



## RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE FERRO COMO MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA NO DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO

### RESIDUE OF IRON ORE AS RAW MATERIALS ALTERNATIVE IN THE DEVELOPMENT OF MORTAR AND LAYING MASONRY COATING

Wanna Carvalho Fontes (1); Rafael Vital Januzzi (2); Rodrigo de Araújo Borges (3);  
Alexandre Abrahão Cury (4); Ricardo André Fiorotti Peixoto (5).

(1) *Doutoranda em Engenharia Estrutural e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto*

(2) *Mestrando em Engenharia Estrutural e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto*

(3) *Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto*

(4) *Engenheiro Civil, Dsc. Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora*

(5) *Engenheiro Civil, Dsc. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto  
wannarquit@gmail.com*

## Resumo

A cadeia produtiva do setor construtivo se caracteriza por ser bastante diversificada e por gerar grandes impactos na natureza. Contexto que tem estimulado a busca por meios que visam à sustentabilidade ambiental destes processos produtivos, como por exemplo, através da redução da exploração de recursos naturais pela apropriação adequada dos resíduos como matéria-prima. Sendo assim o presente trabalho aborda o uso do resíduo contido nas barragens de rejeitos de minério de ferro como matéria prima na produção de matrizes de argamassas para revestimento e assentamento de alvenarias, aplicadas em obras civis. Com intuito de contribuir para a redução dos passivos ambientais, representados por essas barragens de rejeito, bem como as possibilidades de ocorrência de desastres ambientais, custos operacionais de manutenção, segurança e monitoramento dessas estruturas, diminuindo, de forma semelhante, a exploração de recursos naturais destinados a produção de argamassas. Dentro deste propósito foram procedidas as caracterizações químico-ambiental e física do resíduo em seu estado bruto, ou seja sem a remoção de sua fração metálica, bem como as análises físicas, ambientais e econômicas das argamassas experimentais. As argamassas foram dosadas segundo proporção 1:3, sendo seus materiais constituintes: cimento, cal hidratada, areia natural e o resíduo. Foram produzidos traços de referência para análises comparativas, traços onde o agregado natural foi substituído totalmente pelo resíduo e traços com a substituição da cal pelo resíduo nas proporções 0%, 10%, 20%, 50% e 100%, todos tratamentos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usar o resíduo como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração com a produção de argamassas com agregados reciclados.

*Palavra-Chave: Rejeito de minério de ferro, tecnologia de materiais, argamassas.*

## Abstract

The construction supply chain is characterized by being very diversified and generates large impacts on nature. Context that has stimulated the search for ways aimed at environmental sustainability of these productive processes, eg, by reducing the exploitation of natural resources for the correct by appropriation of the waste as raw material. Therefore the present study discusses the use of waste contained in tailings iron ore as raw material in the production of arrays of mortar coating and laying of masonry, applied in civil works. The purpose is thus contribute to reducing environmental liabilities represented by these tailings as well as the possibilities of occurrence of environmental disasters, operating costs for maintenance, security and monitoring of these structures, decreasing similarly, exploitation natural resources for the production of



mortars. In this way the physical and chemical-environmental analysis for the characterization of tailings in-nature, that is without the removal of its metal fraction, were also proceeded the physical, environmental and economic analysis of experimental mortars. The second mortar 1:3 ratio were measured, and their constituent materials: cement, hydrated lime, natural sand and residue. Reference traces, where the traces natural aggregate has been completely replaced by the residue and features of the cal with the replacement residue in the ratios 0 %, 10 %, 20 %, 50 % and 100%, all treatments were made at the ages of 3, 7 and 28 days. The results obtained allow us to assess what you can use the waste as raw material for technical and environmentally suitable for reducing the environmental impacts of mining to the production of mortars with recycled aggregates .

*Keyword: reject iron ore, material technology, mortars.*

## 1 Introdução

O aumento da produtividade do setor mineral tem ocorrido, principalmente, em virtude da crescente demanda por ambientes construídos de melhor qualidade nos países em desenvolvimento, os BRICs, sendo estes Brasil, Rússia, Índia e China (IBRAM, 2012). O aprimoramento das edificações aliado as novas necessidades de desenvolvimento urbano e a maior consciência ambiental proporcionaram conseqüentemente, uma mudança de postura frente aos impactos ambientais causados pela cadeia produtiva e pelos processos construtivos. Resultando em um progressivo avanço dos setores mineral e construtivo em termos de gestão ambiental.

Atualmente, a maior parte das empresas mineradoras de médio e grande porte adota programas de gestão ambiental que visam aumentar a extração e diminuir o volume de resíduos, desembolsando por ano um expressivo orçamento para investimento em pesquisas e ações ambientais (ALVES, 2009). Entre as alternativas ambientais almejadas pelas mineradoras têm-se o aprimoramento da manutenção e do monitoramento das barragens de contenção de rejeitos, bem como a adequada destinação dos resíduos da mineração. Desta forma, compreende-se que um dos grandes desafios tecnológicos atuais da mineração de ferro no Brasil está relacionado ao estudo de viabilidade do reaproveitamento de seus resíduos sólidos.

Neste contexto, o presente trabalho irá abordar a utilização do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) em substituição ao agregado natural, bem como em substituição a cal na produção de argamassas de revestimento e assentamento de blocos. É importante ressaltar que somente no Brasil o consumo de argamassas é em torno de 100 milhões de toneladas por ano (ABAI, 2009), fator que motiva mais ainda o uso do rejeito (RBMF) na produção de matrizes de argamassas, considerando também que tal iniciativa irá contribuir significativamente, na redução dos diversos impactos ambientais anteriormente mencionados, bem como na redução da extração dos recursos naturais.

## 2 Materiais e programa experimental

### 2.1 Materiais

O rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) utilizado como matéria prima para a produção de argamassas foi coletado de forma representativa, segundo critérios da NBR6457/86. Após a coleta, no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) –



UFOP as amostras do rejeito in-natura (RBMF) foram secas, destorroadas, peneiradas e armazenadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados. Este rejeito (RBMF) é constituído essencialmente pelos óxidos de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro. A Tabela 1, apresentada a seguir, ilustra a composição química do rejeito em análise com as concentrações em percentual de massa dos óxidos.

Tabela 1 – Composição química do rejeito

Óxidos	Si O <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	P.P.C
Concentração média	%	%	%	%	%	%
2011	24,19	45,92	4,82	0,0	0,025	4,06

A areia natural utilizada como agregado nas argamassas é composta basicamente por óxidos de sílica. Areia de procedência das jazidas do rio Fonseca em Alvinópolis, Minas Gerais. O cimento utilizado como aglomerante para produção das argamassas do trabalho experimental foi o cimento portland CPIII 40 RS, NBR 5735/91 e NBR 5737/92. A escolha por este cimento ocorreu em virtude das características de endurecimento mais lentas, afim de que pudessem ser preservadas as características das argamassas em seu estado fresco, o maior tempo possível. A cal utilizada no experimento foi à cal hidratada CH I, tipo magnésiana, indicada para preparo de argamassa de emboço, reboco e assentamento de tijolos e blocos, de acordo com os requisitos da NBR 7175/03.

## 2.2 Caracterização das amostras

O preparo das amostras de agregados natural (areia) e reciclado (RBMF), para a realização dos ensaios seguiu os métodos fixados pela normalização brasileira (ABNT). Foram procedidas análises físicas (teor de umidade – DNER ME 213/94, análise granulométrica - NBR NM 248/03; massa específica - NBR NM 52/03; massa aparente - NBR NM 45/06 e teor de argilas em torrões - NBR 7218/10).

A caracterização químico-ambiental do rejeito (RBMF) foi procedida por uma empresa especializada. Onde as análises ambientais de lixiviação e solubilização das amostras de rejeito (RBMF) - NBR 10004/04, permitiram identificar sua classificação ambiental.

## 2.3 Produção da argamassa e moldagem

### 2.3.1 Dosagem das argamassas

Todo planejamento experimental foi fundamentado em análises comparativas, sendo que as matrizes cimentícias produzidas com agregados naturais foram tomadas como referência. A produção das argamassas e a realização dos ensaios seguiram os métodos fixados pela normalização brasileira (ABNT), bem como internacionais (BS e ASTM).

As argamassas foram produzidas segundo proporção 1:3, BS 4551-05. Foram produzidos traços de referência com agregado natural; cimento portland CPIII 40 RS e cal hidratada CH I (TN1, TN2 e TN3) e traços com agregado reciclado (RBMF) com granulometria retida na peneira #200 (ASTM), em substituição total a areia, com cimento portland CPIII40 RS e cal hidratada CH I (T1, T2 e T3). Foram também produzidos traços com agregado natural, cimento Portland CPIII 40 RS e cal hidratada CH I, porém nestes traços



a cal foi substituída por agregado reciclado (RBMF) com granulometria passante na peneira #200 (ASTM), segundo proporções 10%, 20%, 50% e 100% (T4, T5, T6 e T7).

O planejamento experimental para as dosagens propostas encontram-se detalhados na Tabela 2 apresentada a seguir.

Tabela 2 – Argamassas experimentais

Argamassa	Traço	Materiais
TN1	1: 3	cimento : areia
TN2	1: 3	cal hidratada : areia
TN3	1: 1: 6	cimento : cal hidratada : areia
T1	1: 3	cimento : rejeito de minério de ferro
T2	1: 3	cal hidratada : rejeito de minério de ferro
T3	1: 1: 6	cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro
T4	1: 0,9: 0,1: 6	cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia
T5	1: 0,8: 0,2: 6	cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia
T6	1: 0,5: 0,5: 6	cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia
T7	1: 0: 1: 6	cimento : cal hidratada : rejeito de minério de ferro : areia

### 2.3.2 Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova prismáticos foi realizada de acordo com NBR 13279/05, quantidade conforme especificada pelas normas dos ensaios realizados no estado endurecido. Os corpos-de-prova foram desmoldados em 24 horas e curados durante 3, 7 e 28 dias em câmara úmida à temperatura de 25°C e umidade relativa de 60%.

## 2.4 Caracterização das argamassas no estado fresco

Foram realizados nas argamassas, no estado fresco, ensaios de índice de consistência - NBR 13276/05, retenção de água - NBR 13277/05 e densidade de massa e teor de ar incorporado - NBR 13278/05.

## 2.5 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Foram realizados nas argamassas, no estado endurecido, ensaios de densidade de massa aparente - NBR 13280/05, resistência à compressão axial e à tração na flexão - NBR 13279/05, bem como absorção de água por capilaridade e determinação do coeficiente de capilaridade - NBR15259/05. Nos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, os corpos-de-prova foram rompidos após serem curados de acordo com as idades estabelecidas pelo experimento.

## 2.6 Análise econômica das argamassas

A avaliação econômica dos traços das argamassas ocorreu através do somatório dos valores em R\$/kg dos materiais componentes (preço comercial, região metropolitana de Belo Horizonte - MG), onde posteriormente foi possível saber o valor de cada traço em R\$/tonelada.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Análises físicas dos agregados

##### 3.1.1 Teor de Umidade

As amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), foram devidamente preparadas e homogeneizadas, em seguida submetidas a ensaios realizados de acordo com os parâmetros do DNER ME 213/94. Obteve-se que o teor de umidade da areia de 0,183% e do rejeito (RBMF) de 1,081%. Pela análise desses dados é possível verificar que a porcentagem da umidade do rejeito (RBMF) é aproximadamente cinco vezes superior a da areia, em função da grande presença de finos no rejeito (RBMF).

##### 3.1.2 Análise Granulométrica

As amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), foram ensaiadas de acordo com os parâmetros da NBR NM – 248/03. As distribuições granulométricas dos agregados obtidas pelos ensaios, segundo as zonas ótima e utilizável para agregados miúdos, encontram-se apresentadas no Gráfico 1, apresentado a seguir.

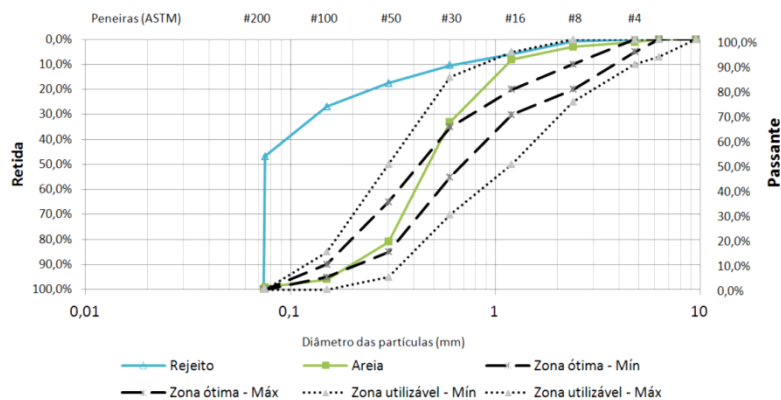


Gráfico 1 – Distribuições granulométricas dos agregados, reciclado (RBMF) e natural (areia).

Nota-se que a distribuição granulométrica do rejeito (RBMF) está fora das zonas utilizáveis propostas pela normalização, por tratar-se de um material muito fino, sendo mais de 50% de sua massa passante na peneira #200 (ASTM). O rejeito (RBMF) apresentou uma dimensão máxima de 2,4 mm e a areia natural de 4,8 mm. Os módulos de finuras foram respectivamente 0,61 mm e 1,56 mm.

##### 3.1.3 Massa Específica

Através do ensaio realizado nas amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR NM 52/03, obteve-se a massa específica da areia de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a do rejeito (RBMF) de 3,88g/cm<sup>3</sup>. Portanto, verifica-se que a massa específica do rejeito é 31,7% superior a da areia.

##### 3.1.4 Massa Aparente

Através do ensaio realizado nas amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR NM 45/06, obteve-se a massa aparente

da areia de 1,457 g/cm<sup>3</sup> e a do rejeito (RBMF) de 1,891 g/cm<sup>3</sup>. O valor da massa aparente do rejeito é 29,78% superior ao da areia.

### 3.1.5 Determinação do Teor de Argilas em Torrões

Através do ensaio realizado nas amostras de agregados, natural (areia) e reciclado (RBMF), de acordo com os parâmetros da NBR 7218/10, pode-se verificar que o rejeito (RBMF) apresentou uma concentração de 98% de torrões, enquanto a areia apresentou 0%. Este resultado demonstra a facilidade que o rejeito (RBMF) tem de formar aglomerações, isso devido ao seu alto índice de material fino e a sua alta capacidade higroscópica.

### 3.1.6 Análises Ambientais do Agregado Reciclado (RBMF)

De acordo com os resultados obtidos das análises ambientais, lixiviação e solubilização, em concordância com os parâmetros de avaliação contidos na NBR 10004/04, as amostras de rejeito (RBMF) foram classificadas como resíduo classe II A - não perigoso e não inerte (FRANCO, 2010). Da mesma forma, espera-se que a adição do resíduo (RBMF) a outros materiais como cimento, cal e areia, não altere a classificação ambiental das argamassas propostas (STIEF, 2009).

## 3.2 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

### 3.2.1 Índice de Consistência

O índice de consistência das argamassas compostas com agregados natural e reciclado (RBMF) foi previamente estabelecido para um valor de 260 ± 5mm de abertura, conforme recomendação da NBR 13276/05. Para este valor de consistência, obtiveram-se as relações água/aglomerante (a/agl), conforme ilustrado no Gráfico 2, apresentado a seguir.

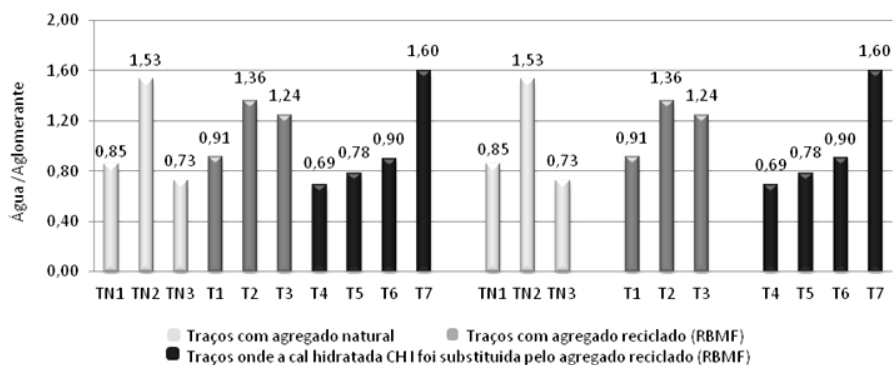


Gráfico 2 – Relação água/aglomerante

Os resultados obtidos permitiram considerar que os traços compostos com agregado reciclado (RBMF) em substituição ao agregado natural, T1e T3, apresentaram maior consumo de água quando comparados aos traços naturais TN1 e TN3, isso devido à granulometria bastante fina do rejeito (RBMF). A presença do rejeito nas argamassas faz com que a mistura fique mais áspera e que requeira uma maior quantidade de água para determinada consistência. No entanto, nos traços TN2 e T2 este comportamento foi diferente, devido à propriedade aglutinante do rejeito (RBMF).

Também se percebe que nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, o aumento na relação água/aglomerante foi correspondente ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF). Quando dissolvida em água, a cal provoca o surgimento de uma solução saturada de  $\text{CaOH}_2$ , que funciona como lubrificante/floculante entre as partículas dos agregados, por isso que a quantidade de água aumenta a medida em que substituímos a cal por rejeito. O traço com substituição de 10% da cal por rejeito, T4, apresentou menor consumo de água em relação ao traço natural - TN3, devido à propriedade aglutinante do rejeito (RBMF). Fator importante, pois se sabe que o excesso de água embora aumente a trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland no canteiro é prejudicial, pois enfraquece a resistência final da argamassa: as propriedades mecânicas da argamassa endurecida são melhores se a quantidade de água é reduzida (RIBEIRO, 2009).

### 3.2.2 Retenção de Água

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 13277/05, obtiveram-se os valores de retenção de água das argamassas conforme apresentado no Gráfico 3.

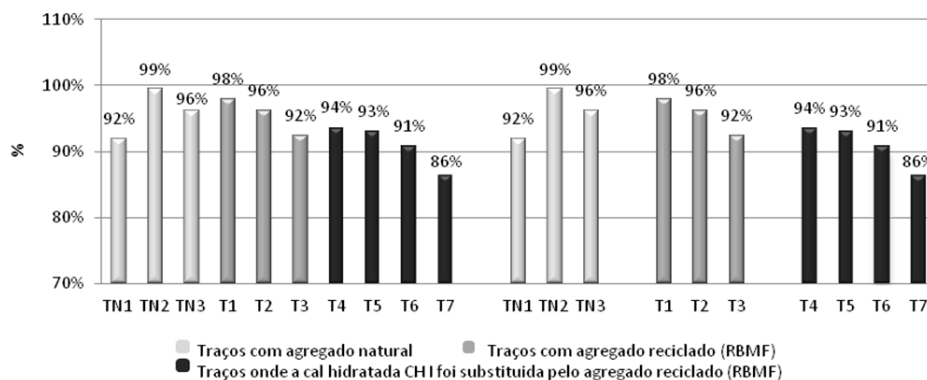


Gráfico 3 – Retenção de água

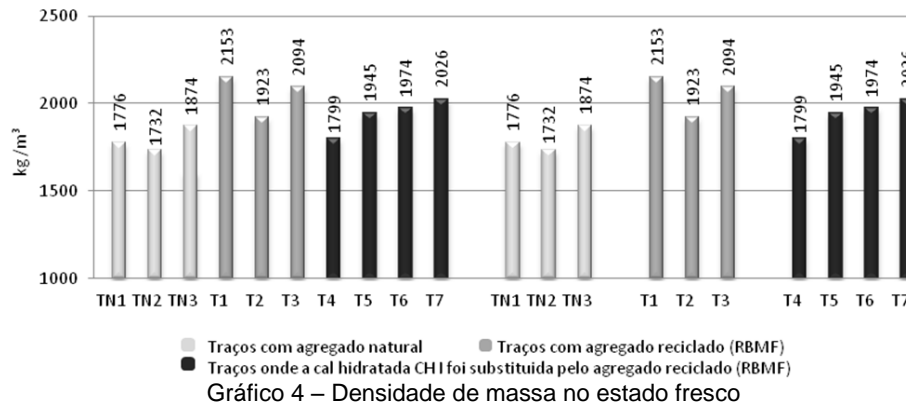
Através destes resultados é possível analisar que os traços compostos com agregado reciclado (RBMF) em substituição ao agregado natural, T2 e T3, apresentaram valores de retenção de água inferiores aos dos traços naturais, TN2 e TN3. Além de comprometer na capacidade destas argamassas se apresentarem de forma plástica. A rápida perda de água compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento e da vedação ficam comprometidas. Entre os traços TN1 e T1, percebe-se que em T1 houve um aumento da porcentagem de água retida. Considera-se este aumento uma contribuição importante, pois conforme MACIEL et al. (1998) uma maior retenção de água de amassamento da argamassa, ao entrar em contato com uma superfície de maior poder de absorção, representa maior estabilidade e disponibilidade de água para hidratação do cimento.

Por outro lado, mesmo tendo sido o rejeito (RBMF) e a cal classificados segundo a mesma granulometria, os traços com cal apresentaram maiores porcentagens de

retenção de água, isso devido às propriedades higroscópicas das cales. A capacidade absorviva dos cristais que constituem a cal também contribui para a retenção de água. Podendo ser observado nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), de T4 a T7, as porcentagens de água retida foram inferiores comparadas com a do traço natural - TN3, com considerável redução entre TN3 e T7. A cura das argamassas compostas com rejeito ocorre, em parte, pelo processo simples de secagem onde a argamassa perde água e seus componentes ficam suficientemente aglutinados, isso devido à capacidade aglutinante do rejeito (RBMF) – essa capacidade aglutinante do rejeito é função dos materiais que o compõem, da granulometria desses materiais (forma e tamanho) e de fenômenos coloidais. Ou, nas argamassas que contém o cimento Portland como componente integrante, a cura também ocorrerá por processo químico. Da mesma forma que a trabalhabilidade, os fatores influentes na retenção de água são as características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa. A presença da cal pode melhorar essa propriedade, conforme análise dos resultados.

### 3.2.3 Densidade de Massa no Estado Fresco

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 13278/05, obtiveram-se os valores de densidade de massa no estado fresco das argamassas conforme apresentados no Gráfico 4.



De acordo com os resultados, os traços com presença do rejeito (RBMF) apresentaram uma densidade de massa mais elevada que os traços naturais, sendo este aumento entre TN1 e T1 de 21%, e entre TN2 e T2, TN3 e T3 de 11%, isto devido ao alto valor da massa específica do resíduo (RBMF). O aumento do teor de finos nas argamassas aumenta a densidade de massa no estado fresco, devido ao maior empacotamento provocado pelos finos. Outro aspecto importante a considerar é que quanto maior a densidade de massa no estado fresco da argamassa, menor será seu rendimento e trabalhabilidade.

Quanto aos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), de T4 a T7, em comparação ao traço natural – TN3 pode-se observar que o traço T4 apresentou menor densidade de massa. Nota-se que quanto maior a proporção de rejeito em substituição a cal (RBMF), maior será o valor da densidade de massa da argamassa.



### 3.2.4 Teor de Ar Incorporado

A verificação do teor de ar incorporado das argamassas experimentais foi procedida através do aparelho medidor, cujos resultados encontram-se apresentados no Gráfico 5.

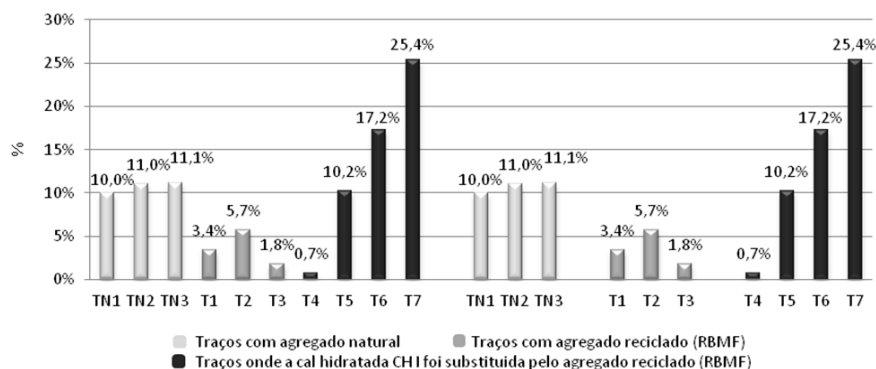


Gráfico 5 – Teor de ar incorporado

A cal contribuiu para o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas naturais, conforme observado nos percentuais de TN2 e TN3 comparados com o de TN1. Nos traços onde o agregado natural foi substituído pelo agregado reciclado (RBMF), T1, T2 e T3, percebem-se uma considerável redução do teor de ar incorporado. O traço composto por cal e rejeito (RBMF), T2, apresentou uma redução do teor de ar incorporado inferior ao traço composto por cimento e rejeito (RBMF), T1, devido à cal proporcionar uma maior incorporação de ar na argamassa. Porém nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, o aumento do teor de ar incorporado foi correspondente ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF).

## 3.3 Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

### 3.3.1 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 13280/05, obtiveram-se os resultados de densidade de massa no estado endurecido das argamassas conforme apresentados no Gráfico 6.

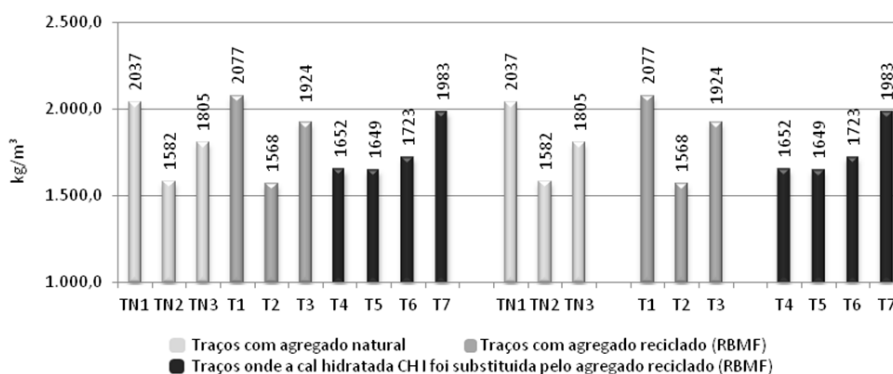


Gráfico 6 – Densidade de massa no estado endurecido

Estes resultados indicam que as argamassas compostas com rejeito (RBMF) como agregado são bem mais densas do que as convencionais, devido à alta densidade de massa do material (RBMF) e a ausência de ar incorporado, mesmo para os traços com cal. As argamassas de cimento portland, TN1 e T1, apresentam-se mais densas do que as demais argamassas, o que pode ser justificado pela reação do cimento com a água de amassamento, pois esta reação produz maior quantidade de produtos, e, com isso proporciona nas argamassas maior densidade no estado endurecido. Entretanto, as argamassas com cal possuem maior teor de ar incorporado que se reflete na menor densidade endurecida.

Nos traços onde a cal foi substituída proporcionalmente pelo rejeito (RBMF), T4 a T7, percebe-se que a massa específica do rejeito (RBMF) não gera significativa variação para densidade endurecida das argamassas.

### 3.3.2 Resistência à Compressão Axial

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 13279/05, obtiveram-se os resultados referentes à resistência à compressão das argamassas conforme apresentados no Gráfico 7.

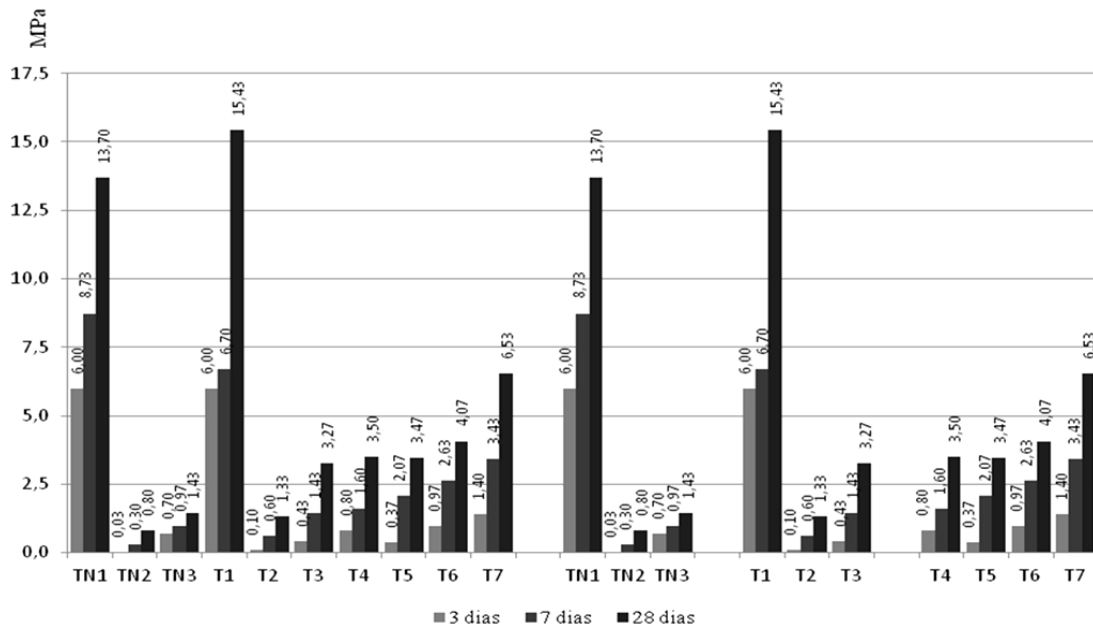


Gráfico 7 – Resistência à compressão axial

De acordo com estes resultados, os traços compostos com rejeito (RBMF) apresentaram um bom comportamento à compressão, sendo a resistência pouco menor quando comparada aos traços naturais, em ensaios relacionados às idades de 3 e 7 dias. Porém o resultado para a resistência a compressão foi consideravelmente superior na idade de 28 dias em todas as argamassas, principalmente nas argamassas compostas com cimento portland em virtude das reações de hidratação do cimento. Analisando somente os traços com rejeito (RBMF), pode-se concluir que quanto maior for a relação cimento/rejeito, maior será a resistência à compressão.

Quanto às argamassas compostas por cal, sabe-se que a cal é um aglomerante com funções importantes na argamassa, além de melhorar a trabalhabilidade, diminui a absorção de água e o índice de vazios, porém provoca diminuição da resistência à compressão, conforme observado em TN2 em relação a TN1 e TN3, bem como T2 em relação a T1 e T3.

No entanto, para as argamassas em que a cal foi substituída pelo rejeito, T4 a T7, percebe-se que houve um melhor desempenho mecânico a compressão, proporcionalmente ao aumento da substituição de cal por rejeito; provavelmente em função do melhor empacotamento dos grãos pelos produtos de hidratação do cimento dada granulometria fina do rejeito.

### 3.3.3 Resistência à Tração na Flexão

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 13279/05, obtiveram-se os resultados referentes à resistência à tração na flexão das argamassas conforme apresentados no Gráfico 8.

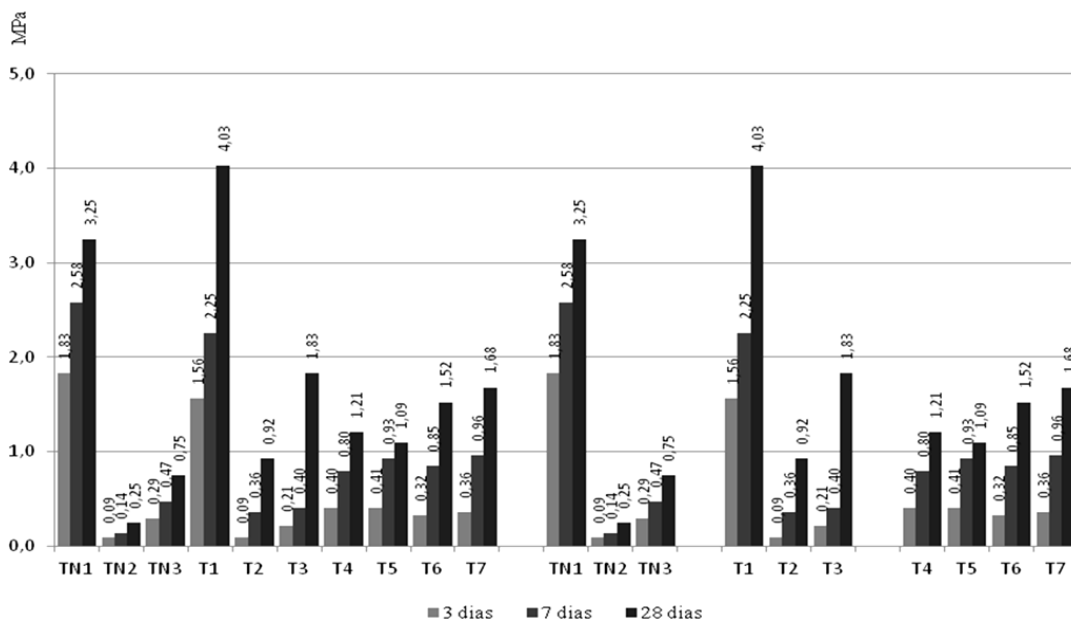


Gráfico 8 – Resistência à tração na flexão

Assim como na compressão, os traços compostos com rejeito (RBMF) apresentaram um bom comportamento quanto à tração na flexão, devido ao empacotamento dos grãos de rejeito (RBMF) pelos produtos de hidratação do cimento. Esses mesmos traços tiveram a resistência à tração na flexão um pouco menor do que os traços naturais, nos ensaios relativos às idades de 3 e 7 dias. Porém obtiveram um resultado superior aos 28 dias em todas as argamassas. Analisando somente os traços compostos com resíduo (RBMF), pode-se concluir que quanto maior for a relação cimento/rejeito, maior será a resistência à tração. Percebe-se também um aumento da resistência à tração na flexão nas argamassas proporcional ao aumento da substituição da cal por rejeito (RBMF), conforme análises dos resultados de T4 a T7.

### 3.3.4 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Através dos ensaios realizados de acordo com a NBR 15259/05, obtiveram-se os resultados referentes absorção de água por capilaridade das argamassas conforme apresentados no Gráfico 9.

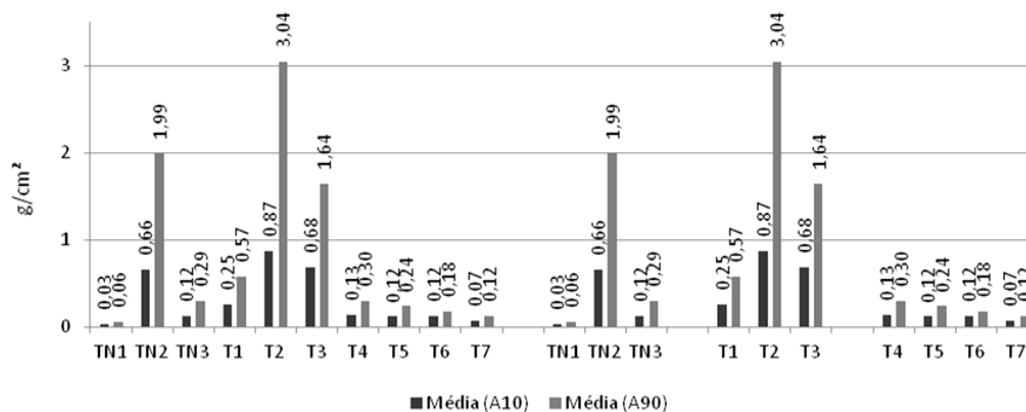


Gráfico 9 – Absorção de Água por Capilaridade

O coeficiente de capilaridade das argamassas foi determinado segundo especificações da NBR 15259/05, onde os resultados encontram-se apresentados no Gráfico 10.

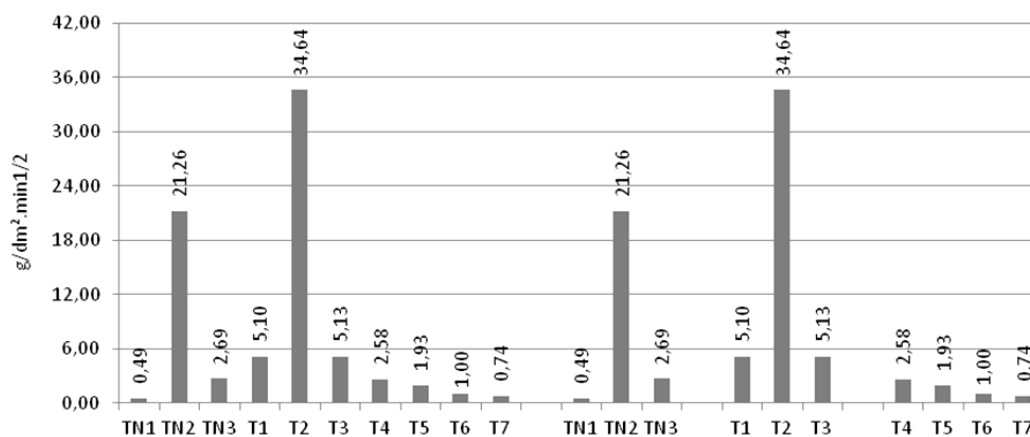


Gráfico 10 – Coeficiente de Capilaridade

De acordo com os resultados, verificou-se que os traços compostos com rejeito (RBMF) em substituição ao agregado natural, T1, T2 e T3, absorveram mais água por capilaridade quando comparados aos traços naturais, TN1, TN2 e TN3, pois o rejeito contribui para o aumento da absorção de água nas argamassas, devido à grande quantidade de partículas finas. Quanto às argamassas compostas com cal, constatou-se que estas possuem maior absorvidade, devido à capacidade absorptiva dos cristais que constituem a cal. Sendo que as argamassas de cal TN2 e T2 absorveram uma quantidade elevada de água, por ação da capilaridade, e registraram velocidades iniciais de absorção muito rápidas. Observou-se também que quanto maior o teor de cal nas argamassas, maior é o coeficiente de absorção. Nas argamassas onde a cal foi substituída proporcionalmente por rejeito, T4 a

T7, pelos resultados é possível constatar que quanto menor a proporção de cal na argamassa, menor a absorção e coeficiente de capilaridade. Relativamente à totalidade de água absorvida, as argamassas T4 e T5, registraram um desempenho razoável, o que pode estar relacionado com a proporção adotada de cal e resíduo. Percebe-se uma relação entre a absorção por capilar, resistência mecânica, porosidade e ligantes, a medida que se aumenta o percentual de ligante nas argamassas, a absorção por capilaridade e a porosidade aumentam e, por outro lado, a resistência mecânica diminui.

### 3.4 Análise Econômica das argamassas

Os resultados das análises econômicas das argamassas encontram-se no Gráfico 11.

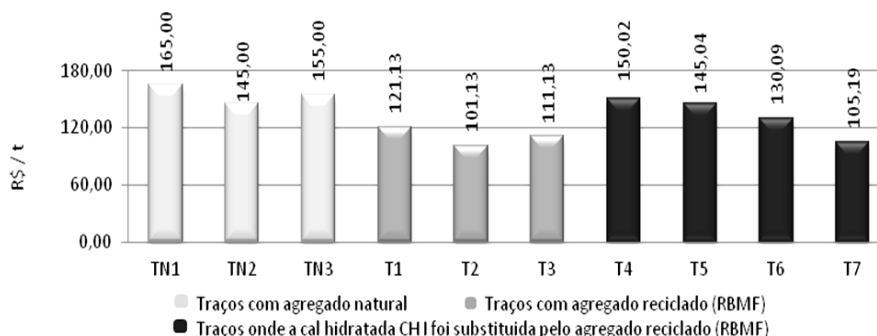


Gráfico 11 – Análises econômicas das argamassas experimentais

Pela análise dos valores dos traços das argamassas de cimento portland percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 26,6% de T1 comparado a TN1. Quanto aos traços de argamassas de cal percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 30,2% de T2 comparado a TN2. Com relação aos valores dos traços das argamassas mistas percebe-se que o traço com agregado reciclado (RBMF) possui menor custo de produção em relação ao agregado natural, sendo este custo inferior em 28,3% de T3 comparado a TN3. Em análise aos valores dos traços das argamassas com substituição proporcional de cal por rejeito (RBMF), constatou-se que à medida que a cal foi gradualmente substituída, os valores foram proporcionalmente reduzidos, devido ao baixo custo do rejeito (RBMF). No traço onde o rejeito (RBMF) foi usado em substituição total à cal, percebe-se que houve um decréscimo de 32,1% de T7 para TN3.

## 4 Considerações Finais

Os resultados apresentados para o rejeito (RBMF) relacionam-se aos trabalhos preliminares de investigação, sendo ainda necessários estudos mais detalhados e específicos do tema. As análises químicas das amostras de agregado reciclado (RBMF) permitiram avaliar que o resíduo é composto basicamente por Fe, Si e Al, apresentando em média 45,75% de Fe em sua composição. Pela microscopia eletrônica de varredura pode-se verificar o aspecto morfológico irregular das partículas do rejeito (RBMF), sendo possível detectar a adesão de grãos planos e com menor tamanho, aos grãos de quartzo ou hematita, o que irá, possivelmente, ocasionar um aumento de vazios no material e



requer, conseqüentemente, maiores quantidades de água para obtenção de plasticidade ou trabalhabilidade necessárias nas argamassas compostas com o resíduo (RBMF).

Quanto às análises físicas das amostras dos agregados, natural e reciclado, percebe-se que o agregado reciclado apresentou uma elevada massa específica e massa aparente em relação ao agregado natural, isso se deve a grande concentração de Fe no resíduo (RBMF). Pela análise dos resultados do teor de argilas em torrões, verificou-se a facilidade que o rejeito (RBMF) tem de formar aglomerações, isso devido ao seu alto teor de finos e a sua alta capacidade higroscópica.

Quanto às análises ambientais, as amostras de rejeito (RBMF) foram classificadas como resíduo classe II A - não perigoso e não inerte. Da mesma forma, espera-se que a adição do resíduo classe II A (RBMF) a outros materiais como cimento, cal e areia, não altere a classificação ambiental das argamassas.

Pelas análises das propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas experimentais, pode-se concluir que as argamassas produzidas com agregado reciclado (RBMF), T1, T2 e T3, e com agregados naturais, TN1, TN2 e TN3, apresentaram a mesma trabalhabilidade, embora as argamassas com agregado reciclado (RBMF) contivessem proporções maiores de água, menores teores de ar incorporado e maiores densidades de massa no estado fresco e endurecido, em função da elevada massa específica do rejeito (RBMF). O comportamento mecânico das argamassas compostas com rejeito (RBMF) apresentou-se superior em relação às argamassas produzidas com agregados naturais, principalmente a idade de 28 dias. Em relação às argamassas onde a cal foi substituída proporcionalmente por rejeito (RBMF), T4, T5, T6 e T7, quando comparadas à argamassa mista natural -TN3, percebem-se que as argamassas T5, T6 e T7 apresentaram maior consumo de água, menor retenção de água, maiores teores de ar incorporado, maiores densidades de massa no estado fresco e menores no estado endurecido, exceto T7 devido a grande concentração de resíduo (RBMF). Entretanto a argamassa T4, em geral, apresentou propriedades distintas das demais argamassas mencionadas quando comparadas a argamassa mista -TN3 obtendo: menor proporção de água; retenção de água e teor de ar incorporado praticamente equivalentes ao do traço natural; densidades de massa inferiores, tanto no estado fresco e quanto no estado endurecido; propriedades que tornam a argamassa T4 mais trabalhável em relação a TN3. De igual modo, é importante ressaltar que os 10% de substituição da cal por rejeito (RBMF) na argamassa, contribuíram para elevar consideravelmente a resistência mecânica da argamassa (T4).

Desta forma, os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usar o rejeito (RBMF) como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração, com a produção de argamassas com agregados reciclados. A viabilidade econômica é alcançada pela produção das argamassas com o material residual da mineração (custo baixo) e pela diminuição dos gastos relacionados aos impactos ambientais gerados, bem como a diminuição dos custos de manutenção das barragens de contenção.



## 5 Agradecimentos

Agradecemos a FAPEMIG, CAPES, CNPq, grupo de pesquisa RECICLOS, pelo apoio e fomento concedidos; a PROPEC, Fundação Gorceix, VALE-SA pela concessão de matérias primas, logística e apoio financeiro.

## 6 Referências

ABAI. **Associação Brasileira de Avaliação de Impacto**. Disponível em: <http://avaliacaodeimpacto.org.br/>, acessado em 10 de abril de 2014.

ALVES, F. **A mineração está tentando fazer o seu dever de casa**. Disponível em: [http://saladeimprensa.vale.com/pt/versao\\_impresao/prt\\_detail.asp?tipo=1&id=12478](http://saladeimprensa.vale.com/pt/versao_impresao/prt_detail.asp?tipo=1&id=12478), acessado em 10 de maio de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5737: Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7175: Cal Hidratada para argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos– Determinação da retenção de água – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2005.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 24: Agregados - Determinação da Composição Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 1982.

British Standards Institution. **BS 4551: Mortar - Methods of test for mortar.** Chemical analysis and physical testing, New York, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM (DNER). DNER-ME 213: Solos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 1994.

FRANCO, V. C. **Relatório de ensaio: Análise Ambiental.** São Paulo: AGÊNCIA PATROCINADORA; 2010. Nº 014346.

IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.** 7ª edição. 2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>, acessado em 12 de abril de 2014.

MACIEL, L. L.; BARROS M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos.** São Paulo, 1998.

RIBEIRO, N. P. **Alvenarias e argamassas: restauração e conservação.** Rio de Janeiro: In-Fólio, 2009.

STIEF, J. N. de P. **Análise das deformações, por extensometria, em concreto armado convencional e com agregados de escória de aciaria.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG.