

# Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings

## *Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed*



A. V. COSTA<sup>a</sup>  
ayrton@ufmg.br

A. G. GUMIERI<sup>a</sup>  
adriana@demic.ufmg.br

P. R. G. BRANDÃO<sup>a</sup>  
pbrandao@demin.ufmg.br

### Abstract

This paper discusses the technical feasibility and ecological advantage of using sinter feed tailings from iron ore mining as an aggregate in the production of concrete, initially to manufacture precast concrete pavers, but with the possibility of extending its use to other applications. To achieve this goal, the physical, chemical and environmental characteristics of the tailings were analyzed. The other aggregates used here were also characterized, and the tailings were quality tested when used as fine aggregate in the production of mortars, based on a comparison of their compressive strength. The interlocking concrete pavers were manufactured by a precast concrete plant, after which they were sampled and subjected to compressive strength, water absorption and abrasive wear tests, according to Brazilian technical standards NBR 9780 [33], NBR 12118 [34] and NBR 12042 [35]. The results of these tests indicated that, compared to the reference values, the compressive strength at 28 days varied from -2.5% to -11%; water absorption ranged from -14% to +3.8%; and abrasive wear varied from -80% to -62%. The main purpose of using sinter feed tailings as aggregate in concrete production is to ensure the sustainable development of the construction industry. For the iron ore mining industry, the productive disposal of these tailings represents a major advantage in cost-effectiveness, due to the elimination of stockpiles and of the costs involved in their operationalization.

**Keywords:** mining; wastes; sinter feed tailings; paving; interlocking concrete pavers.

### Resumo

O presente trabalho apresenta a viabilidade técnica do aproveitamento e da conveniência ecológica do emprego do rejeito de sinter feed, oriundo de atividades mineradoras de ferro, como agregado na produção do concreto, inicialmente para a fabricação de elementos pré-fabricados destinados à pavimentação, com possibilidade de expansão para outras finalidades. Inicialmente, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização dos materiais: caracterização física, química e ambiental do rejeito, caracterização física dos demais agregados utilizados e ensaio de qualidade do rejeito quando empregado como agregado miúdo na produção de argamassas, por comparativo de resistência à compressão das mesmas. Posteriormente, após a produção de peças para piso intertravado, em uma indústria de pré-fabricados, os mesmos foram amostrados e submetidos aos ensaios resistência à compressão, absorção e desgaste por abrasão, segundo as normas NBR 9780 [33], NBR 12118 [34] e NBR 12042 [35]. Quanto aos resultados, as resistências à compressão aos 28 dias, sofreram variações entre -2,5% e -11%; quanto às absorções de água, as variações ficaram entre -14% e +3,8%; quanto à abrasão, observaram-se variações entre -80% e -62%, percentuais estes referidos sempre aos valores de referência. A grande relevância do uso do rejeito de sinter feed como agregado na produção de concreto se refere ao desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil. Para as indústrias mineradoras, o descarte desse rejeito de maneira produtiva significa grande vantagem na relação custo-benefício que se caracterizará pela ausência tanto das pilhas de estocagem em suas áreas quanto pela ausência de despesas com sua operacionalização.

**Palavras-chave:** mineração, rejeito, sinter feed, pavimentação, piso intertravado.

<sup>a</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1. Introdução

A busca por uma destinação útil aos resíduos e rejeitos oriundos da produção de indústrias siderúrgicas e mineradoras tem sido uma preocupação constante por parte das empresas que se dedicam a estas atividades, de ambientalistas, bem como órgãos de controle e instituições de pesquisas, interessados na preservação do meio ambiente. Como exemplo, na siderurgia já é consagrado o grande avanço estabelecido pelo aproveitamento de determinadas escórias como componentes importantes para produção de cimentos Portland, contribuindo para significativas economias em sua produção, melhoria de suas características e, principalmente, para a utilização inteligente de resíduos oriundos das indústrias siderúrgicas.

Também na área da mineração de calcário e gnaiss, aquilo que um dia foi rejeito na produção das britas para emprego nos concretos, hoje, graças a pequeno investimento e estabelecimento de mais uma fase de beneficiamento das frações finas da britagem, constitui-se com crescente aceitação pelo mercado nas areias artificiais. As areias calcáreas, por exemplo, com o seu emprego substituindo parte das areias naturais provenientes dos rios, incorpora significativas melhorias nas propriedades dos concretos e argamassas, ao mesmo tempo em que estabelece também uma desejável economia no consumo deste bem natural, finito e não renovável. Não apenas nos setores da mineração e siderurgia, mas também na própria construção civil a busca constante pelo aproveitamento de seus rejeitos e resíduos ocupa hoje lugar de destaque na pesquisa e busca de tecnologia de novos materiais que contribuam para a sustentabilidade ambiental. Segundo [1]:

"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 deste setor no desenvolvimento sustentável."(Alcântara, 2009, pag 36)

Nas aplicações pioneiras de indústrias mineradoras, os rejeitos de sua produção e beneficiamento eram descartados em grandes volumes nos leitos dos rios, tendo os procedimentos de disposição evoluídos para sistemas de contenção, realizados sem qualquer controle. Entretanto, com o avanço das legislações ambientais e, principalmente, após o registro de rupturas de barragens e pilhas de rejeitos associadas a grandes impactos ambientais, as empresas mineradoras passaram a conceber esses sistemas como obras de engenharia. Por consequência, passaram a destinar maior interesse no atendimento à legislação no sentido de alternativas mais seguras para a contenção de seus resíduos [2]. Neste contexto o aproveitamento de rejeitos surge como fator de redução de custos das mineradoras, fonte adicional de renda e atitude de melhoria da qualidade ambiental.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto empregadas em pavimentação. São apresentadas as características do rejeito bem como o desempenho mecânico e a durabilidade de peças pré-fabricadas para pavimentação produzidas com o mesmo.

## 2. Revisão bibliográfica

Na região central do Estado de Minas Gerais, localiza-se uma área com aproximadamente 7.160 km<sup>2</sup>, denominada Quadrilátero Ferrífero, de grande importância do ponto de vista econômico e ambiental, sendo suas reservas de minério de ferro avaliadas em aproximadamente 29 bilhões de toneladas. Além de abrigar grandes mineradoras de ferro, no Quadrilátero Ferrífero também estão presentes empreendimentos de mineração de inúmeros outros tipos de rochas e substâncias minerais. Trata-se de uma das mais importantes províncias minerais produtivas do país e a mais conhecida em termos geológicos [3] e [2].

O Brasil é o sexto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro, com quase 7% das reservas mundiais e o segundo maior produtor de minério de ferro, com 19% da produção mundial. Em 2007, o país produziu 350 milhões de toneladas, equivalentes a 18,42% da produção mundial, que é de 1,9 bilhões de toneladas [4]. 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 os minérios mais finos. Os principais processos de aglomeração são a sinterização e a pelletização. Na sinterização são obtidos minérios *sinter feed* (0,15 a 6,35 mm) e na pelletização são obtidos minérios *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 alto-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 [5]. Em ambos os processos são geradas expressivas quantidades de rejeitos; os granulares dispostos em pilhas e os finos, pulverulentos, dispostos em barragens. O setor siderúrgico possui grande importância econômica, gerando riquezas e milhares de empregos. No entanto, essa atividade industrial produz enormes quantidades de resíduos, tornando-se necessário o uso de tecnologias limpas para a redução de sua geração, o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias que viabilizem seu reaproveitamento e/ou reciclagem de maneira segura, econômica e ecológica. Uma solução viável para a redução do impacto ambiental é seu aproveitamento como agregados na construção civil [6].

A indústria da construção civil tem sido responsável por cerca de 20% dos recursos naturais extraídos da natureza e, nesse contexto, a utilização de resíduos como substituição das matérias-primas pode reduzir a quantidade dessa extração, substituindo, em grande parte, os agregados naturais empregados em concretos, argamassas, blocos, *pavers*, barreiras de contenção e bases para pavimentação [7].

O rejeito de *sinter feed* é um resíduo granular do processo de produção do minério de ferro que, até o momento, não apresenta

nenhum tipo de aproveitamento com regular demanda comercial. Durante o processo de produção do minério de ferro, este material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, gerando um rejeito sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica. 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 ao seu manuseio, transporte interno, disposição e estoque, controle e acompanhamento ambientais. Em média, as pilhas de rejeito de *sinter feed* apresentam alturas que equivalem a uma construção residencial de cinco ou seis andares de altura e em extensões consideráveis. O rejeito de *sinter feed*, no geral, contém, ainda, significativa quantidade de ferro, cuja maior separação não é possível apenas pelo processo de rolo magnético, usualmente existente e utilizado no processo de beneficiamento do minério. Para tanto, exigiria a montagem de uma instalação de jig, que possibilitaria uma separação maior do minério de ferro através de sistema gravimétrico, mas que, em contrapartida, resultaria em elevado consumo de água e também de investimentos, cuja relação custo/benefício não justificou sua adoção generalizada até o momento. Os agregados para concretos são classificados como artificiais ou naturais, sendo artificiais as areias e pedras provenientes do britagem de rochas. Como exemplos de naturais, podem ser citados as areias extraídas de rios ou barrancos e os seixos rolados. Outro fator que define a classificação dos agregados é sua massa unitária (ou massa específica aparente), podendo ser divididos em leves (argila expandida, pedra-pomes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita). Agregados que pesam menos que  $1.120\text{kg/m}^3$  são geralmente considerados leves e encontram aplicação na produção de vários tipos de concretos leves. Os normais possuem densidade de  $1.520$  a  $1.680\text{ kg/m}^3$  e produzem o “concreto normal” com aproximadamente  $2.400\text{ kg/m}^3$  de peso unitário. Comparado ao agregado de peso normal, o concreto pesado varia de  $2.900$  a  $6.100\text{ kg/m}^3$ , sendo utilizado, geralmente em locais destinados à radiação nuclear [8]. KAMAL et al. [9] descrevem a influência da composição granulométrica dos agregados na distribuição de vazios em pavimentos flexíveis. Como resultado da pesquisa, os autores propõem ajustes na graduação de determinados agregados visando melhoria no desempenho dos pavimentos.

Devido à ocorrência de ferro (na condição de não magnético) no rejeito de *sinter feed*, esse material apresenta massa unitária superior aos materiais arenosos utilizados correntemente na produção de concretos. Devido a este aumento de peso do material, não se vislumbra, em princípio, sua utilização como agregado para o emprego corrente em obras de concreto armado. Seu uso implicaria em estruturas com peso próprio estrutural superior ao usualmente considerado nos projetos e obras comuns, implicando em seu dimensionamento e seus desdobramentos. Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação e outras aplicações diretamente sobre o terreno, além das vantagens de ordem ecológica, contribuiria também para maior estabilidade da pavimentação, na medida em que constituiria pavimentos com peso próprio pouco maior e menos sujeitos a deformações decorrentes das solicitações externas.

Embora os resíduos industriais possuam diversas aplicações em construções de estradas e pavimentos, as vantagens de suas aplicações não são freqüentemente entendidas, uma vez que a maioria dos resíduos não são regulamentados e os mesmos, geralmente,

são aplicados de acordo com soluções individuais [10]. A disposição de rejeitos de mineração propicia problemas econômicos, ambientais e legislativos para as empresas mineradoras. Para obtenção da sustentabilidade, esses resíduos devem ser efetivos em suas aplicações. [11]. ISMAIL e AL-HASHMI [12] demonstraram que o uso de rejeitos de mineração de ferro como substituição de agregados miúdos em concretos apresentaram melhores resistências mecânicas quando comparados aos concretos convencionais. ISMAIL e AL-HASHMI [13] também apresentam estudos de aplicações da mistura de resíduos de mineração de ferro e de plásticos em concretos.

Os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, estando esse mercado em crescimento no Brasil, tanto na construção como na reconstrução e reabilitação desse tipo de instalação urbana. Segundo Oliveira e Souza [6], quando adequadamente instalados, os pavimentos resistem à sua movimentação, afundamento ou quebra, possibilitando, dessa forma, que se tenha uma excelente superfície para caminhar, andar de bicicleta, promover trânsito de carros, caminhões, e até mesmo de empilhadeiras industriais. O emprego de peças furadas é ecologicamente correto, pois os furos permitem o retorno das águas de chuva para o solo, evitando sua perda com o escoamento; quando pigmentados favorecem marcações permanentes em estacionamentos, em cruzamentos de pedestres, pistas de tráfegos e outras áreas que necessitam de identificação; possuem manutenção simplificada, pois as peças do pavimento são recolocadas nos seus locais originais após o reparo, sem necessidade de outras adicionais.

No Brasil, a técnica de pavimentos intertravados surgiu nos anos 70, mas sua aplicação muitas vezes não obedeceu aos critérios técnicos mínimos necessários recomendáveis, prejudicando a imagem dos elementos de concreto para a pavimentação. Enquanto isso, em diversos outros países, cresceu o emprego do pavimento com peças pré-moldadas de concreto, notando-se grande desenvolvimento nas técnicas de dimensionamento, construção, materiais e também na normalização [14]. Segundo Copel [15], os principais benefícios da aplicação do pavimento intertravado com pavers de concreto tanto para o tráfego de pessoas como para veículos pesados são: permeabilidade e conforto térmico; utilização imediata com liberação do tráfego logo após sua aplicação; facilidade de manutenção, remoção e reutilização; segurança, uma vez que sua superfície é antiderrapante; versatilidade arquitetônica, apresentando vários tipos, cores e combinações; fácil assentamento e alta durabilidade.

A inexistência de limitações quanto à capacidade de suporte do pavimento, aliada às muitas opções de formato, padrões, cores e matizes disponíveis para permitir infindáveis possibilidades estéticas assegura à pavimentação êxito absoluto em praças, parques, jardins, calçadas, estacionamentos, vias urbanas, pátios, depósitos, galpões industriais, estradas, acostamentos, entre outros [7]. Conforme Piorotti [16], a vida útil do pavimento pré-moldado de concreto é bastante elevada. Considerando projetos apropriados para sub-base, elementos de boa qualidade e adequado assentamento, pode-se ter uma pavimentação com vida útil de pelo menos 25 anos. Os blocos para pavimentos (também chamados de pavers ou pavimentos intertravados de concreto) apresentam deformação vertical inferior aos pavimentos flexíveis (asfálticos) de mesma espessura. A norma brasileira NBR 9781 [17] define características, dimensões e outros requisitos a serem observados relativamente a este material.

Tabela 1 – Composição química percentual média do rejeito de sinter feed

Elements/oxides – contents %					
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.

### 3. Programa experimental

#### 3.1 Caracterização do rejeito de sinter feed e dos agregados

Na primeira etapa do programa experimental foi desenvolvida a caracterização física, química e ambiental do rejeito utilizado na fabrica-

ção dos elementos de concreto intertravado. O rejeito foi amostrado no local de sua disposição, na área de mineração, segundo prescrições das normas brasileiras NBR 10007 [18] e NBR 7216 [19]. O material foi quarteado e preparado para os ensaios de caracterização. O rejeito de *sinter feed* é procedente de uma planta de mineração situada no município de Sarzedo, Minas Gerais, e representa o perfil típico dos rejeitos gerados na mineração de ferro da região.

##### 3.1.1 Composição química do rejeito

A Tabela 1 apresenta a composição química do rejeito de *sinter feed* obtida pela técnica de análise química por via úmida. 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 não é totalmente eficaz para uma concentração maior do Fe.

##### 3.1.2 Caracterização ambiental do rejeito

A caracterização ambiental do rejeito de *sinter feed* foi realizada por ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com as normas ABNT 10005 [20] e ABNT 10006 [21]. Sua classificação foi obtida conforme os critérios da norma ABNT 10004 [22]. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do rejeito e os limites máximos estabelecidos pelas normas. Nenhum de seus

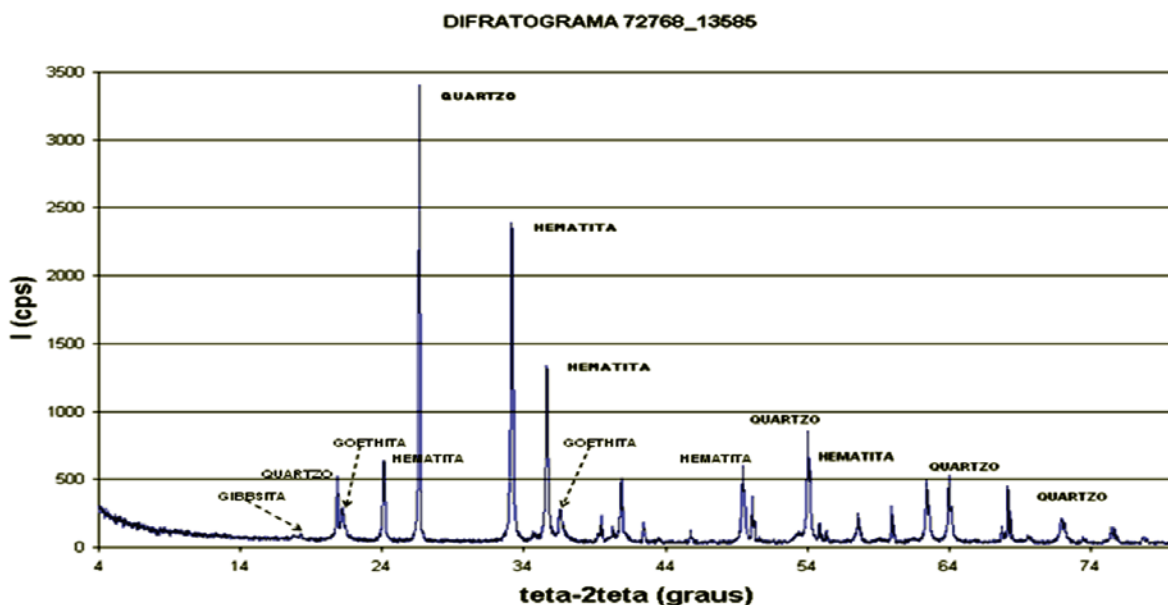
Tabela 2 – Lixiviação do rejeito e respectivos limites de norma

Parâmetro	Concentração (mg/l)	Limite máximo (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 (µg/l)	0,1
Selênio	<0,0005	1,0

Tabela 3 – Solubilização do rejeito e respectivos limites de norma

Parâmetro	Via A (mg/l)	Via B (mg/l)	Limite máximo (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 (µg/l)	<0,20 (µg/l)	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

Figura 1 – Difratoograma do rejeito



extratos apresentou concentração de seus constituintes acima dos padrões estabelecidos por norma, sendo o rejeito classificado como resíduo Classe II B, correspondente aos resíduos inertes.

### 3.1.3 Composição mineralógica do rejeito

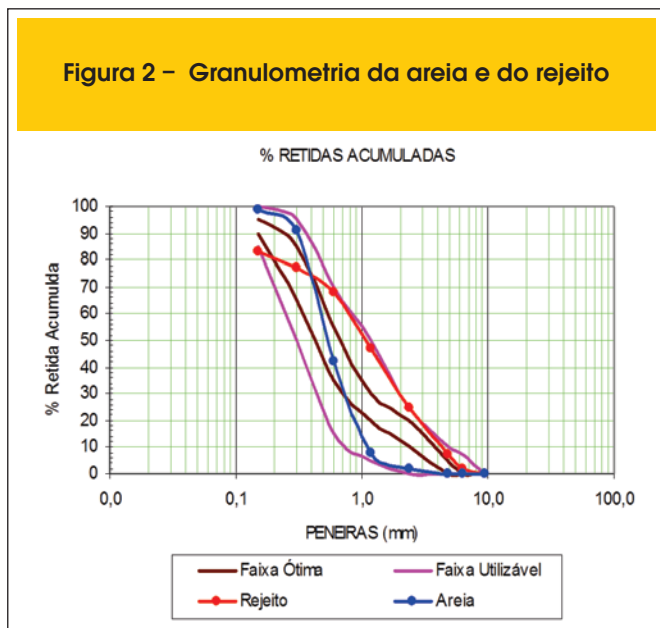
As fases mineralógicas presentes na amostra de rejeito foram identi-

Tabela 4 – Principais propriedades dos materiais

Propriedades	Resultados			
	Areia	Rejeito	Pó de pedra	Brita
Dimensão máxima característica (mm) NBR 7211 (ABNT 2005) (18)	2,4	6,3	6,3	9,5
Módulo de finura NBR 7211 (ABNT 2005) (18)	2,42	3,09	3,38	6,13
Reação alcali-agregado (mmol/litro) NBR 9774 (ABNT, 1987) (19)	-	*Sd = 7 *Ra=446	-	-
Resistência a sulfatos (%) DNER ME-089 (20)	-	2,01	-	-
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) NBR 9776 (ABNT, 1987) (21)	2,65	3,76	2,72	2,69
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) NBR 7251 (ABNT, 1982) (22)	1,33	1,86	1,30	1,43
Teor de argila em torrões (%) NBR 7218 (ABNT, 1987) (23)	0	0	0	0
Materiais pulverulentos (%) NBR 7219 (ABNT, 2003) (24)	0,6	13,7	-	-
Impurezas orgânicas (ppm) NBR 7220 (ABNT, 2001) (25)	≤300	≤300	-	-

\*Sd = Sílica dissolvida; \*Rd = Redução de alcalinidade; mmol = milimoles

Figura 2 – Granulometria da areia e do rejeito



cadav qualitativamente pelas técnicas de difração de raios-X. A Figura 1 apresenta o difratograma da amostra. O rejeito apresenta fases cristalinas compostas, em sua maior parte, por hematita ( $Fe_2O_3$ ) e quartzo ( $SiO_2$ ). Apresenta também menores quantidades de goethita ( $FeO(OH)$ ) e traços de gibbsita ( $Al(OH)_3$ ). Observa-se uma carência de dados na bibliografia corrente relativa à presença dos elementos identificados na constituição deste rejeito, uma vez que a maioria dos estudos tem como foco o produto *sinter feed* e não o seu rejeito.

### 3.1.4 Caracterização física dos agregados, pó de pedra e do rejeito

A Tabela 4 resume as principais propriedades dos materiais empregados na confecção dos *pavers*. Na Figura 2 estão apresentadas as granulometrias, obtidas segundo a NBR 7217 [31] para a amostra do rejeito e da areia natural tomada como referência para o ensaio de qualidade do agregado, no ensaio comparativo de resistência à compressão de argamassa.

A areia tomada como referência situa-se, quase que integralmente, na faixa utilizável da norma NBR 7211 [23], apresentando dimensão máxima igual a 2,4mm e módulo de finura igual a 2,42. Já o rejeito apresenta características de uma areia grossa, no limite superior da faixa ótima da norma NBR 7211 [23], tendo esta amostra a dimensão máxima característica igual a 6,3mm e módulo de finura igual a 3,09. No ensaio de granulometria, percebe-se, ainda, que o rejeito apresenta acentuada inflexão na curva das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras 0,3 e 0,15 mm, o que corresponde a uma acentuada redução das porcentagens retidas nestas peneiras. Eventualmente isto poderá requerer alguma correção de finos, através da mistura de uma areia fina, com o intuito de melhorar este aspecto da composição granulométrica, quando da produção de concreto. Contudo, no caso de uma eventual necessidade desta mistura, o tecnologista deverá estar atento para a possibilidade de ocorrer segregação na moldagem das peças, em decorrência da diferença dos pesos específicos destes agregados, tomando as providências para evitar esta ocorrência.

Nos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos, estabelecidos pela norma NBR 7211 [23], o rejeito atendeu aos requisitos de norma, com exceção apenas ao teor de material pulverulento, o que, contudo, não comprometeu seu desempenho, conforme pode ser visto no ensaio comparativo de resistência à compressão axial das argamassas. No caso de peças intertravadas de concreto, o elevado teor de finos contribui para a continuidade do tamanho das partículas, contribuindo para o efeito *filler* e auxiliando no empacotamento das partículas durante a prensagem das peças de concreto. O material pulverulento, embora necessariamente não constitua contaminação, quando em excesso e dependendo das características desejadas na composição granulométrica, eventualmente poderá comprometer a trabalhabilidade do concreto, bem como sua resistência mecânica. A norma NBR 7211 [23] estabelece um percentual máximo de material passante na peneira  $75\mu m$  igual a 3% para os concretos sujeitos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos deste desgaste. Para agregados oriundos de processos industriais, tal como o rejeito em estudo, estes percentuais são elevados para 10% e 12%, respectivamente. O rejeito estudado, já incorporando em sua granulometria um teor de material pulverulento da ordem de 14%, em nada compromete sua utilização para a finalidade de uso em *pavers*. A grande maioria das dosagens de concreto, para a produção de *pavers*, incorpora percentuais de pó de pedra (pó calcário) que atingem valores de até 25% em relação ao agregado total. Parte significativa deste pó de pedra pode ser reduzida de forma vantajosa, já que o material pulverulento do rejeito o substitui em parte e atua como *filler*, promovendo o efeito da nucleação e melhoria da matriz cimentícia.

Segundo Mehta e Monteiro [8], os agregados pesados apresentam massa específica na faixa de 3,4 a 6,5  $kg/dm^3$ . De acordo com os compostos mineralógicos encontrados no rejeito, tais como hematita e goethita, pode-se considerar que o material é classificado como agregado pesado [8].

### 3.1.5 Qualidade do rejeito empregado como agregado miúdo, por comparativo de resistência à compressão das argamassas

Embora o rejeito seja isento de matéria orgânica, optou-se,

Figura 3 – Resistência à compressão das argamassas de areia (agreg. 1) e rejeito (agreg. 2)

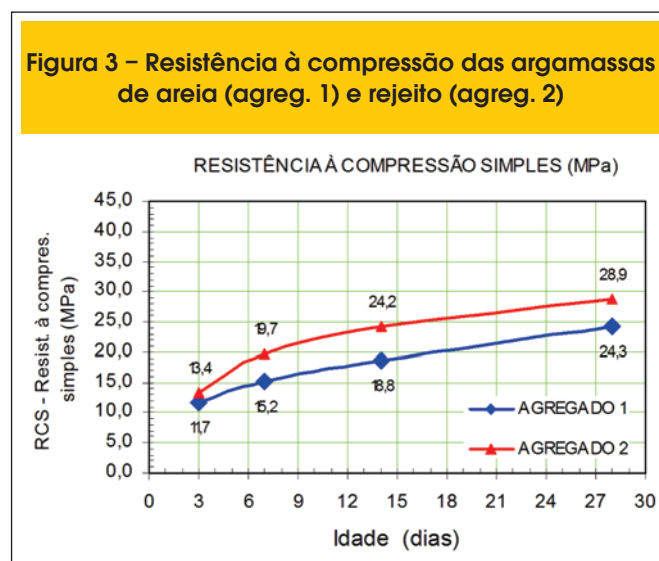


Tabela 5 – Parâmetros de caracterização dos cimentos utilizados

Análise	Cimento CP II E 32	Cimento CP V ARI
Resíduo insolúvel (%)	2,4	0,73
Perda ao fogo (%)	5,4	3,8
MgO (%)	2,3	0,76
SO <sup>3</sup> (%)	2,8	2,84
Água da consistência normal (%)	28,6	31,0
Finura # 200 mesh (%)	1,9	0,0
Finura # 325 mesh (%)	11,8	1,8
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	4021	4770
Início de pega (min.)	138	120
Fim de pega (min.)	192	180
Expansibilidade a quente	-	0,0
Resistência à compressão MPa	3 dias	26,0
	7 dias	29,6
	28 dias	36,3
		41,5
		45,9
		54,5

nessa pesquisa, pela realização do ensaio de qualidade do agregado, segundo a norma NBR 7221 [27]. Para o ensaio, tomaram-se como referência os resultados de resistência à compressão obtidos em argamassa utilizando uma areia quartzosa, de procedência conhecida e reconhecida como de boa qualidade, de uso corrente em obras de concreto na região metropolitana de Belo Horizonte. Devido à significativa diferença de densidade dos materiais comparados, para o ensaio de qualidade do agregado miúdo foi necessário um ajuste na pesagem dos mesmos de forma a igualar os volumes de material nas argamassas produzidas. Assim, as argamassas estudadas foram produzidas nos seguintes traços em peso (cimento, agregado e relação água/cimento), o que correspondeu ao mesmo volume de agregado em ambos os traços, igual a 1,772 dm<sup>3</sup>:

- Argamassa com areia: 1 : 2,35 : 0,6
- Argamassa com rejeito: 1 : 3,30 : 0,6

Foi utilizado o cimento Portland CP II-E 32. Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 50mm x 100 mm para cada traço e idade de ruptura. Os rompimentos dos corpos de prova foram nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. A Figura 3 apresenta o gráfico das resistências obtidas.

A argamassa com o rejeito apresentou, em todas as idades, resistências maiores que as da argamassa com areia, o que demonstra a boa qualidade do rejeito como agregado miúdo para a argamassa.

Para se avaliar a ordem de grandeza do aumento de peso em decorrência da massa específica do rejeito, foram comparadas as densidades das argamassas, a partir de corpos de prova adensados e endurecidos, produzidos com areia lavada e com o rejeito. A argamassa de referência apresentou densidade média de 2,11 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que a argamassa com rejeito apresentou densidade média de 2,78 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, a argamassa com rejeito mostrou-se 31,65% mais pesada.

### 3.2 Caracterização dos cimentos utilizados

No desenvolvimento dos trabalhos foram utilizados os cimentos Portland CP II E 32 e o CP V ARI, na primeira e segunda etapas do programa experimental, respectivamente, cujos dados de caracterização de ambos constam da Tabela 5.

### 3.3 Execução dos elementos pré-fabricados

A segunda etapa do programa experimental, considerada de produção dos elementos pré-fabricados, teve como foco verificar o desempenho de *pavers* (bloquetes) produzidos com concreto utilizando o rejeito, em uma situação efetiva de produção industrial destes elementos pré-fabricados de concreto para pavimentação, comparativamente com a produção convencional da indústria. Estabeleceu-se a substituição parcial e total dos agregados utilizados correntemente em uma linha de produção de pré-fabricados de

Figura 4 – Peças convencionais do bloquete Paver 8



Figura 5 – Vibroprensa em etapa da produção dos bloquetes



concreto pelo rejeito em estudo, mantendo-se constantes os demais parâmetros rotineiros de produção estabelecidos pela indústria. Os parâmetros utilizados na produção de um dos bloquetes industrializados, o *Paver 8*, foram adotados, tais como, traço, materiais, aditivos, quantidade de água, tempos de vibroprensagem e cura.

O *Paver 8* é um bloquete retangular intermediário na linha de produção e possui dimensões de 10 x 20 x 8 cm. A Figura 4 ilustra o *Paver 8* produzido pela fábrica com materiais convencionais.

Nesta etapa da pesquisa estabeleceu-se como metodologia a seguinte seqüência de procedimentos:

- Determinação da distribuição granulométrica do agregado do traço utilizado, correntemente, pela indústria;
- Definição dos traços experimentais de concreto a serem produzidos com o rejeito;
- Produção dos bloquetes com as alternativas de traço definidas;
- Caracterização e propriedades dos bloquetes:
  - Determinação dimensional - NBR 9781 [17];
  - Resistência à compressão - NBR 9780 [33];
  - Absorção de água - adaptação da norma NBR 12118 [34];
  - Desgaste por abrasão - adaptação da norma NBR 12042 [35].

### 3.3.1 Materiais empregados nos bloquetes

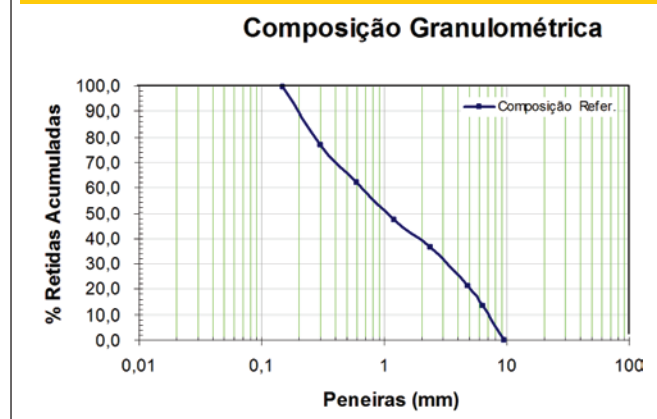
Na produção dos bloquetes de referência foram utilizados os materiais:

- Areia média quartzosa lavada, proveniente de Inhaúma, MG;
- Pó de pedra calcário, proveniente de Pedro Leopoldo, MG;
- Brita calcárea, proveniente de Pedro Leopoldo, MG;
- Cimento Portland CP V ARI;
- Aditivo plastificante, de base surfactante, Rehomix 610;
- Água.

### 3.3.2. Fabricação dos *Paver 8* em processo de produção corrente da indústria

Especificamente em relação à sua linha de bloquetes para pavi-

Figura 6 – Composição granulométrica dos agregados utilizados na produção dos bloquetes



mentação, a fábrica opera com uma vibroprensa hidráulica, automática, marca Trillor, modelo MBX-975, Multibloc. A Figura 5 mostra uma vista do referido equipamento.

Na dosagem do concreto utilizado em sua produção corrente, o cimento foi medido em massa e os agregados em volume. O traço do concreto utilizado na produção dos bloquetes, por betonada alimentada, compôs-se de:

- 2 giricas de areia - 400 kg;
- 1 girica de pó de pedra - 200 kg;
- 1 girica de brita - 200 kg;
- 160 kg de cimento;
- 59 litros de água;
- 5 litros de solução do aditivo plastificante, composta por 20 litros do concentrado em 180 litros de água ( $\approx 3\%$  da massa do cimento);
- Relação água/cimento = 0,397.

A mistura dos materiais foi processada em uma betoneira e o controle da água foi feito por sensores internos no misturador, de tal forma que a umidade da mesma se situou na faixa de 6,5 a 7,0 % no máximo, incluindo-se aí a umidade da areia. Considerando-se o traço adotado, a composição granulométrica dos agregados está apresentada na Figura 6.

A seqüência de operações, uma vez alimentado o misturador da vibroprensa, constituiu-se em:

- Descarga e vibroprensagem do concreto nas respectivas formas, a uma pressão aproximada de 90 bar, por um período de 5 a 7 segundos;
- Transporte da bandeja com os *pavers* ao gaveteiro, para repouso por 24 horas;
- Paletização dos pré-fabricados para destino às áreas de cura (câmara úmida ou pátio de molhação) por um período de 7 dias;
- Transferência do produto acabado, paletizado, para a área de estoque.

Para a amostragem dos bloquetes produzidos com concreto convencional foi definida, aleatoriamente, uma data e um horário na jornada de produção da fábrica, da qual foram separadas amostras do *Paver 8*. Após terem sido processadas conforme a seqüência industrial descrita anteriormente, constituíram as peças de referência que foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, de absorção de água e de desgaste por abrasão.



Tabela 6 – Composições estudadas

Composição 1	Composição 2	Composição 3	Composição 4	Composição 5	Composição 6
100% do rejeito	75% de rejeito	75% de rejeito	75% de rejeito	50% de rejeito	50% de rejeito
25% de pó de pedra	25% de brita	25% de areia	50% de areia	25% de areia	25% de pó de pedra

Para os ensaios de resistência à compressão foram separadas 18 peças, 6 corpos de prova cada, para rompimento nas idades de 7, 14 e 28 dias, em conformidade com a norma NBR 9781 [17]. Foram rompidos 6 corpos de prova para cada idade, ensaiados conforme a norma NBR 9780 [32]. O cálculo do valor característico da resistência à compressão é obtido por meio da equação (1):

$$f_{pk} = f_p - t * s \tag{1}$$

onde:

$f_{pk}$  = resistência característica à compressão, em MPa;  
 $f_p$  = resistência média à compressão das peças, em MPa;  
 $s$  = desvio padrão da amostra, calculado pela equação (2);

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \tag{2}$$

onde:

$f_{pi}$  = resistência individual das peças ensaiadas, em MPa;  
 $n$  = número de peças da amostra (6 peças);  
 $t$  = coeficiente de Student, varia em função do número de peças ensaiadas.

O coeficiente de Student adotado neste ensaio foi de 0,920, em função do número de peças ensaiadas em cada idade, conforme a norma NBR 9781 [17].

Para os ensaios de absorção de água foram ensaiadas 3 peças na idade de 28 dias. Para a análise dos resultados calculou-se a absorção média das 3 peças ensaiadas. O cálculo do valor individual da absorção de água de cada peça foi feito de acordo com a equação (3):

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \tag{3}$$

onde:

$a$  = absorção total, em %;  
 $m_1$  = massa do corpo de prova seco em estufa, em kg;  
 $m_2$  = massa do corpo de prova saturado, em kg.

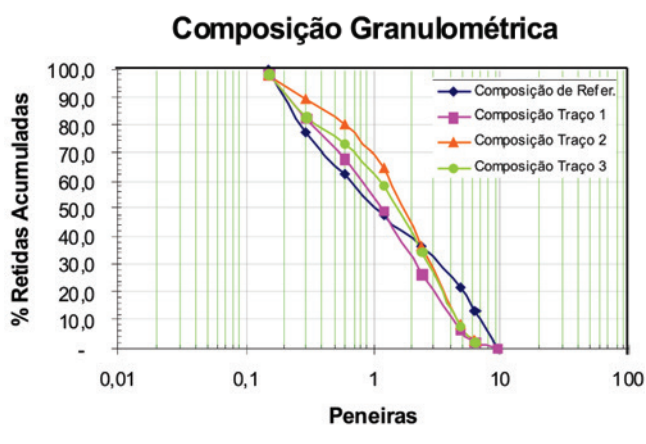
Para os ensaios de desgaste por abrasão foram separadas 4 peças, constituindo 2 amostras, com 2 peças cada, para análise na idade de 28 dias. De cada peça foi preparado um corpo de prova cúbico, com dimensões de 6 x 6 x 8cm. Um par de cubos

constituiu a amostra 1 com os 2 cp's, CP1a e CP1b. O segundo par constituiu a amostra 2, com os 2 cp's, CP2a e CP2b. Foram medidos os desgastes parciais, correspondentes a 250 voltas do disco abrasivo, equivalente a 500 m, e o desgaste total, correspondente a 500 voltas do disco abrasivo, equivalente a 1000m. Em ambas as etapas, os valores absolutos dos desgastes foram

Figura 7 – Aparelho de ensaio de desgaste por abrasão



Figura 8 – Composições granulométricas mais próximas à composição de referência



**Figura 9 – Peças do bloquete Paver 8 produzidas com o rejeito de sinter feed**



expressos em perda de massa dos corpos de prova, calculados pela equação (4):

$$d = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \quad (4)$$

onde:

$d$  = desgaste expresso por perda de massa, em %;

$m_i$  = massa do corpo de prova após estagio parcial ou total, em g;

$m_0$  = massa inicial do corpo de prova, em g.

Para análise dos resultados calculou-se também o desgaste médio apresentado pelos 4 corpos de prova após o estágio final, de 500 voltas do disco abrasivo. Para o ensaio de desgaste por abrasão foi utilizado um abrasímetro Amsler, marca Pavitest, ilustrado na Figura 7.

### 3.3.3 Produção dos Paver 8 com rejeito de sinter feed

Para o desenvolvimento desta pesquisa, dentro dos parâmetros de objetivos estabelecidos, foram definidos os seguintes procedimentos:

- Estudo de composições granulométricas, tomando-se como referência a da produção de bloquetes da empresa (Figura 6);
- Este estudo considerou os condicionantes e conveniências da produção rotineira na fábrica, onde a unidade de volume adotado para o agregado foi igual a uma girica usualmente empregada.
- A composição com o rejeito, que mais se aproximou da de referência da indústria, constituiu o traço base da pesquisa, considerando-se como maior aproximação a maior tendência de superposição ou proximidade da respectiva curva granulométrica;
- Outras duas composições, imediatamente mais próximas, constituíram o segundo e o terceiro traços da pesquisa e foram estabelecidos apenas para efeito de composição dos estudos e comparação de resultados;
- Os demais parâmetros da produção foram mantidos sem variação na proporção dos traços ensaiados.

Seis composições granulométricas foram analisadas, sendo as que apresentaram curvas mais próximas da composição de referência estão na Figura 8. O resumo das composições estudadas está apresentado na Tabela 6.

Com base na análise das curvas das composições granulométricas, considerando os respectivos módulos de finura, concluiu-se pela adoção das composições 4, 5 e 6 e seus respectivos traços. Assim, para os traços 1, 2 e 3 foram produzidos os bloquetes e extraídas as amostras com seus respectivos corpos de prova. A Figura 9 ilustra o Paver 8 confeccionado com o rejeito de sinter feed.

**Figura 10 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência**

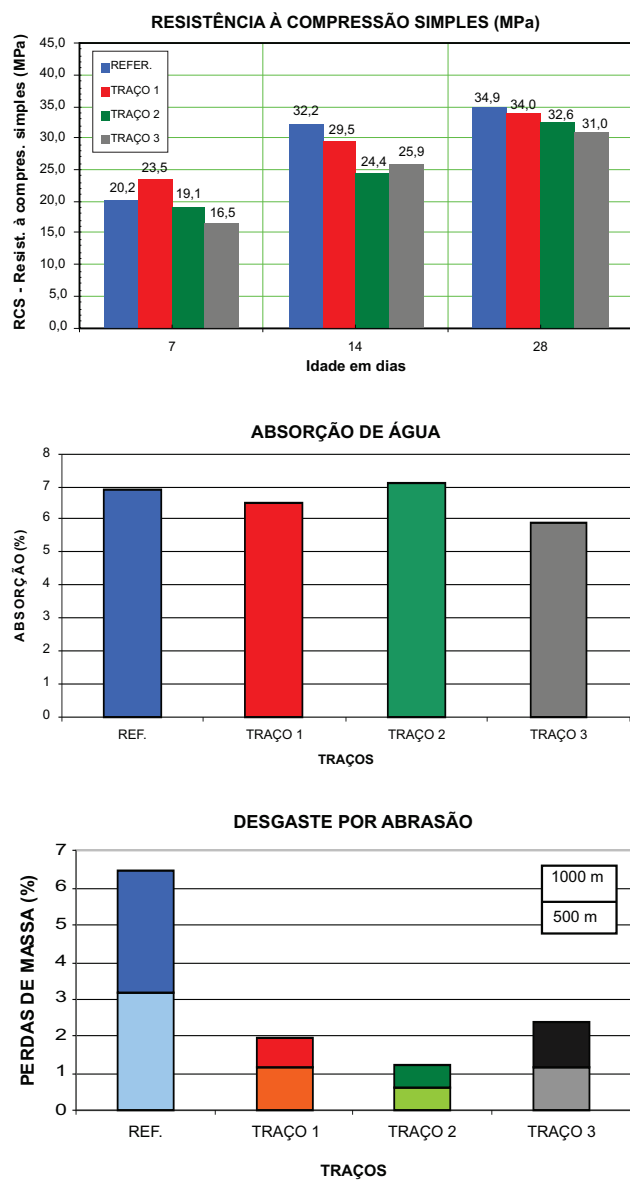


Tabela 7 – Desempenho dos bloquetes – resistência à compressão

Resistência à compressão simples (MPa)								
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de resistência							Resist. Caract.
	Valores individuais/valor médio							
	1° Result.	2° Result.	3° Result.	4° Result.	5° Result.	6° Result.		
Idades	7	23,97	22,45	31,28	31,69	28,56	24,93	<b>23,54</b>
		<b>27,15</b>						
	14	35,29	37,78	38,27	31,12	29,71	28,48	<b>29,55</b>
		<b>33,44</b>						
	28	36,25	34,20	33,80	34,50	35,61	34,80	<b>34,02</b>
		<b>34,86</b>						
<b>Traço 1</b>								
Resistência à compressão simples (MPa)								
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de resistência							Resist. Caract.
	Valores individuais/valor médio							
	1° Result.	2° Result.	3° Result.	4° Result.	5° Result.	6° Result.		
Idades	7	19,63	21,49	24,44	20,89	22,70	18,06	<b>19,13</b>
		<b>21,20</b>						
	14	25,31	22,92	27,02	26,09	29,09	27,98	<b>24,40</b>
		<b>26,40</b>						
	28	34,83	33,23	38,48	37,14	30,73	37,49	<b>32,60</b>
		<b>35,32</b>						
<b>Traço 2</b>								
Resistência à compressão simples (MPa)								
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de resistência							Resist. Caract.
	Valores individuais/valor médio							
	1° Result.	2° Result.	3° Result.	4° Result.	5° Result.	6° Result.		
Idades	7	18,34	15,78	16,43	19,74	18,01	19,48	<b>16,50</b>
		<b>17,96</b>						
	14	24,56	31,23	26,64	28,91	28,56	27,91	<b>25,90</b>
		<b>27,97</b>						
	28	30,23	31,19	33,64	34,20	33,17	32,33	<b>31,06</b>
		<b>32,46</b>						
<b>Traço 3</b>								
Resistência à compressão simples (MPa)								
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de resistência							Resist. Caract.
	Valores individuais/valor médio							
	1° Result.	2° Result.	3° Result.	4° Result.	5° Result.	6° Result.		
Idades	7	24,5	23,72	19,02	23,83	27,43	19,95	<b>20,22</b>
		<b>23,08</b>						
	14	32,69	34,83	32,4	35,18	31,99	33,45	<b>32,21</b>
		<b>33,42</b>						
	28	36,17	36,15	34,5	38,53	36,64	35,18	<b>34,92</b>
		<b>36,20</b>						
<b>Referência</b>								

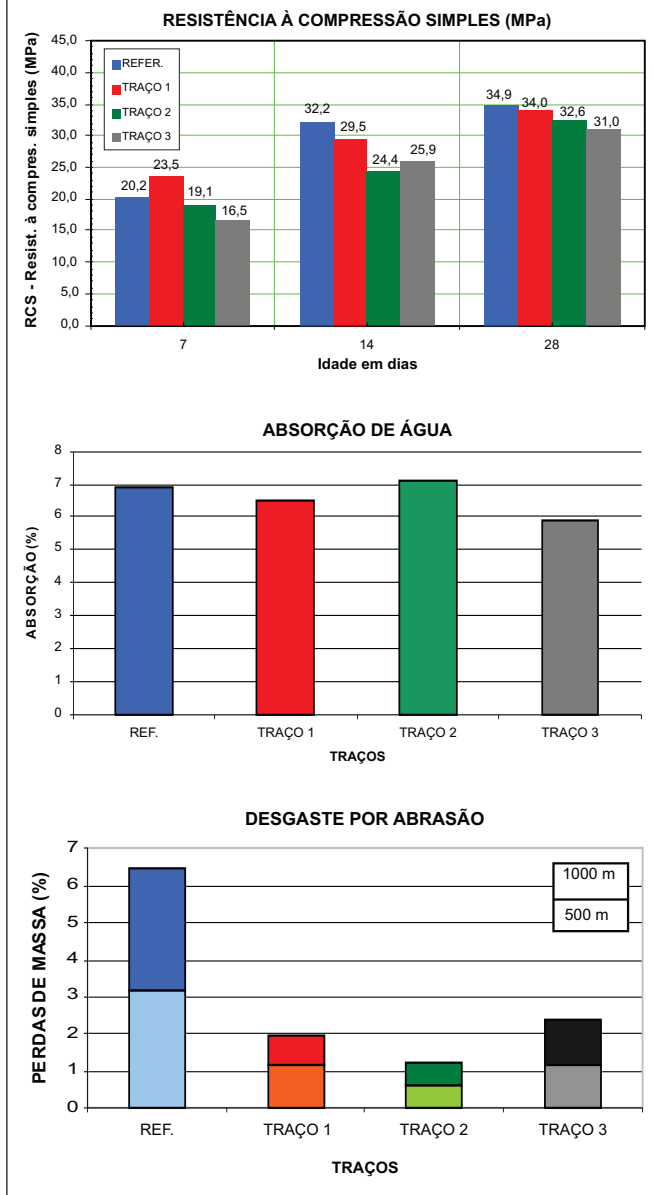
Tabela 8 – Desempenho dos bloquetes – absorção de água

Absorção de água				
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de absorção (%)			
	Medidas dos pesos (Kg)			Absorção média
	Peso seco ao ar	Peso seco em estufa	Peso sat. sup. seca	
Corpo de prova	CP 1	3,76	3,61 <b>6,87</b>	3,86 <b>6,46</b>
	CP 2	3,77	3,59 <b>5,46</b>	3,79 <b>6,46</b>
	CP 3	3,57	3,41 <b>7,04</b>	3,65 <b>6,46</b>
<b>Traço 1</b>				
Absorção de água				
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de absorção (%)			
	Medidas dos pesos (Kg)			Absorção média
	Peso seco ao ar	Peso seco em estufa	Peso sat. sup. seca	
Corpo de prova	CP 1	3,41	3,26 <b>7,29</b>	3,50 <b>7,12</b>
	CP 2	3,74	3,57 <b>6,68</b>	3,80 <b>7,12</b>
	CP 3	3,46	3,30 <b>7,39</b>	3,55 <b>7,12</b>
<b>Traço 2</b>				
Absorção de água				
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de absorção (%)			
	Medidas dos pesos (Kg)			Absorção média
	Peso seco ao ar	Peso seco em estufa	Peso sat. sup. seca	
Corpo de prova	CP 1	3,43	3,22 <b>5,28</b>	3,39 <b>5,90</b>
	CP 2	3,51	3,33 <b>6,31</b>	3,54 <b>5,90</b>
	CP 3	3,46	3,27 <b>6,12</b>	3,47 <b>5,90</b>
<b>Traço 3</b>				
Absorção de água				
Corpos de prova de Paver 8	Resultados de absorção (%)			
	Medidas dos pesos (Kg)			Absorção média
	Peso seco ao ar	Peso seco em estufa	Peso sat. sup. seca	
Corpo de prova	CP 1	3,35	3,25 <b>6,15</b>	3,45 <b>6,86</b>
	CP 2	3,30	3,15 <b>6,35</b>	3,35 <b>6,86</b>
	CP 3	3,25	3,10 <b>8,06</b>	3,35 <b>6,86</b>
<b>Referência</b>				

Tabela 9 – Desempenho dos bloquetes – desgaste por abrasão

Ensaio de desgaste por abrasão							
Corpos de prova extraídos do Paver 8	Resultados das perdas de massa (%)						
	250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas perda média
	Massa inic.	Massa final	Dif. parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. total	
Corpo de prova	CP 1a	916,28	903,68 <b>1,38</b>	12,60	916,28	898,44 <b>1,95</b>	17,84 <b>1,98</b>
	CP 1b	839,90	833,26 <b>0,39</b>	6,64	839,90	822,96 <b>2,02</b>	16,94 <b>1,98</b>
	CP 2a	905,10	892,13 <b>1,43</b>	12,97	905,10	888,20 <b>1,87</b>	16,90 <b>1,98</b>
	CP 2b	815,30	807,11 <b>1,00</b>	8,19	815,30	798,11 <b>2,11</b>	17,19 <b>1,98</b>
<b>Traço 1</b>							
Ensaio de desgaste por abrasão							
Corpos de prova extraídos do Paver 8	Resultados das perdas de massa (%)						
	250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas perda média
	Massa inic.	Massa final	Dif. parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. total	
Corpo de prova	CP 1a	757,46	749,40 <b>1,06</b>	8,06	757,46	745,40 <b>1,95</b>	12,06 <b>1,26</b>
	CP 1b	846,12	842,80 <b>0,39</b>	3,32	846,12	838,40 <b>0,91</b>	7,72 <b>1,26</b>
	CP 2a	862,13	858,70 <b>0,40</b>	3,43	862,13	851,23 <b>1,26</b>	10,90 <b>1,26</b>
	CP 2b	961,25	955,03 <b>0,65</b>	6,22	961,25	949,20 <b>1,25</b>	12,05 <b>1,26</b>
<b>Traço 2</b>							
Ensaio de desgaste por abrasão							
Corpos de prova extraídos do Paver 8	Resultados das perdas de massa (%)						
	250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas perda média
	Massa inic.	Massa final	Dif. parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. total	
Corpo de prova	CP 1a	837,17	825,03 <b>1,45</b>	12,14	837,17	815,00 <b>2,65</b>	22,17 <b>18,85</b>
	CP 1b	774,75	766,35 <b>1,08</b>	8,40	774,75	753,77 <b>2,71</b>	20,98 <b>18,85</b>
	CP 2a	811,45	803,33 <b>1,00</b>	8,12	811,45	796,81 <b>1,80</b>	14,64 <b>18,85</b>
	CP 2b	744,30	735,96 <b>1,12</b>	8,34	744,30	725,45 <b>2,53</b>	18,85 <b>18,85</b>
<b>Traço 3</b>							
Ensaio de desgaste por abrasão							
Corpos de prova extraídos do Paver 8	Resultados das perdas de massa (%)						
	250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas perda média
	Massa inic.	Massa final	Dif. parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. total	
Corpo de prova	CP 1a	704,54	686,65 <b>2,54</b>	17,98	704,54	670,76 <b>4,79</b>	33,78 <b>6,45</b>
	CP 1b	658,64	637,61 <b>3,19</b>	21,03	658,64	619,66 <b>5,92</b>	38,98 <b>6,45</b>
	CP 2a	671,93	644,27 <b>4,12</b>	27,66	671,93	621,02 <b>7,58</b>	50,91 <b>6,45</b>
	CP 2b	596,33	578,85 <b>2,93</b>	17,48	596,33	551,58 <b>7,50</b>	44,75 <b>6,45</b>
<b>Referência</b>							

**Figura 10 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência**



**Traço 1 / composição 4:** 75% de rejeito + 25% de areia;

**Traço 2 / composição 5:** 50% de rejeito + 50% de areia (traço cuja composição granulométrica mais se aproxima da composição de referência);

**Traço 3 / composição 6:** 50% de rejeito + 25% de areia + 25% de pó de pedra.

#### 4. Resultados e discussões

Nas Tabelas de números 7, 8 e 9 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e desgaste por abrasão, respectivamente, constando de cada uma os três traços da pesquisa produzidos com o rejeito e o traço de referência de produção usual da indústria, em amostras extraídas de *Paver 8*. Na Figura 10 apresenta-se o resumo dos resultados médios obtidos para cada ensaio de desempenho dos bloquetes. Pelos resultados apresentados nas Tabelas 7 a 9, e na Figura 10 pode-se considerar que:

As resistências características à compressão dos bloquetes produzidos com rejeito de *sinter feed*, em traços estabelecidos apenas com os ajustes de composição citados em 3.2.3, apresentaram, aos 28 dias de idade, resistências muito próximas às obtidas na produção de referência da indústria, porém ligeiramente inferiores. Nesta pesquisa não foram desenvolvidos estudos específicos de ajustes tecnológicos de dosagem dos traços dos concretos e verificou-se que um sistema de produção com a dosagem dos agregados em massa, certamente, contribuiria, substancialmente, para melhorar este desempenho.

A resistência do Traço 1, contendo maior percentual de rejeito (75%), foi a que mais se aproximou da de referência, apresentando redução da resistência à compressão de apenas 2,5%, o que não é significativo. O maior teor de rejeito, e consequentemente de ferro no Traço 1, por suas características físico-mineralógicas, explicam o melhor desempenho em relação aos Traços 2 e 3. Esses últimos mostraram redução de 6,6% e 11,0%, respectivamente. No entanto, esses resultados não comprometeram os objetivos gerais da pesquisa, que visou concluir sobre a viabilidade técnica do aproveitamento e da conveniência ecológica do emprego do rejeito de *sinter feed*, o que se pode inferir a partir dos resultados alcançados apenas com o ajuste elementar desenvolvido na composição granulométrica dos agregados. As variações e alternâncias dos resultados médios apresentados na Figura 10 se justificam no fato que se originam de amostras colhidas na produção corrente da indústria, nas condições já referidas, e não retratam uma produção com rigor laboratorial.

A norma NBR 9781 [17] estabelece como condição exigível para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias, uma resistência característica mínima de 35 MPa para veículos comerciais de linha, destinados ao tráfego leve a moderado, desempenho de resistência à compressão facilmente alcançado com um estudo de dosagem experimental específico e com o proporcionamento dos materiais em peso, conforme referido no parágrafo anterior.

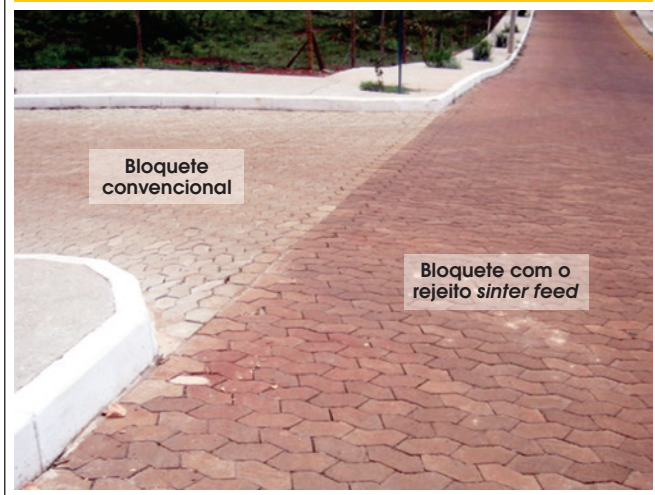
As absorções médias de água dos bloquetes dos traços produzidos com o rejeito de *sinter feed* apresentaram aos 28 dias de idade, índices de absorção muito próximos aos dos bloquetes da produção de referência. O Traço 1 apresentou redução de 5,8% na absorção e o Traço 2, acréscimo de 3,8% em relação ao traço referência. O Traço 3 apresentou melhor desempenho que ambos, com redução de 14% da absorção obtida para os bloquetes de referência. O menor percentual de rejeito neste traço (50%), juntamente com os percentuais de areia e pó de pedra presentes no traço (25% e 25%, respectivamente) certamente proporcionaram uma granulometria mais contínua, com menor índice de vazios, conduzindo, consequentemente, a uma menor absorção.

Os desgastes a abrasão aos 28 dias de idade dos traços produzidos com o rejeito de *sinter feed* apresentaram perdas de massa bem menores que as perdas do traço de referência, tanto no estágio inferior de 250 voltas como no estágio final de 500 voltas. O desgaste do Traço 2 (50% de rejeito e 50% de areia) demonstra o melhor desempenho total, refletindo um percentual de desgaste 80% inferior ao apresentado pelo traço de referência. Os Traços 1 e 3 apresentaram percentuais inferiores de desgastes totais, 69% e 62%, respectivamente, em relação ao traço de referência. O elevado desempenho dos bloquetes com rejeito em relação aos de referência está relacionado ao significativo teor de Fe contido no rejeito de *sinter feed*.

#### 5. Conclusões

O presente trabalho buscou avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento do rejeito de *sinter feed* como agregado miúdo na produção do concreto para a fabricação de elementos pré-fabricados

**Figura 11 – Vista de trecho experimental de pavimento constando do bloquete convencional e do bloquete com o rejeito de sinter feed**



destinados à pavimentação, bem como a conveniência ecológica deste aproveitamento, face à imensa geração deste rejeito nos sítios minerários.

As resistências características à compressão dos bloquetes produzidos com rejeito de *sinter feed* apresentaram resistências muito próximas às obtidas na produção de referência da indústria, constituindo-se em um aceno favorável para o desenvolvimento desta tecnologia. A absorção de água dos bloquetes dos traços com o rejeito de *sinter feed* apresentou resultado próximo ao dos bloquetes de referência, ratificando a consideração anterior.

Com relação ao desgaste por abrasão, o excelente desempenho dos bloquetes com rejeito de *sinter feed* está relacionado ao ainda significativo teor de Fe contido no rejeito, favorecendo sua aplicação em pisos e pavimentos sujeitos à esforços de desgaste superficial, entre outros, consistindo assim em importante relevância do aproveitamento deste material.

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento deste rejeito também se faz adequado. Seu emprego como agregado para elementos de pavimentação em concreto, como alternativa de substituição das areias naturais, proporciona vantagens significativas ao meio ambiente e às próprias mineradoras.

## 6. Consideração final

Considerando-se a densidade mais elevada do rejeito de *sinter feed* em relação aos agregados de uso corrente (areias e britas) um aproveitamento adequado desse material é seu emprego em peças de concreto assentadas diretamente sobre o terreno, como elementos diversos de pavimentação, como se ilustra na Figura 11. Outra aplicação viável poderá ser em blocos de concreto para alvenarias, também assentadas sobre o terreno, em baldrames ou sapatas corridas. Ainda outras aplicações poderão ser avaliadas, como estruturas de contenção, onde o peso também é fator conveniente e preponderante.

Do ponto de vista econômico faz-se conveniente enfatizar que, em cada caso, uma análise econômica específica, devida, exclusivamente, à questão do peso do agregado, reveste-se adequada. Um segundo transporte do produto acabado, dependendo da distância, poderá não constituir a melhor alternativa, estabelecendo menores vantagens econômicas. Desta forma, a produção será mais vantajosa quando a fabricação das peças de concreto for realizada próximo ou no próprio local de sua aplicação, situação geralmente viável em empreendimentos maiores, tais como conjuntos habitacionais, implantação e/ou pavimentação de novas ruas ou bairros.

## 7. Agradecimento

Os autores agradecem aos seguintes órgãos e instituições: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil (PPGCC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM), e CAPES / PROEX, pelo apoio acadêmico e financeiro. O coautor P.R.G.Brandão também agradece ao CNPq por uma bolsa e recursos de pesquisa.

## 8. Referências

- [01] ALCÂNTARA, Paula Lima. Aspectos da Sustentabilidade: Estudo de Bloco para Vedação Produzido a Partir de Resíduos da Construção Civil. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade Fumec. Belo Horizonte: 2009
- [02] PEREIRA, E. L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. [Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Ouro Preto. 185p.] Ouro Preto: UFOP, 2005.
- [03] PRADO FILHO, José Francisco do; SOUZA, Marcelo Pereira de. O licenciamento ambiental da mineração no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais: uma análise da implementação de medidas de controle ambiental formuladas em EIAs/RIMAs. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.9, n.4, p.343-349, dez. 2004.
- [04] IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Dados Estatísticos. 2009. Disponível em <[http://www.ibram.org.br/003/00316004.asp?rdCampoPesquisado=1&btBuscar=Buscar&ttBuscar=&ttOrderBy=1&ttPagina=23&slCD\\_GRUPO\\_CONTEUDO=>](http://www.ibram.org.br/003/00316004.asp?rdCampoPesquisado=1&btBuscar=Buscar&ttBuscar=&ttOrderBy=1&ttPagina=23&slCD_GRUPO_CONTEUDO=>) Acesso em 30 ago., 2009.
- [05] QUARESMA, G. L. F. da F. Otimização de misturas binárias de agregados graúdos para produção de concreto. In: 9º Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2001, São Paulo. 9º SIICUSP-CD ROM. 2001.
- [06] OLIVEIRA E SOUZA, Eduardo Bezerra. Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação. [Dissertação. Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. 128p.]. Belo Horizonte: UFMG, 2007, p.55-77.
- [07] FIORITI, César Fabiano; AKASAKI, Jorge Luis; INO, Akemi. Fabricação de pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de recauchutagem de pneus. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, 2006. Disponível em <<http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2006/36.pdf>> Acesso em 06 jul. 2009.

- [08] METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties and materials. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [09] Kamal, M.A.; JAMIL, T.; HUGHES, D.A.B. The effects of varying aggregate gradation on voids in mineral aggregates in hot mix asphalt paving mixtures. In: *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction*. Cingapura: Research Publishing Services, 2011, p 1225-1230.
- [10] SYBILSKI, D.; MIRSKI, K.; KRASZEWSKI, C. Use of industrial waste materials in Road construction in Poland. In: *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 8–11 nov., 2004. Barcelona, Spain, Proceedings PRO 40, Bagneux, France: RILEM Publications S.A.R.L., v. 1, 2004, p 351- 360.
- [11] KURANCHIE, F.A.; SHUKLA, S.K.; HABIBI, D. Study on mine wastes as potential resource for brick manufacturing in Western Australia. In: *Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction*. Cingapura: Research Publishing Services, 2013, p 819-823.
- [12] ISMAIL, Z.Z.; AL-HASHMI, E.A. Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete. *Waste Management*, 28, 2048-2053., 2008.
- [13] ISMAIL, Z.Z.; AL-HASHMI, E.A. Validation of using mixed iron and plastic wastes in concrete. In: *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Ancona, jun., 2010. Tarun R. Naik, UWM Center for By-Products Utilization, Milwaukee, USA. v. 1, p. 393-403.
- [14] PAVERTECH. Pisos de concreto. Disponível em <<http://www.pavertech.com.br/pisos.html>>. Acesso em 30 ago. 2009.
- [15] COPEL. Pavimentos intertravados. Disponível em <<http://www.tuboscopel.com.br/pavimentos-intertravados.php>>. Acesso em 22 set. 2009.
- [16] PIOROTTI, J. L. Pavimentação intertravada. Rio de Janeiro: Montana S.A., 1985. 64p.
- [17] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- [18] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [19] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7216. Amostragem de agregados. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [20] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [21] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [22] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [23] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para o concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [24] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9774. Verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [25] DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 089 – Ensaio acelerado de durabilidade do agregado.
- [26] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [27] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7251. Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- [28] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7218. Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [29] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7219. Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [30] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7220. Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [31] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7217. Determinação da composição granulométrica do agregado. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [32] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [33] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9780. Peças de concreto para avimentação – Ensaio de compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [34] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.118. Bloco vazado de concreto simples para alvenaria – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- [35] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.042. Rochas para revestimento; materiais inorgânicos, determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.