamento adicional, o que certamente incorporará características ainda mais vantajosas ao emprego deste rejeito.

Para se avaliar a ordem de grandeza deste aumento de peso, foram comparadas as densidades das argamassas, a partir de corpos de prova adensados e no estado endurecido, produzidas com uma areia lavada média convencional e com a produzida com o rejeito de sinter-feed. A massa específica média da primeira foi de 2,112 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que a da segunda foi de 2,780 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, a argamassa com rejeito mostrou-se 31,65% mais pesada. Por esta razão, não se vislumbra, em princípio, uma utilização interessante deste material como agregado de uso corrente em obras de concreto armado, pois implicaria num peso próprio estrutural bastante superior ao usualmente considerado nos projetos e obras comuns, com as consequências naturais que isto implicaria e seus desdobramentos.

Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação, a serem aplicados diretamente sobre o terreno, além das vantagens de ordem ecológica da utilização do rejeito, contribuiria, também, para uma maior estabilidade da pavimentação, à medida que constituiria pavimentos com maior peso próprio, menos sujeitos às deformações decorrentes das solicitações externas. Outra aplicação viável para este material seria na produção de blocos de concreto destinados às alvenarias em edificações térreas, onde este acréscimo de peso, descarregado diretamente sobre o terreno, não constituiria aumento relevante de custos.

Do ponto de vista estético, na pavimentação, por exemplo, o emprego deste rejeito confere às peças uma coloração amarronzada clara, bastante interessante e que após o seu assentamento deixa o pavimento menos sujeito às marcas de uso e eventual incrustação de sujeira adquirida com o tempo.

### **Teor de argila em torrões e materiais friáveis**

É uma verificação importante que visa quantificar eventuais contaminações do agregado com argila ou materiais friáveis, que durante o processamento do concreto podem destorroar-se em finos, comprometendo a dosagem de água e cimento, a

trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto. A amostra de rejeito é isenta de torrões de argila e materiais friáveis. A norma brasileira estabelece um percentual máximo de 3% contido nos agregados para concretos.

### **Teor de materiais pulverulentos**

Semelhantemente aos torrões de argila, o material pulverulento, embora necessariamente não constitua contaminação, mas quando em excesso e dependendo das características desejadas na composição granulométrica, pode constituir-se em excesso de finos que, eventualmente, poderá comprometer a trabalhabilidade do concreto, bem como a sua resistência mecânica. A norma brasileira estabelece para este quesito um percentual máximo de 3% para os concretos sujeitos ao desgaste superficial e 5% para concretos protegidos deste desgaste. Para agregados oriundos de processos industriais, estes percentuais são elevados para 10% e 12%, respectivamente. O rejeito de sinter-feed apresenta 13,7% de materiais pulverulentos, ou seja, partículas abaixo de 75  $\mu\text{m}$ , estando minimamente acima do limite especificado.

### **Impurezas orgânicas**

As impurezas orgânicas podem afetar as reações de hidratação do cimento e a formação de seus principais compostos, comprometendo a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos. A norma brasileira estabelece o máximo de 300 ppm na amostra de agregado (por meio colorimétrico) e, no ensaio, quando o agregado apresenta resultado superior ao valor máximo deve ser procedido ao ensaio de qualidade do agregado, avaliando-se a resistência à compressão de argamassas contendo o agregado. A solução de hidróxido de sódio em contato com o rejeito de sinter-feed apresentou coloração mais clara que a solução padrão, indicando, desta forma, baixo teor de matéria orgânica.

### **Ensaio de qualidade do agregado miúdo pelo comparativo de resistência à compressão de argamassas**

Apesar do rejeito de sinter-feed apresentar baixo teor de matéria orgânica, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial de argamassas contendo este rejeito e areia quartzosa. Devido à significativa diferença de densidade dos materiais comparados, para este teste, foi necessário um ajuste na proporção utilizada dos mesmos, de forma a igualar os volumes de material contido nas argamassas produzidas. Assim, as argamassas trabalhadas foram produzidas nos seguintes traços, em massa, (cimento, agregado e água), o que correspondeu ao mesmo volume de agregados:

- argamassa com areia quartzosa: 1 : 2,35 : 0,60
- argamassa com rejeito de sinter-feed: 1 : 3,30 : 0,60

A relação água/cimento adotada para as ambas as argamassas foi 0,60 e foi utilizado o cimento Portland CII-E-32, que pode apresentar em sua composição um percentual de até 34% de escória de alto-forno. Foram moldados 04 (quatro) corpos de prova de diâmetro 50 mm x 100 mm para rompimento nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. A Figura 2 apresenta os resultados das resistências obtidas. A argamassa contendo o rejeito apresenta maior resistência à compressão axial que a argamassa de referência, evidenciando o bom desempenho da argamassa com rejeito com relação às propriedades mecânicas.

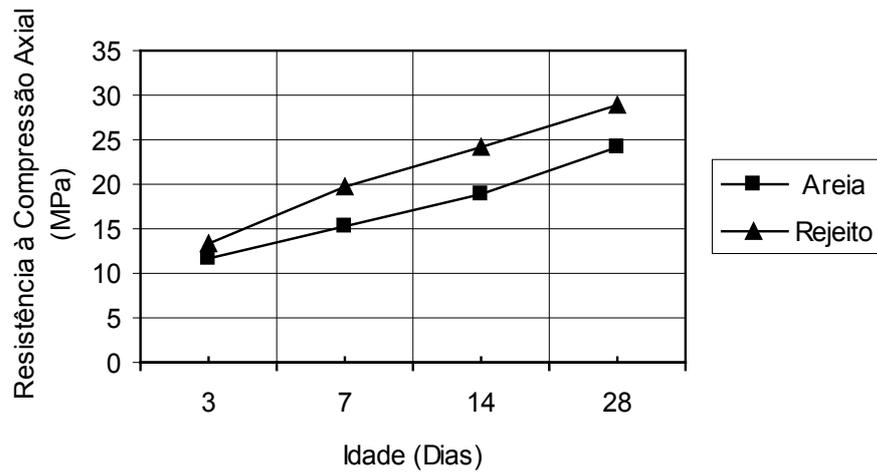


Figura 4 - Resistência à compressão axial das argamassas com areia lavada e rejeito de sinter-feed.

### Análise microestrutural da argamassa com rejeito

Foi realizada uma análise microestrutural da argamassa contendo o rejeito de sinter-feed. A primeira técnica adotada foi microscopia óptica. Foram feitos cortes transversais na argamassa e preparada secção polida para análise por luz refletida (Figura 5) e lâmina delgada para análise por luz transmitida (Figura 6). A técnica da microscopia óptica foi utilizada visando não apenas verificar os minerais existentes, inclusive os que não são cristalinos e não detectados na difração por raios-X, mas também, para estabelecer uma quantificação volumétrica dos mesmos. Os resultados encontrados estão na Tabela 6. Os minerais essenciais encontrados são goethita, hematita e quartzo e os minerais acessórios são magnetita, caulinita e turmalina. Os minerais e associações de fases significativos são: magnetita em estágio avançado de alteração para hematita (martitização); e hematita intercrescida com goethita.

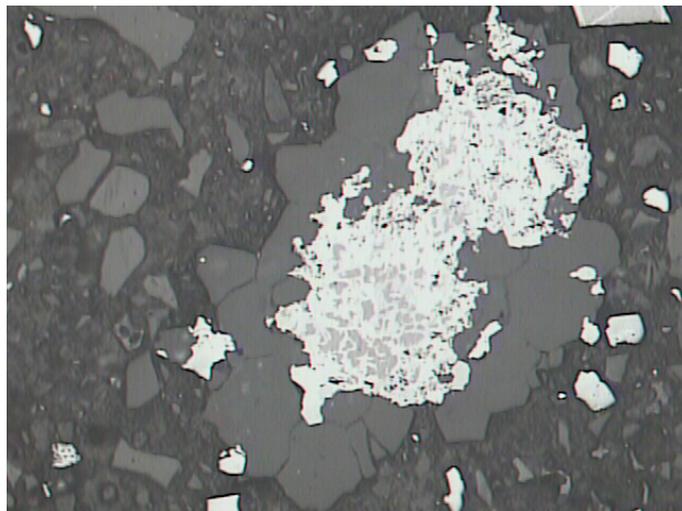
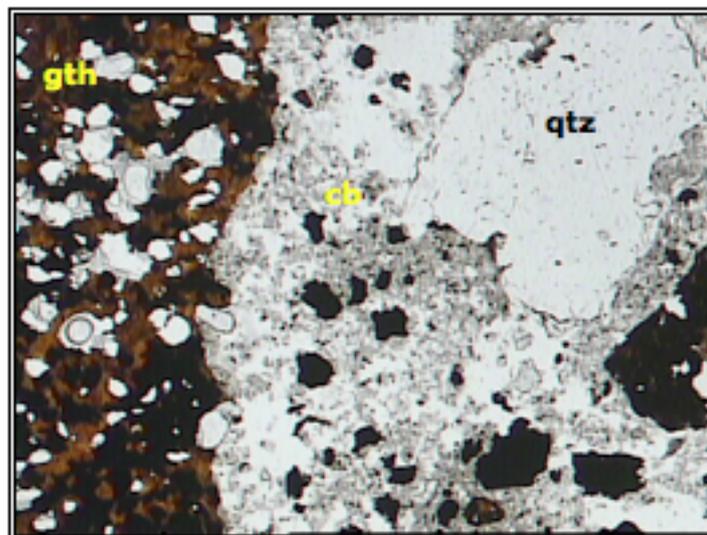


Figura 5 - Fotomicrografia – secção polida – luz refletida – aumento 200X.



gth: goethita  
qtz: quartzo  
cb: carbonato

Figura 6 - Fotomicrografia – lâmina delgada – luz transmitida – aumento 50X.

**Tabela 6 - Quantificação volumétrica dos minerais**

Mineral	Seção Polida	Lâmina Delgada	Média
Hematita	26,61%	22,00%	24,30%
Goethita	44,96%	37,86%	41,41%
Quartzo	19,74%	38,05%	29,89%
Magnetita	0,25%	0,10%	0,17%
Caulinita	0,78%	0,36%	0,57%
Quartzo misto (não liberado)	7,66%	1,63%	4,66%
Turmalina	aglomerados de cristais anédricos a subédricos		raro

a) Descrição em seção polida:

- quartzo anédrico de granulometria variando desde muito fina (<0,01mm) a muito grossa (>0,22mm) ocorrendo liberado e disseminado pela amostra;
- hematita de granulação inferior à do quartzo, ocorrendo de forma liberada;
- goethita de pouco a muito porosa, apresentando-se associada à hematita;
- magnetita ocorrendo somente como restos nas hematitas;
- partículas mistas compostas por goethita, hematita, quartzo;
- caulinita associada à goethita.

A fotomicrografia apresenta hematita martítica com restos de magnetita inclusa/ associada ao quartzo.

b) Descrição em lâmina delgada:

- Existência de todos os constituintes identificados na seção polida, imersos em uma matriz finíssima de provável carbonato (matriz de cimento).

A fotomicrografia apresenta partícula com goethita, quartzo, opacos e aspectos da matriz.

A segunda técnica utilizada para a caracterização microestrutural da argamassa contendo o rejeito de sinter-feed foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando, neste caso, imagens de elétrons secundários (IES).

A fotomicrografia da figura 7 mostra a interface entre uma partícula de sinter-feed e a matriz cimentícia. O material ferrífero é bastante compacto, mostrando apenas alguns poros na região superior; um destes poros mostra penetração de material da matriz, sob a forma de fitas alongadas de etringita. A matriz cimentícia também está relativamente compacta, com alguns poros angulosos de arrancamento de partículas pequenas. Um poro grande originário de bolha de ar é visível na região superior direita e um bem menor mais abaixo.

A interface entre as partículas ferríferas e a matriz mostra aspectos positivos, principalmente a ausência de poros e fissuras. O detalhe ilustrado na figura 8 evidencia bem isto e também a uniformidade e boa aderência do contato. Pode-se mesmo identificar algumas agulhas de etringita na parte central da interface, nesta figura.

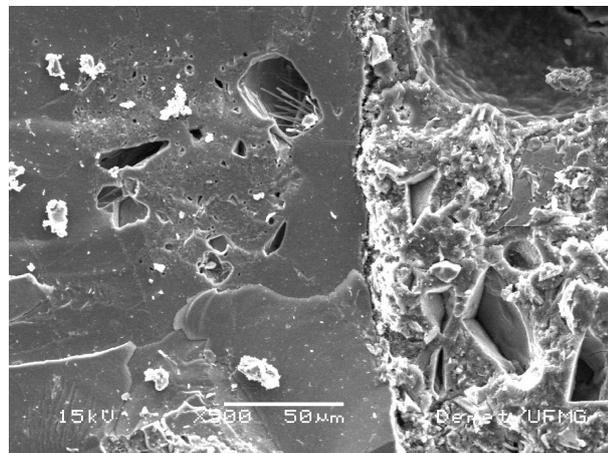


Figura 7 - Fotomicrografia da interface entre uma partícula do rejeito ferrífero (à esquerda) e a matriz da argamassa (à direita). MEV-IES, 500X.

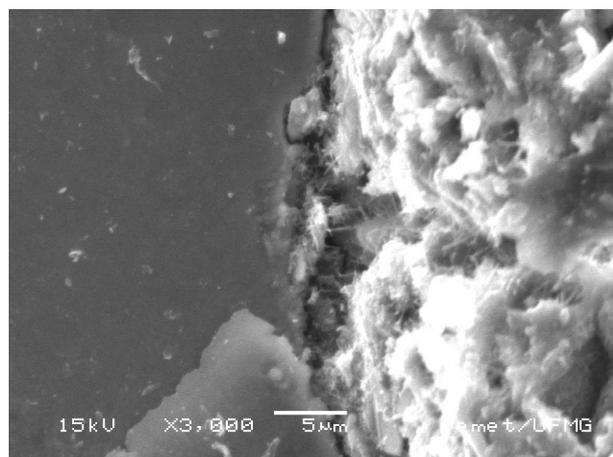


Figura 8 - Fotomicrografia, mostrando detalhe da foto anterior, da interface entre uma partícula do rejeito ferrífero (à esquerda) e a matriz da argamassa (à direita). MEV-IES, 3000X.

## CONCLUSÕES

Os estudos mineralógicos realizados nas amostras do rejeito (difração de raios-X) e em corpos de prova de argamassa (microscopia óptica) definem a composição predominante do rejeito em hematita, quartzo e goethita.

Com relação à classificação ambiental, o rejeito de sinter-feed classifica-se como classe II B, correspondente aos resíduos inertes.

No ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, o rejeito apresentou excelente desempenho, podendo ser considerado como agregado inócuo. No ensaio de durabilidade do agregado, realizado pela avaliação da resistência a sulfatos, o rejeito atendeu aos requisitos, apresentando desgaste bastante inferior ao limite máximo estabelecido por norma, quando submetido ao sulfato de magnésio, que é um ambiente mais agressivo.

O rejeito apresenta granulometria de uma areia grossa, próxima ao limite superior da faixa utilizável. É isento de torrões de argila e materiais friáveis, porém, seu teor de materiais pulverulentos está muito pouco acima do estabelecido por norma, não comprometendo o desempenho das argamassas.

Em relação a sua densidade, o rejeito classifica-se como agregado pesado e que, por conseguinte, conduzirá a peças de concreto de peso mais elevado. A elevada densidade do rejeito está relacionada, principalmente, ao seu elevado teor de ferro cuja separação não foi possível pelo processo de separação magnética. Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação, aplicados diretamente sobre o terreno, o rejeito contribuiria para uma maior estabilidade da pavimentação, à medida que constituiria pavimentos com maior peso próprio, menos sujeitos às deformações decorrentes das solicitações externas. Não apenas em pavimentação, mas quaisquer obras de concreto assentes diretamente sobre o terreno se beneficiariam das vantagens de emprego deste agregado.

No ensaio de qualidade do agregado, a argamassa contendo o rejeito apresentou maior resistência à compressão axial que a argamassa de referência, evidenciando seu bom desempenho com relação às propriedades mecânicas.

No geral, o rejeito de sinter-feed apresentou desempenho satisfatório com relação às propriedades físicas, técnicas e ambientais, o que favorece seu emprego na fabricação de elementos para fabricação de concretos para pavimentação. Devido ao seu maior peso em relação aos agregados convencionais, maior economia seria obtida na condição de produção dos elementos de concreto no próprio local de aplicação, geralmente viável em empreendimentos tais como conjuntos habitacionais, implantação de novos bairros e pavimentação de novas ruas, evitando-se o custo adicional do transporte.

A adequabilidade e refinamento do emprego deste rejeito como agregado (obtida pela determinação do traço ideal, do ajuste da granulometria mais adequada, eventuais correções de finos e do diâmetro máximo do agregado), que integraram a conclusão dos estudos desenvolvidos, embora não tenham constituído objeto desta etapa inicial, podem ser facilmente obtidas pelas práticas de ajuste de produção dos concretos. As experiências realizadas na produção de peças pré-moldadas e suas aplicações (Cruz, 2003) são demonstrações efetivas desta realidade já empregada para os agregados convencionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, P. de L. S. – Sustentabilidade Ambiental e Habitação para Todos. CONSTRUINDO, v.1, n.1, pag. 36-39, jan-jul. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). ET 27 – Pavimentação com blocos pré-moldados de concreto, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 9774: Agregado - Verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR NM 49: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 11578: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 7211: Agregados para o Concreto – Especificação, 1987.

ABNT NBR 7221: Agregados – Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER): ME 089 – Ensaio acelerado de durabilidade do agregado.

Ferro – Produção. Disponível em: <[www.ibram.org.br/sites/7001784100001361.pdf](http://www.ibram.org.br/sites/7001784100001361.pdf)> acesso em: 06 out. 2008.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais. PINI. 1994.

QUARESMA, L.F. Ferro – Balanço Mineral Brasileiro 2001. Disponível em:

<[www.dnpm.gov.br/assets/galeriadodocumento/balançomineral2001/ferro.pdf](http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadodocumento/balançomineral2001/ferro.pdf)> acesso em: 06 out. 2008.