



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



**Dissertação de Mestrado**

**“Resíduo Ferroso da Indústria Mineradora de Fosfatados como Agregado Miúdo em Compósitos Cimentícios”**



**Autor: Áureo de Alencar Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia**

**Janeiro de 2013**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Áureo de Alencar Silva

“Resíduo Ferroso da Indústria Mineradora de Fosfatados como  
Agregado Miúdo em Compósitos Cimentícios”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e seleção de materiais

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia

Ouro Preto, Janeiro de 2013

## **AGRADECIMENTOS**

A vida nos oferece todas as oportunidades que o nosso espírito imortal necessita para evoluir.

A cada dia um novo aprendizado um novo desafio.

A cada hora um teste de burilamento espiritual nos aguarda.

A cada minuto uma nova chance de melhorar e esclarecer.

À Deus pelo dom da vida.

À Jesus, o nosso governador planetário, que nos orienta a seguir rumo a perfeição.

A minha esposa Ana Maria pela dedicação e pelo apoio imprescindível nos momentos de dificuldade.

Aos meus filhos Mateus, Lincoln e Givago razão da minha existência pelo apoio e compreensão nas horas difíceis.

Aos meus pais pela grande oportunidade de estar aqui e agora vivendo este momento lindo.

Aos meus amigos pelo incentivo.

Aos colegas de curso o poder dizer eu também cheguei lá.

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Ao Prof. Dr. Claret por ter aceitado trilhar comigo esta caminhada e pela orientação precisa neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Augusto Cesar por dividir comigo este trabalho de pesquisa e pela sua orientação que foi de suma importância na continuidade do trabalho.

Ao Laboratorista Ricardo pela ajuda nas horas difíceis do trabalho de preparação e execução dos testes.

A Empresa Fosfertil S/A na pessoa do Sr. Luciano Abreu pelo material de pesquisa e também pelas análises químicas e granulométricas do resíduo.

A todos pela ajuda e colaboração.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 Objetivos .....	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 Justificativa.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Concreto .....	16
2.1.1 Agregados.....	19
2.1.2 Classificação tecnológica dos agregados. ....	21
2.1.3 Influencia dos agregados na reologia dos concretos .....	25
2.2 Resíduos da atividade mineradora.....	26
2.2.1 Passivo ambiental.....	29

2.2.2	Resíduos no Brasil.....	30
2.2.3	Resíduos na Mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.....	31
2.3	Óxidos de ferro.....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1	Materiais.....	36
3.1.1	Materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova .....	36
3.2	Métodos.....	37
3.2.1	Caracterização do resíduo .....	37
3.2.2	Desenvolvimento e avaliação dos compósitos cimentícios.....	44
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	Caracterização dos agregados .....	49
4.2	Caracterização dos compósitos cimentícios.....	54
4.2.1	Caracterização das argamassas.....	54
4.2.2	Caracterização dos concretos .....	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma típico do processo de beneficiamento .....	28
Figura 2.2 - Estimativa do percentual de rejeito de mineração .....	31
Figura 3.1 - Ensaio de perda ao fogo. ....	43
Figura 3.2 - Prensa hidráulica durante o experimento .....	45
Figura 4.1 - Massa específica dos agregados miúdos .....	49
Figura 4.2 - Massa unitária dos agregados miúdos .....	50
Figura 4.3 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos .....	51
Figura 4.4 - Grão do resíduo da indústria mineradora com predominância de $Fe_3O_4$ (Magnetita) .....	53
Figura 4.5 - Grão do resíduo da indústria mineradora sem predominância de $Fe_3O_4$ (Magnetita) .....	54
Figura 4.6 - Absorção de água das argamassas .....	55
Figura 4.7 - Índice de vazios das argamassas.....	56
Figura 4.8 - Massa específica saturada das argamassas .....	56
Figura 4.9 - Massa específica seca das argamassas .....	57

Figura 4.10 - Resistência à compressão relativa das argamassas confeccionadas .....	58
Figura 4.11 - Temperatura de dano das argamassas confeccionadas .....	58
Figura 4.12 - Absorção de água por imersão dos concretos confeccionados.....	59
Figura 4.13 - Índice de vazios dos concretos confeccionados .....	60
Figura 4.14 - Massa específica seca dos concretos confeccionados .....	61
Figura 4.15 - Massa específica saturada dos concretos confeccionados.....	61
Figura 4.16 - Resistência à compressão relativa dos concretos confeccionados em função da idade .....	62
Figura 4.17 - Resistência à compressão relativa dos concretos confeccionados aos 28 dias...	63
Figura 4.18 - Temperatura de dano dos concretos confeccionados .....	63
Figura 4.19 - Grão do resíduo na superfície fraturada de um corpo de prova do concreto.....	64
Figura 4.20 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto.....	65
Figura 4.21 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto.....	66
Figura 4.22 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	24
Tabela 2.2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	25
Tabela 2.3 - Composição química por faixa granulometrica .....	32
Tabela 3.1 - Descrição dos materiais utilizados para confecção dos compósitos cimentícios.	36
Tabela 3.2 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria .....	38
Tabela 3.3 - Proporção de materiais utilizados para confecção do compósito cimentício sem agregado graúdo. ....	44
Tabela 3.4 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	46
Tabela 3.5 - Classes de resistência do grupo I .....	46
Tabela 3.6 - Classes de resistência do grupo II .....	47
Tabela 3.7 - Proporção de materiais utilizados para confecção dos concretos. ....	47
Tabela 4.1 - Dimensão máxima característica dos agregados miúdos.....	51
Tabela 4.2 - Modulo de finura dos agregados miúdos .....	52
Tabela 4.3 - Material pulverulento dos agregados miúdos .....	52
Tabela 4.4 - Teor de argila em torrões e materiais friáveis dos agregados miúdos .....	52

Tabela 4.5 - Composição química do resíduo da indústria da mineração..... 53

## RESUMO

A mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, possuem em seu território três empresas mineradoras que geram resíduos com grande concentração de óxidos ferrosos. Estes resíduos possuem como destinação final barragens de inerte, sem uma utilização mais nobre. Foram produzidos argamassas e concretos com substituição do agregado miúdo natural (Areia de rio) pelo resíduo da indústria mineradora. As argamassas tiveram substituição de 25, 50, 75 e 100% com medida em massas para obtenção do mesmo volume. Os concretos tiveram substituição de 25, 50 e 100%. Ambos os compósitos tiveram suas propriedades físicas, mecânicas e também a sua resistência ao lascamento em temperaturas elevadas avaliadas. Quanto às propriedades mecânicas, às argamassas com substituição apresentaram maiores resistências à compressão e módulos de elasticidade dinâmicos. Os concretos com substituição apresentaram maiores absorção de água e índice de vazios em relação ao concreto de referência. Isso indica maior porosidade aberta, que deve estar relacionado ao maior consumo de água que os concretos com substituição demandaram para obter a mesma trabalhabilidade do concreto de referência. Quanto às propriedades mecânicas, os concretos com substituição apresentaram maiores resistências à compressão e módulos de elasticidade dinâmicos. Argamassas e concretos apresentaram um aumento da temperatura de dano em relação ao referencial.

Palavras-chaves: resíduos da indústria da mineração, agregados reciclados, concretos, incêndios.

## **ABSTRACT**

It was investigated in this study the physical and mechanical properties of cementitious composites produced by replacing natural small aggregate by iron's waste from industry of the region of AltoParanaíba and Triângulo Mineiro, whose final destination is to rule out at dams without any noble use. The residue was characterized physically and, to value its use as small aggregate it were prepared mortars with substitution of 0%,25%, 50%, 75% and 100% measuring in mass to obtain the same volume and concretes with substitutions of 0% 25%, 50% and 100%.Analyzing the physical and mechanical properties, and also the streng that higher temperatures, it was found that the mortars and concretes with substitution showed higher compressive strength, modules of dynamic elasticity and an increase of the damage temperature. The concrete with the replacement had higher index of water absorption and voids. Preliminary results indicate that the composites with residue had improved their properties in some categories.

Keywords: iron's waste ; small aggregate; concretes; high temperature.

# 1 INTRODUÇÃO

A busca de matéria prima para suprir a demanda de um mercado cada vez mais exigente leva o homem a agredir o meio ambiente, seja na tentativa de conquistar novas fontes que abasteçam o mercado ou ao tentar gerar qualidade de vida. Num contexto de sustentabilidade o grande desafio é alcançar o tão desejado desenvolvimento sustentável sem gerar grandes prejuízos ao planeta Terra.

Por outro lado, o crescimento populacional, o desejo pelo conforto, o consumismo e as inevitáveis exigências da moderna civilização, concentradas principalmente nas grandes cidades, despertam no homem a necessidade de elaborarem diversificados meios para aumentar a produção de alimentos em tempo hábil, tornando o solo mais dependente de adubação química.

Para repor as propriedades essenciais do solo constantemente empobrecido, em função de práticas depredatórias, manejos tradicionais e o uso excessivo de alternativas químicas, como mencionada acima, necessária se faz a descoberta de eficientes fertilizantes que contemplem os princípios do desenvolvimento sustentável.

A indústria de fertilizantes cresceu e aliado a este crescimento está o passivo ambiental, representado pelo rejeito que atualmente é acondicionado em lagoas de decantação ou em monturos cada vez maiores, ocupando grandes áreas. O aproveitamento destes resíduos tornou-se uma necessidade, em função das exigências previstas pela legislação ambiental, assim como das perspectivas do mercado econômico. O grande conflito é, de um lado, a preservação do meio ambiente e, do outro, a demanda de novas e diferentes fontes de matéria

prima que atenda a indústria, em tempo e condições satisfatórias, em um mercado propenso a alcançar patamares em grande escala.

Apenas em uma das empresas mineradora do complexo minerador da mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, anualmente deposita 3,2 milhões de toneladas de rejeito, a massa total acumulada até 2007 é de 65 milhões de toneladas. A empresa possui duas barragens que juntas tem capacidade de 25.000.000 m<sup>3</sup> e estão praticamente ocupadas. Uma terceira barragem tem 4,5 milhões de m<sup>3</sup> com rejeitos sendo dragados para a usina, e a quarta é o reservatório em operação com capacidade de 4,7 milhões m<sup>3</sup>, sendo 65% de sua capacidade preenchida.(REIS ,2009).

Outra indústria mineradora do complexo possui ao todo seis barragens. A barragem de lamas tem capacidade de 144 milhões de m<sup>3</sup> e a barragem de rejeitos tem capacidade para 98 milhões de m<sup>3</sup>. As duas barragens são para a contenção de rejeitos de magnetita e captação de água. Uma terceira barragem com capacidade de 8,3 milhões de m<sup>3</sup> é utilizada para armazenamento e para captação de água. As demais barragens da empresa são utilizadas para armazenamento de sólidos e passagem de água. (Revista Minérios & Minerales, Edição 298)

Devido à grande quantidade de resíduos produzida pelas mineradoras da região de Araxá, o aproveitamento deste rejeito constitui caráter de urgência, afim de que o panorama regional adequar-se-á às novas necessidades de sustentabilidade.

Tem sido clara a preocupação das mineradoras quanto à questão do resíduo obtido das atividades de mineração e sua destinação tendo em vista os problemas relativos ao meio ambiente. A legislação ambiental na atualidade tem sido severa com as mineradoras que direta ou indiretamente causam algum tipo de desequilíbrio ao meio ambiente. Desta preocupação surge a necessidade de se obter meios de diminuir o passivo residual das mineradoras.

Atualmente os rejeitos são depositados em barragens de contenção que representam um risco ao meio ambiente. A construção dessas estruturas de contenção é em alguns casos feita sem projeto de engenharia e utilizando o rejeito como material de construção sem qualquer controle tecnológico. Dessa forma uma série de acidentes ou ruptura pode acontecer

(ARAÚJO, 2006). Os acidentes implicam em severos e muitas vezes imprevisíveis danos ao meio físico, fauna e flora, com graves riscos à vida humana. Os acidentes com barragens de rejeitos vão desde vazamentos diversos, até a ruptura parcial ou total dessas estruturas (D'AGOSTINO, 2008).

Dados divulgados pelo ICOLD (International Commission on Large Dams, 2001) apontam para 221 acidentes com barragens de rejeito em diversos graus de gravidade no período de 1939 a 2000, sendo cinco casos brasileiros. Com base nesses dados percebe-se que o aproveitamento de rejeitos da mineração é uma excelente opção para as empresas, a reciclagem de material traz não só vantagens econômicas, mas também, ambientais.

Na extração de rocha fosfática na mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, o rejeito produzido é rico em compostos que apresentam óxido de ferro como componentes principais dos quais se destaca a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Acredita-se que o óxido de ferro presente neste resíduo pode apresentar características especiais tais como condutividade térmica, elétrica, magnéticas e outras. Um resíduo de certa forma nobre para ser destinado a barragens de rejeitos. Uma das possibilidades de utilização deste resíduo é como material na indústria da construção. Assim vários estudos estão sendo feitos para ver a possibilidade de utilizar este resíduo em várias áreas e uma delas é a indústria da construção civil. A possibilidade do aproveitamento dos resíduos da indústria mineradora pode representar uma fonte promissora de exploração industrial. A utilização destes resíduos na confecção de concretos, além de minimizar o impacto ambiental da extração de certos minerais, pode melhorar algumas propriedades do compósito. Entre as propriedades mais estudadas do concreto estão a resistência à compressão, módulo de elasticidade e a porosidade. Uma propriedade ainda pouco estudada é a resistência ao fogo, que é uma propriedade muito exigida para concretos estruturais em situação de incêndio.

Ao longo da história da humanidade, a preocupação e o temor frente a fenômenos desconhecidos quase sempre caminham paralelamente ao desejo de cifrá-los e dominá-los. Um exemplo típico é o fogo, originalmente fonte de destruição, mas progressivamente transformado em manancial de calor e ferramenta de ampla utilização. Ainda hoje, entretanto, quando este fator se descontrola tomando a forma de um incêndio, causa pânico e assombro a qualquer pessoa. Tais sentimentos de insegurança são acentuados pelo fato de os incêndios

serem fenômenos influenciados por um grande número de parâmetros, muitos destes aleatórios, o que faz com que cada ocorrência seja fenômeno único. Desta maneira, não é possível determinar como, onde ou com que severidade os incêndios ocorrerão (GOUVEIA, 2001).

Durante incêndios os elementos estruturais podem sofrer danos que levarão a estrutura ao colapso, podendo resultar em perdas humanas. Outro aspecto é o dano humano devido à intoxicação por gases liberado na combustão de materiais. O concreto endurecido é incombustível, não exala gases tóxicos e por isso os produtos da combustão não são prejudiciais à saúde humana; é um mal condutor de calor (baixa condutividade térmica a temperatura ambiente) em relação aos metais, e os elementos estruturais de concreto apresentam uma elevada massividade se comparados aos elementos metálicos. Essas características concedem ao concreto uma boa resistência ao fogo (COSTA et. al., 2002).

Diferentemente do aço, quando sujeito a temperaturas da ordem de 700°C a 800°C, o concreto é capaz de manter resistência suficiente por períodos relativamente longos, permitindo operações de resgate pela redução do risco de colapso estrutural. Entretanto, a deterioração do concreto, ao ser aquecido, manifesta-se na forma de rachaduras, estalos (pipocamentos) e até lascamentos. Esses últimos podem ser explosivos ou não. A natureza polifásica do concreto (pasta, agregados, aço) conduz à degradação diferencial do concreto armado afetando as propriedades mecânicas por meio da redução na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos materiais e há perda de rigidez da estrutura podendo levar as peças estruturais à ruína (COSTA et. al., 2002).

O lascamento do concreto, também conhecido como "spalling", é um fenômeno físico de esfoliação das camadas, ora instantânea e violenta, ora gradual e progressiva, próximas à superfície dos elementos de concreto quando estes são expostos a altas temperaturas ou a gradientes térmicos elevados caracterizados por aquecimentos muito rápidos (NINCE e FIGUEREDO, 2008).

A porosidade e a mineralogia do agregado parecem exercer uma influência importante no comportamento do concreto exposto ao fogo. Agregados porosos, dependendo da taxa de aquecimento e tamanho do agregado, permeabilidade e umidade, podem ser suscetíveis a

expansões destrutivas levando ao pipocamento. Além de possíveis transformações de fases e decomposição química do agregado, a resposta do concreto ao fogo é influenciada, de outras maneiras, pela mineralogia do agregado. Por exemplo, a mineralogia do agregado determina a dilatação térmica entre o agregado, a pasta de cimento e a resistência última da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como citado acima o resíduo estudado pode apresentar bons resultados frente ao fogo devido a sua elevada massa específica e baixa porosidade. Por outro lado acredita-se que por ser um resíduo rico em óxido de ferro (magnetita) que é muito denso possa produzir um concreto que possua propriedades que sejam importantes para se evitar ou ainda diminuir o processo do lascamento. Sendo um produto pesado acredita-se que possa reter menos água. Segundo Metha e Monteiro (1994), minérios de ferro hidratados são às vezes incorporados aos agregados para produção de concretos pesados.

A partir das análises físicas e mecânicas de concretos confeccionados com resíduo da indústria mineradora em substituição aos agregados normalmente utilizados podem-se avaliar as possibilidades do seu uso em escalas maiores. A obtenção de resultados satisfatórios desta substituição dará a indústria mineradora regional um subproduto que antes era tratado como resíduo, como ocorreu com a escória de alto-forno e o pó-de-pedra. A escória que era um resíduo da indústria siderúrgica tornou-se uma das principais matérias primas da fabricação de cimento, já o pó-de-pedra, gerado no fundo das mineradoras que extraem calcário para a fabricação do cimento, atualmente, é uma das principais fontes de agregados miúdos artificiais que substituem a areia natural de rios utilizada na fabricação de concretos. Acredita-se que o resíduo rico em óxido de ferro disponível na região pode seguir o mesmo caminho. Por ser um resíduo denso espera-se que seja resistente ao lascamento em relação a outros concretos, obtendo assim um compósito mais resistente.

Assim, torna-se necessária a busca de tecnologias para se utilizar este tipo de resíduo na construção civil que cresce e necessita de mais materiais. Outro fato que tem que ser considerado, é que a areia hoje utilizada é retirada do leito de rios, provocando enormes prejuízos ao meio ambiente, e sua disponibilidade já se torna escassa.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com adição de resíduos da mineração em substituição parcial e total da areia natural de rios, visando obter um compósito cimentício mais denso com boas aplicações na indústria da construção e em especial em situação de incêndios.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Entre os objetivos específicos estão:

- Caracterizar o resíduo das indústrias mineradoras da mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, visando a sua utilização em compósitos cimentícios densos;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas presentes em argamassas obtidas a partir da substituição da areia natural pelo resíduo com grande concentração em óxido de ferro;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas presentes em concretos obtidos a partir da substituição da areia natural pelo resíduo com grande concentração em óxido de ferro;
- Mensurar a temperatura em que ocorre lascamento das argamassas e dos concretos obtidos a partir da substituição da areia natural pelo resíduo com grande concentração em óxido de ferro;
- Contribuir para o avanço do conhecimento sobre o concreto, explorando aspectos referentes à utilização de resíduos industriais com a presença de óxido de ferro (magnetita).

## 1.2 Justificativa

Na mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro estão instaladas duas mineradoras que produzem matéria prima para a indústria de fertilizantes fosfatados. A Bunge Fertilizantes no município de Araxá e a Fosfértil no município de Tapira. Além destas, existe uma terceira mineradora que extrai pirocloro para produção de derivados de nióbio.

A rocha fosfática encontrada nesta região tem uma concentração de 9% de apatita que é o mineral de interesse em meio a outros minerais. A lavra acontece a céu aberto, retirando-se a parte estéril encontra-se uma faixa que possui na sua constituição óxido de titânio, e, depois, o mineral de interesse. Este mineral passa por várias etapas de moagem e redução granulométrica até chegar à usina onde é concentrado, chegando a teores de 36% de apatita. Parte do produto que chega à usina é descartado como rejeito que têm na sua formação vários óxidos, dentre eles, o óxido de ferro com predominância em magnetita. Este produto é levado para lagoas de decantação e amontoados causando grande impacto ambiental. Neste rejeito cerca de 70% em concentração é óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) proveniente das etapas de deslamagem e separação magnética. A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) é o produto obtido da separação magnética ocorrida nas usinas de concentração. Por ser um material pesado e denso (densidade da magnetita  $5,18 \text{ Kg/dm}^3$ , densidade do resíduo  $4,44 \text{ Kg/dm}^3$ ) com grande concentração de ferro, o rejeito é depositado em lagoas de decantação onde a água é recolhida para ser usada novamente na planta e a parte sólida é colocada em monturos a céu aberto provocando enorme preocupação devido às questões ambientais. O presente trabalho estudou a utilização do resíduo gerado em concretos estruturais, com contribuição para redução do impacto ambiental.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto**

A utilização do concreto, diferente na atualidade, mas com características semelhantes, perde-se na antiguidade. Já era conhecido e aplicado nos tempos do Império romano. Os assírios e babilônios pioneiros da construção usaram argila como aglomerante, mas a sua fraca resistência não permitiu um maior desenvolvimento das construções. Os egípcios conseguiram uma ligação mais rígida com argamassa de cal e gesso, como atestam suas pirâmides e templos. Os romanos criaram um aglomerante de grande durabilidade adicionando ao calcário determinada cinza vulcânica do Vesúvio, chamada pozolana. Em 1824, o escocês Josef Aspadin desenvolveu um cimento semelhante ao atual, dando-lhe o nome de Portland, nome de uma cidade do litoral sul da Inglaterra, onde existem rochedos com a mesma cor esverdeada do cimento descoberto. Em 1845, Johnson produziu um cimento do mesmo tipo que o Portland. Apesar de descoberto o aglomerante ideal, nenhum desenvolvimento notável se verificou em estruturas de concreto, devido principalmente a fraca resistência do material aos esforços de tração.

Somente em meados do século XIX, quando surgiu a idéia de adicionar ao concreto um material de elevada resistência a tração, é que progressos relevantes se fizeram sentir. Nascia assim o concreto armado. Em 1849, o Frances Lambot construiu o primeiro objeto de “cimento armado”, e posteriormente concreto armado. O objeto construído por Lambot, um barco na verdade, era feito de argamassa armada e foi exibido na exposição de Paris em 1855. Porém, a invenção do concreto armado é muitas vezes atribuída ao paisagista Monier que baseando nas idéias de Lambot, em 1861 construiu um vaso de flores com argamassa de

cimento, areia e armadura de arame. Em 1867 obteve sua primeira patente para a construção de vasos, em 1868 a patente se estendeu para tubos e reservatórios, em 1869 a placas, em 1873 a pontes e em 1875 a escadas (SOUZA JUNIOR, 2010).

No Brasil, Emilio Henrique Baungart pode ser considerado o “pai” da Engenharia Estrutural Brasileira, tendo projetado varias obras com diversos recordes mundiais em tamanho e originalidade. Entre exemplos de obras estão a Ponte Herval (Santa Catarina) em 1928 e um edifício no Rio de Janeiro com 22 andares considerado na época o maior do mundo.

O material mais largamente usado pela humanidade com exceção da água é o concreto. No ano de 1993, 63 milhões de toneladas de cimento foram convertidas em mais de 500 milhões de toneladas de concreto, isso somente nos EUA, sendo esta massa cinco vezes maior que o consumo de aço. Em muitos países o consumo de concreto chega a 10 vezes a mais que o consumo do segundo material mais utilizado pela construção civil. No mesmo ano o consumo mundial de concreto chegou aos 3 bilhões de toneladas. Atualmente a proporção do uso de concretos é muito diferente do que há trinta anos. Estima-se que o consumo mundial chegue a 5,5 bilhões de toneladas.

O concreto não é tão resistente quanto ao aço, mas é um material extremamente resistente á água, por isso é largamente utilizado em estruturas que estão em contato com água. De fato uma das primeiras aplicações conhecidas consistiu em aquedutos e muros de contenção de água construídos pelos romanos. Atualmente o uso de concreto para tanques de estocagem de água, canais, canalizações e outros é uma constante. A durabilidade do concreto a algum tipo de água agressiva é responsável pelo fato do seu uso ter sido estendido a muitos ambientes agressivos tanto industriais como naturais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A segunda razão para o uso tão difundido do concreto é a facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos.

A terceira razão para a popularidade do concreto entre os engenheiros, é que ele é normalmente o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro. Comparando o concreto com a maioria dos materiais de engenharia, a sua produção requer menor consumo de energia, além de possuir grande poder de imobilização de resíduos industriais (METHA e

MONTEIRO 1994). O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio aglomerante contínuo, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de sólidos. Normalmente ele é feito com a mistura de cimento portland, agregados e água.

Os concretos são classificados de diversas formas. Uma das classificações é pela resistência à compressão e são concretos de baixa resistência, concretos de moderada resistência e concretos de alta resistência.

A resistência à compressão é a medida da tensão exigida para romper o material sob um esforço de compressão. O concreto é o material adequado para resistir à carga de compressão; é por isso que a resistência à compressão do material é geralmente especificada.

Outra propriedade importante é o módulo de elasticidade, que é definido como a relação entre tensão e essa deformação reversível.

O concreto fresco sofre retração de secagem quando exposto a umidade ambiente. Analogamente, deformações de contração térmica aparecem quando o concreto quente é resfriado à temperatura ambiente. As deformações de retração térmica são críticas no concreto, porque quando restringidas, manifestam-se como tensões de tração. Sendo a resistência de tração do concreto baixa, as estruturas do concreto muitas vezes fissuram como resultado do impedimento da retração, causado por mudanças de umidade e temperatura. A fissuração do material é uma das mais sérias desvantagens da construção com concretos. Finalmente, o julgamento profissional na seleção de um material deve levar em consideração não somente a resistência, a estabilidade dimensional e as propriedades elásticas do material, mas também a sua durabilidade, as quais existem implicações econômicas nos custos de manutenção e substituição de uma estrutura. A durabilidade é definida como a vida útil de um material sob dadas condições ambientais. Normalmente concretos densos e impermeáveis têm longa durabilidade. Os revestimentos em concreto dos tanques de água da ilha de Rhodes na Grécia, que datam de 2700 anos, estruturas de concreto hidráulico feitas pelos romanos são testemunhos da excelente durabilidade do concreto.

O concreto é altamente resistente à ação do fogo isso se deve às propriedades dos agregados, pois os mesmos representam 70% do concreto. Várias pesquisas já demonstraram a

importância das propriedades dos agregados na resistência do concreto. O tipo de agregado influencia na resposta do concreto a altas temperaturas.

Os agregados com sílica na sua constituição têm maiores perdas do que aqueles com calcário ou outras rochas básicas. Os agregados carbonáticos tem uma expansão súbita, como os quartzosos, a temperatura de 700°C. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Além de possíveis transformações de fases e decomposição térmica do agregado, a resposta do concreto ao fogo é influenciada, de outras maneiras, pela mineralogia do agregado. Por exemplo, a mineralogia do agregado determina a dilatação térmica diferencial entre o agregado e a pasta de cimento, o que leva a resistência última da zona de transição, esse ato contínuo leva a ruína do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ao elevar a temperatura ( ambiente até 800°C) dar-se-á a desidratação dos componentes do cimento, a água evapora-se ao sair do concreto, provoca a retração da pasta de cimento. Ao mesmo tempo o agregado começa a expansão e, pelo que se obtém em consequência destas duas ações, a pasta começa a fissurar provocando perda de resistência (COUTINHO, 1987).

### **2.1.1 Agregados**

O desempenho e o estudo dos agregados são de suma importância do ponto de vista da tecnologia do concreto. Sabe-se que os agregados correspondem a 70% do concreto e exercem grandes influências nas propriedades do concreto, não sendo assim totalmente inertes. Além de cumprir papel econômico de máxima importância em virtude do baixo custo por unidade de volume no concreto, o agregado atua de maneira determinante no desdobramento de certas características, tais como a resistência, estabilidade dimensional, redução da retração e durabilidade (BAUER et al., 1982).

O agregado é o material granular, tal como areia, pedra britada e pedregulhos. A NBR 9935 (ABNT 1987) define agregado como sendo material granular pétreo, sem forma ou volume definido, a maioria das vezes quimicamente inertes, obtido pela fragmentação natural ou

artificial, com propriedades e dimensões adequadas para serem utilizados em obras de engenharia.

Em geral os agregados para concretos são procedentes de jazidas naturais, e são, portanto, designados como agregados naturais. Podem ser utilizados outros tipos de agregados provenientes de resíduos industriais. Os agregados naturais são os mais importantes para produção de concreto de cimento portland. Devido às preocupações ambientais é que a indústria do concreto tem buscado alternativas viáveis na substituição dos agregados naturais por outros provenientes das atividades industriais. A areia de sílica natural, predominantemente usada como agregado miúdo é retirada de leitos de rio causando grande impacto ambiental.

Os agregados graúdos são formados por partículas maiores que 4,8mm. Os agregados miúdos são formados por partículas menores que 4,8mm e maiores que 0,075mm. Pedregulho é o agregado graúdo obtido da abrasão de rochas ou processamento (britagem). O termo areia é naturalmente usado para o agregado miúdo resultante da desintegração natural e do processamento de rochas arenosas friáveis.

Agregados são relativamente baratos e não entram em reações químicas complexas com água; portanto, tem sido usualmente tratados como material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão do papel desempenhado pelos agregados na determinação de muitas propriedades do concreto, este ponto de vista tradicional, dos agregados como material inerte está seriamente questionado.

A principal aplicação dos agregados é na fabricação de concretos e argamassas onde, em conjunto com um aglomerante (pasta de cimento portland e água), constituem uma rocha artificial, com diversas utilidades em engenharia de construção, cuja principal aplicação é compor os diversos elementos estruturais de concreto armado.

Uma das variáveis que pode influenciar nas propriedades dos concretos, são as características dos agregados. As características importantes dos agregados para a tecnologia do concreto são a massa específica, porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência a compressão, módulo de elasticidade e os tipos

de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da composição mineralógica da rocha matriz, das condições de exposição nas quais a rocha é submetida antes de gerar o agregado. Agregados de minerais naturais, que compreendem mais de 90% do total dos agregados usados na produção de concreto. Os agregados correspondem a 70% do material de enchimento e inertes, são de grande importância na constituição do concreto.

## **2.1.2 Classificação tecnológica dos agregados.**

### **2.1.2.1 Quanto à origem**

Quanto à origem, os agregados são classificados como naturais ou artificiais. O natural é aquele que é encontrado na natureza em estado de ser utilizado ou que necessita de pequeno processamento. Como exemplo pode citar a areia lavada e o seixo rolado (pedregulho) extraído de rios, areia de mina (cava), areia de duna, areia de barranco, jazida de solo pedregulhoso, escória vulcânica, pedra pome, etc. O agregado artificial é aquele que após sua extração da natureza sofre um processo de industrialização com objetivo de atingir propriedade específica (granulometria, por exemplo). Podemos citar como agregados artificiais a pedra britada, pó de pedra (areia artificial), vermiculita, pérolas de isopor, cinzas volantes, argila expandida, escória de alto forno, etc.

Os agregados mais usados para fabricação de concreto e argamassa são as areias naturais quartzosas, principalmente a areia lavada proveniente de portos de areia (areais), e a pedra britada proveniente de pedreiras. O seixo rolado, a argila expandida e o pó de pedra (areia artificial) apresentam propriedades mecânicas que permitem sua utilização como agregados de concreto estrutural. No entanto, outros agregados citados não podem ser usados em função estrutural, dando, porém, características especiais aos concretos e argamassas, como por exemplo, a vermiculita ou pérolas de isopor que conferem leveza e baixa condutibilidade térmica ao material.

Merece comentário especial a utilização crescente de finos de britagem no concreto estrutural, face ao crescimento do consumo de areia natural, às restrições ambientais, à exaustão de

reservas próximas aos grandes centros consumidores e ao incremento dos custos de transportes. O resíduo fino oriundo de pedreiras, chamado pó de pedra, apresenta uma granulometria que compromete o custo, a trabalhabilidade e a resistência do concreto, devido à necessidade de grande adição de água à mistura. Pesquisas estão sendo feitas com o objetivo de reduzir a quantidade de material pulverulento, resultando no desenvolvimento de sistemas de lavagem e classificação que permitam o aparecimento da “areia brita”. A areia de brita apresenta conteúdo de material pulverulento menor que o encontrado no pó de pedra e granulometria média estável e, desde que misturado às areias naturais, mostra desempenho interessante quanto ao consumo de cimento. A razão da necessidade da adição de areia natural à mistura deve-se à forma angulosa da areia artificial produzida, o que dificulta a trabalhabilidade do concreto empregado. O uso de areia artificial com adição de areia natural é hoje técnica bastante difundida entre as empresas concreteiras (TERRA, 2003).

#### **2.1.2.2 Classificação quanto à massa específica**

Os agregados classificam-se em leves, normais ou pesados conforme sua massa específica aparente ( $\Omega$ ) fique dentro dos seguintes limites:

- leves –  $\Omega < 1000 \text{ kg/m}^3$ , por exemplo vermiculita, pérolas de isopor, argila expandida, pedra pome, etc;
- normais –  $1000 \text{ kg/m}^3 < \Omega < 2000 \text{ kg/m}^3$ , por exemplo, areia quartzosa, brita e seixos rolados graníticos;
- pesados –  $\Omega > 2000 \text{ kg/m}^3$ , por exemplo, brita de barita e magnetita.

Como cerca de 70 a 80% do volume do concreto é constituída pelos agregados, esta propriedade permite que sejam fabricados concretos com diversas aplicações, conforme sua massa específica seja maior ou menor. O concreto normal de uso estrutural, confeccionado com areia lavada quartzosa e brita de granito, possui massa específica da ordem de 2200 a 2500  $\text{kg/m}^3$ , conforme se trate de concreto simples ou concreto armado. O concreto e a argamassa leve, com massa específica inferior a 2000  $\text{kg/m}^3$ , normalmente, não têm aplicação

estrutural, sendo usado, no entanto para redução de cargas permanentes e isolamento térmico e acústico. Os concretos pesados são usados em condições especiais, possuindo massa específica superior a  $2500 \text{ kg/m}^3$ , em estruturas que necessitam de alto grau de isolamento tais como: edifícios de contenção de reator nuclear e escudo biológico.

### **2.1.2.3 Classificação quanto à composição mineralógica**

O conhecimento da natureza dos agregados é de fundamental importância para a fabricação de concretos e argamassas. Os agregados são, com frequência, considerados inertes, embora em alguns casos possuam características físico-químicas (modificação de volume por variação de umidade) e químicas (reação com os álcalis do cimento) que influem diretamente na qualidade final das argamassas e concretos produzidos. Por exemplo, quando do emprego de rocha calcária e de escória de alto forno como agregado, podem ocorrer reações químicas expansivas entre o agregado e o cimento, principalmente em meio úmido, devido à reação entre álcalis do cimento e a sílica não cristalizada do agregado, bem como, a reação dos álcalis do cimento com o carbonato de magnésio de certos calcários dolomíticos.

Em relação à composição mineralógica, os agregados podem ser provenientes da decomposição de três tipos de rochas:

- **Ígneas:** São as rochas que se formaram pelo resfriamento e endurecimento de minerais em estado de fusão. Podem apresentar estrutura cristalina ou ser amorfas, de acordo com a velocidade de resfriamento. Resultantes de atividades vulcânicas são também conhecidas como rochas magmáticas. Seu componente principal é a sílica. Quimicamente, são as mais ativas. Por exemplo: granito, basalto e pedra-pomes;
- **Sedimentares:** São as rochas estratificadas em camadas, que se originaram da fragmentação de outras rochas. Por exemplo: calcário, areia, cascalho, arenito e argila;
- **Metamórficas:** São as rochas que se originaram da ação de altas temperaturas e fortes pressões sobre rochas profundas, sem que ocorresse fusão do material original. São,

portanto, resultantes da metamorfose de rochas ígneas ou de rochas sedimentares. Por exemplo: gnaisse, mármore, ardósia e pedra-sabão.

#### 2.1.2.4 Classificação quanto à dimensão dos grãos

A distribuição granulométrica, determinada segundo a ABNT NBR NM 248, deve atender aos limites estabelecidos na Tabela 2.1. Podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas na Tabela 2.1, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 2.1 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5mm	0	0	0	0
6,3mm	0	0	0	7
4,75mm	0	0	5	10
2,36mm	0	10	20	25
1,18mm	5	20	30	50
0,60mm	15	35	55	70
0,30mm	50	65	85	95
0,15mm	85	90	95	100

NOTAS  
1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.  
2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.  
3 O módulo de finura utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

O agregado é chamado de graúdo quando pelo menos 95% de sua massa é retida na peneira de malha 4,8 mm e passa na peneira 152 mm, conforme definido na NBR 7211 (ABNT, 1982). A Tabela 2.2 apresenta a classificação dos agregados graúdos conforme apresentado na NBR 7211 e na NBR 7225 (ABNT, 1982), bem como a classificação comercial comumente utilizada pelas pedreiras.

Tabela 2.2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D <sup>1)</sup>				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 <sup>2)</sup>	87 – 100	-
19 mm	-	2 <sup>2)</sup> – 15 <sup>2)</sup>	65 <sup>2)</sup> – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5 <sup>2)</sup>	40 <sup>2)</sup> – 65 <sup>2)</sup>	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 <sup>2)</sup>	80 <sup>2)</sup> – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 <sup>2)</sup> – 65 <sup>2)</sup>	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>2)</sup> – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.  
2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

### 2.1.3 Influência dos agregados na reologia dos concretos

O conhecimento de certas características dos agregados (massa específica, composição granulométrica e teor de umidade) é uma exigência para a dosagem dos concretos. A porosidade ou massa específica, a composição granulométrica, a forma e textura superficial dos agregados determinam as propriedades do concreto em estado fresco. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta a sua resistência a compressão, dureza, módulo de elasticidade e sanidade, que por sua vez influenciam várias propriedades do concreto endurecido contendo agregado. É evidente que as características dos agregados, importantes para a tecnologia do concreto, são decorrentes da microestrutura do material, das condições prévias de exposição e do processo de fabricação.

Geralmente, as propriedades dos agregados são discutidas em duas partes com base nas propriedades que afetam as proporções de dosagem e o comportamento do concreto fresco e endurecido. Devido à considerável sobreposição dos dois aspectos, é mais apropriado dividir

as propriedades nos seguintes grupos: características dependentes da porosidade; características dependentes das condições prévias de exposição e condicionantes de fabricação; características dependentes da composição química e mineralógica.

## **2.2 Resíduos da atividade mineradora**

Os minerais constituem os insumos básicos mais requeridos pela civilização moderna. São utilizados nas indústrias do aço (ferro), cerâmica (argilas, caulim, calcários, feldspatos, filitos, quartzo, talco, etc.); do vidro (quartzo, calcários, feldspatos, etc.); de cimento e cal (calcários, gipsium, etc.); química (cloretos, fosfatos, nitratos, enxofre etc.); de papel (caulim, carbonato de cálcio, talco, etc.); bem como na construção civil (areia, brita e cascalho), além das espécies consideradas insumos da indústria joalheira (gemas).

Nem sempre esses minerais apresentam-se na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, quer seja por suas granulometrias (tamanhos) quer por estarem associados a outros minerais, que não têm interesse ou são indesejáveis para o processo industrial a que se destinam. É exatamente para a adequação dos minerais aos processos industriais que se utiliza o beneficiamento dos minérios (MME, 2009).

O beneficiamento de minérios é o tratamento industrial que prepara granulometricamente, purifica ou enriquece minérios por métodos físicos ou químicos, sem alterações da constituição química dos minerais. O beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito que são rochas ou minerais inaproveitáveis na indústria mineral. (ARAUJO, 2006)

Basicamente, o beneficiamento de minério pode ser dividido em três etapas: preparação, no qual o minério é reduzido a pequenos fragmentos por britagem e/ou moagem; concentração, para separar o minério desejado de outros minerais, podendo ser por separação magnética, separação eletrostática e ciclonagem, dependendo do tipo de minério; e por fim o processo de remoção do excesso de água do concentrado e disposição do rejeito. A água recuperada é retornada para planta de processamento da mina sendo utilizada onde possível. (VICK, 1983)

Já existe na atualidade, empresas que dão um destino mais nobre aos rejeitos dos seus processos industriais. A Usiminas em 2006 arrecadou 140 milhões de reais com negócios com rejeito. A companhia mineral já vende 93% de todas as sobras do processo industrial. Somente 7% do seu rejeito, composto por óxidos de ferro, ainda não é comercializado porque perdeu mercado com a era da TV digital, pois era utilizado na produção de componentes eletrônicos dos aparelhos de televisão mais antigos.

A figura 2.1 mostra um fluxograma típico do beneficiamento de minério.

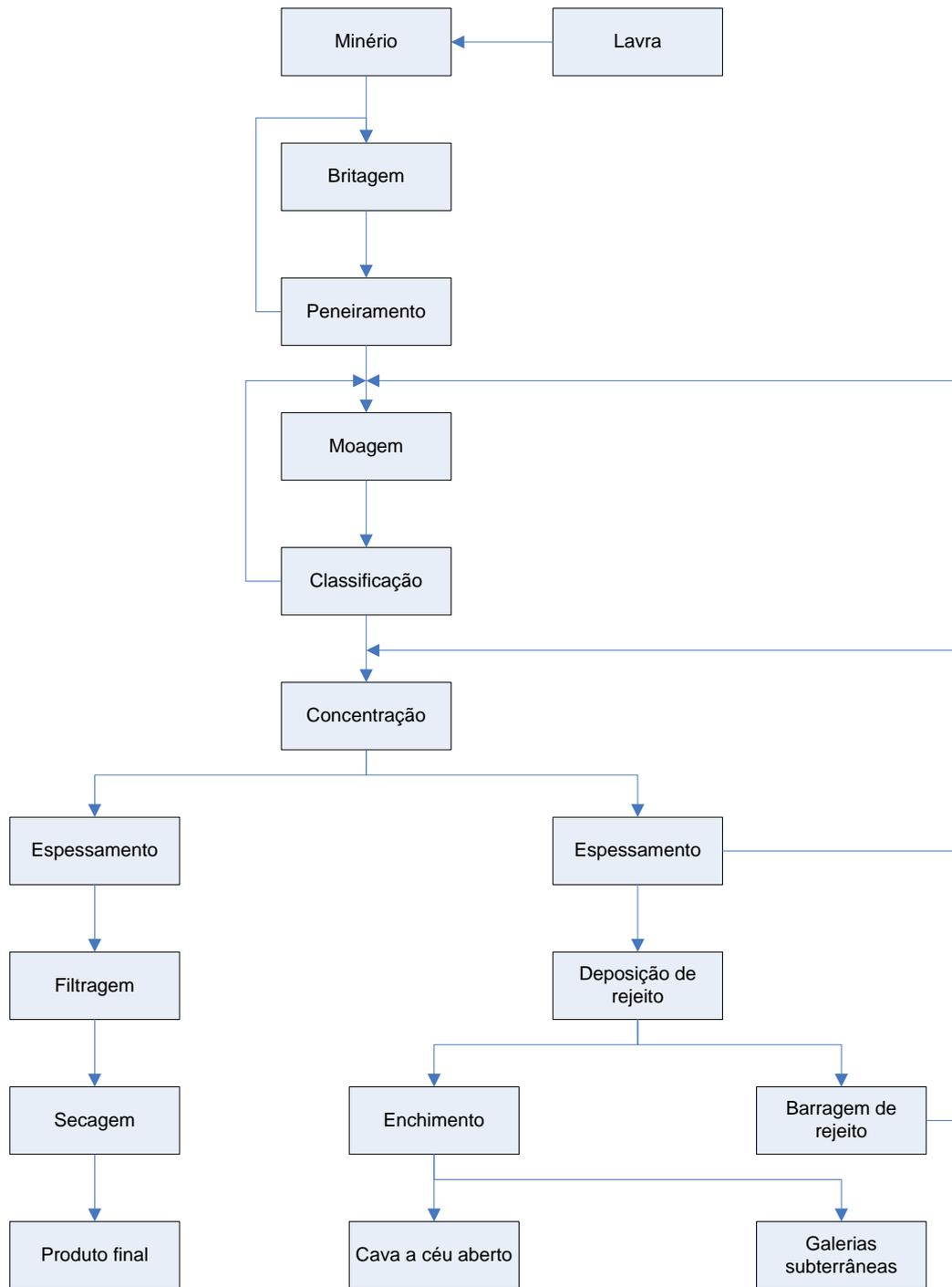


Figura 2.1 - Fluxograma típico do processo de beneficiamento (adaptado de MARTINS, 2006)

### **2.2.1 Passivo ambiental**

O extrativismo mineral é considerado como uma atividade altamente degradante, principalmente pelo volume de material que ela movimenta, em forma de minério e rejeito. Os impactos ambientais associados à disposição de rejeito representam um passivo ambiental na atividade de extração mineral considerando principalmente o volume de rejeitos gerados. Os problemas ambientais têm sido tratados com atenção pela maioria das empresas mineradoras devido à grande quantidade de rejeitos gerados e escassez de áreas para dissipação.

Os rejeitos ocupam espaços que poderiam ser utilizados para outras atividades (agricultura e preservação ambiental, por exemplo) e originam situações de risco ambiental como poluição de aquíferos, ruptura de barragens e de pilhas de estéreis e rejeitos (Sanchez, 1993). Atualmente a disposição de rejeitos tem sido um aspecto muito focalizado nos estudos do plano diretor de uma empresa de mineração (FERNANDES E SANTOS, 2008).

Uma indústria em Jacareí – SP é um exemplo de desastre ambiental causado pela má disposição de rejeitos. A Indústria foi fechada pela Justiça por poluição sem controle e por acumular 120.000 toneladas de rejeitos de chumbo à céu aberto no pátio da fábrica provocando contaminação do meio ambiente e trabalhadores. É necessária elaboração de um projeto de disposição de rejeito que satisfaça aos requisitos de segurança, controle de contaminação, capacidade de armazenamento e economia (AMORIM, 2007).

No princípio, os rejeitos eram descartados nas usinas de beneficiamento diretamente nos cursos d'água. Porém com o tempo novos sistemas de disposição foram sendo desenvolvidos (Martins, 2006). Na atualidade os rejeitos são depositados em barragens de contenção que representam um ao meio ambiente. Os acidentes implicam em severos e muitas vezes imprevisíveis danos ao meio físico, fauna e flora, com graves riscos à vida humana. Os acidentes com barragens de rejeitos vão desde vazamentos diversos, até a ruptura parcial ou total dessas estruturas (D' Agostino, 2008).

Tornando viáveis os subprodutos da mineração, dando uma destinação e aplicação ao rejeito por ela produzido, um dia será possível ter mineração sem rejeito (SEDEC, 2009).

### **2.2.2 Resíduos no Brasil**

A mineração contribui de forma decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das pessoas, sendo fundamental para o desenvolvimento da sociedade. Os minerais são essenciais para a vida moderna, estão associados a todos os eletrodomésticos, aos meios de transporte, e à grande maioria dos utensílios que usamos. No entanto, a mineração é uma atividade que gera um grande volume de rejeitos, devido à pequena concentração de metal encontrado no mineral bruto.

Os rejeitos são subprodutos do processo de beneficiamento de minérios, cujas características dependem do tipo de minério bruto a ser extraído. O rejeito não apresenta interesse comercial para a indústria e possuem alto potencial de poluição.

Os volumes de rejeitos gerados em grande escala são abordados na relação produto final/rejeito gerado. Razões médias entre o produto final e o rejeito gerado podem ser destacados como um exemplo explicativo da grande quantidade de rejeitos gerado. No processo de mineração: ferro 2/1, carvão 1/3, fosfato 1/5, cobre 1/30 e ouro 1/10000 (MARTINS, 2006).

Na Figura 2.2, pode ser observado o quadro anual de produção de rejeito no Brasil, estimado a partir dos dados do Anuário Mineral Brasileiro (Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2001).

Percentual de Rejeito de Mineração (Prod. Bruta - Prod. Beneficiada / Prod. Bruta)

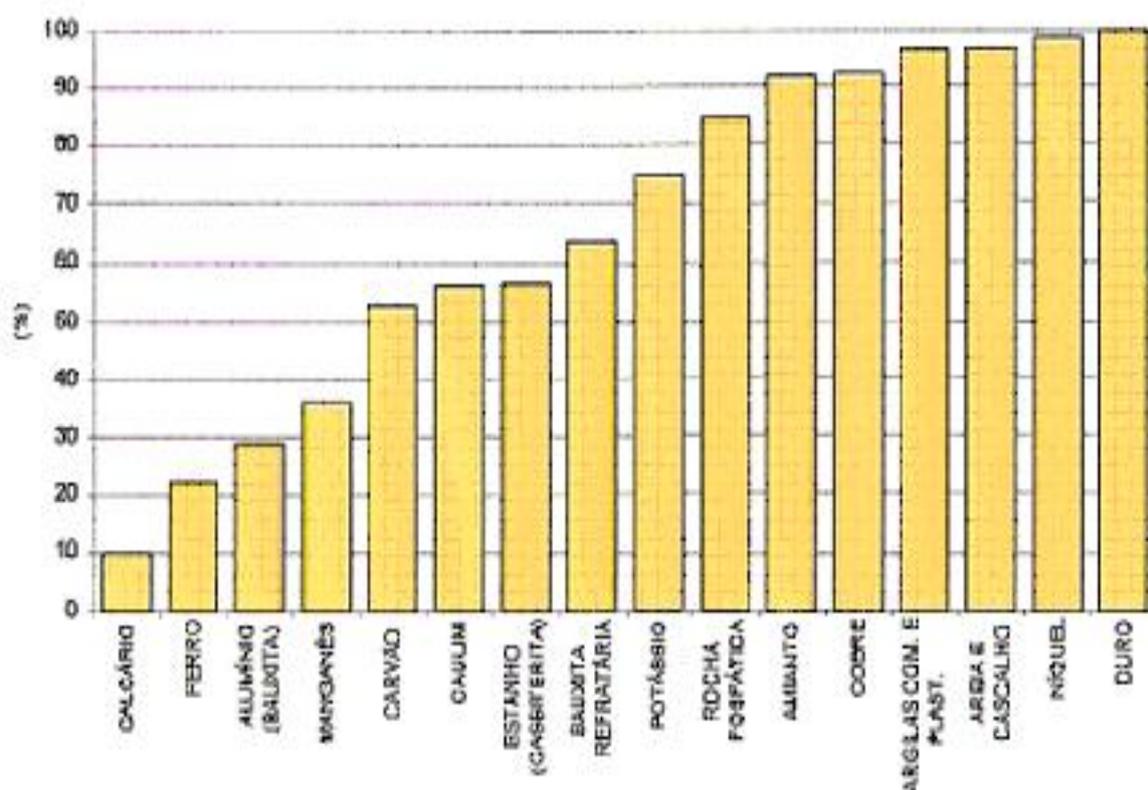


Figura 2.2 - Estimativa do percentual de rejeito de mineração (DNPM, 2001)

### 2.2.3 Resíduos na Mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro

Na Mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro atuam empresas mineradoras que exploram rocha fosfática em Araxá e Tapira e Nióbio em Araxá. A mina em Tapira é explorada a céu aberto e o concentrado inicial é de cerca de 9% de  $P_2O_5$  chegando a uma concentração final de 35% de  $P_2O_5$ , matéria prima na produção de adubos. O pirocloro mineral onde é encontrado o nióbio, é encontrado com concentração média de 2,5% de Nióbio, por isso a produção de resíduos é enorme. O mineral passa por várias etapas de concentração gerando também uma boa quantidade de rejeitos que são depositados em lagoas. Estima-se que na produção de 1 kg de nióbio gera-se cerca de 8 kg de resíduos e rejeitos.

O principal constituinte do resíduo magnético é a magnetita, que é um óxido de ferro magnético natural que se apresenta de forma livre ou combinada com outros. Encontrada como pequenos grãos e disseminadas nas rochas ígneas e metamórficas. É um mineral comum

e uma grande fonte de ferro. Pode ser reconhecido pela sua cor preta e ser atraído pela imã (Santana 2008). A magnetita é um mineral denso com massa específica de 5,18 Kg/dm<sup>3</sup>, com brilho metálico se apresenta na natureza na forma de óxidos com cerca de 70% de Fe.

Segundo ALYSON et AL(2005). foram feitas análises do resíduo produzido pelo CMT Tapira e constatado a seguinte composição mineral: magnetita 69%, hematita 23% e ilmenita 6%. Estes resultados foram obtidos através da espectrografia Mossbauer. Foram realizados ensaios de Difractometria de raios-X e de análises da composição química mineral presente no resíduo conforme tabela

Tabela 2.3 - Composição química por faixa granulométrica

Abertura em mm	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>TOTAL</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
0,420	1,57	74,40	2,27	2,20	11,23	1,02	3,46
0,210	2,21	73,06	2,03	3,07	10,38	0,85	3,55
0,149	2,16	77,37	1,76	2,94	9,36	0,61	2,65
0,074	1,76	79,59	1,66	2,27	8,61	0,64	2,63
0,037	1,58	78,90	1,67	2,12	7,98	0,67	2,41
0,019	1,53	80,63	1,68	2,12	7,83	0,83	2,57

Na Mesorregião do Alto Paranaíba e do Triângulo Mineiro, próximo a cidade de Araxá, estão localizadas três mineradoras que exploram nióbio, rochas fosfáticas e calcárias. Durante os processos de obtenção desses produtos é produzida uma grande quantidade de rejeitos que não são aproveitados por essas empresas e são depositados em barragens próximas aos locais de extração. Essas barragens causam poluição visual e ocupam espaços que poderiam ser usados para outras atividades, mas são necessárias para que os rejeitos provenientes da indústria da mineração não sejam carreados e venham assorear os aquíferos. Essas barragens são usadas também para reaproveitamento da água utilizada no processo e um reaproveitamento futuro.

Apenas uma das empresas mineradora do complexo minerador, anualmente deposita 3,2 milhões de toneladas de rejeito, a massa total acumulada até 2007 é de 65 milhões de toneladas (Reis, 2009). A empresa possui duas barragens que juntas tem capacidade de 25.000.000 m<sup>3</sup> e estão praticamente ocupadas. Uma terceira barragem tem 4,5 milhões de m<sup>3</sup>

com rejeitos sendo dragados para a usina, e a quarta é o reservatório em operação com capacidade de 4,7 milhões m<sup>3</sup> sendo 65% de sua capacidade preenchida.

Outra indústria mineradora do complexo possui ao todo seis barragens. A barragem de lamas tem capacidade de 144 milhões de m<sup>3</sup> e a barragem de rejeitos tem capacidade para 98 milhões de m<sup>3</sup>. As duas barragens são para a contenção de rejeitos de magnetita e captação de água. A barragem do Ribeirão do Inferno com capacidade de 8,3 milhões de m<sup>3</sup> é utilizada para armazenamento e para captação de água. As demais barragens da empresa são utilizadas para armazenamento de sólidos e passagem de água. (Revista Minérios & Minerales, Edição 298)

### 2.3 Óxidos de ferro

Os óxidos de ferro, dada a abundância do ferro e suas propriedades, exercem papel fundamental na crosta terrestre. Dentre eles se destaca a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), que é um óxido de ferro com características bastante peculiares (SANTANA, 2008).

A descoberta do ímã se deu vários séculos antes de Cristo, e não há apenas uma versão para tal descoberta. Uma versão conta que o poder de atração de um tipo de pedra, conhecida hoje por magnetita, calamita ou ímã de pedra, foi descoberta aproximadamente há 2.500 anos, por um pastor chamado Magnes. Ele, enquanto pastorava seu rebanho na região do Monte Ida, notou que o seu cajado, que tinha a ponta de ferro e os pregos do solado de suas sandálias aderiam fortemente a alguns tipos de pedras. A divulgação desse fato pelo pastor fez com que as pessoas dessa época denominassem inicialmente tais pedras com o seu nome, e mais tarde passaram a ser conhecidas como magnetos. Outra versão sustenta que muitos séculos antes, na região de Magnésia, na Ásia menor, foram encontrados grande quantidade de um mineral de ferro, que possuía poderes de atração por quase todos os metais férreos e recebeu o nome de Magnetita, em homenagem à região da descoberta desse mineral (Morais e Félix, 2004). Os chineses foram os primeiros a usar as propriedades da magnetita para construir as primeiras versões das bússolas atuais, favorecendo assim a orientação em viagens.

A magnetita é um óxido de ferro magnético natural que se apresenta na natureza de forma livre ou combinada a outros elementos. Encontrada como pequenos grãos, disseminada nas rochas ígneas e metamórficas. É o mineral magnético mais comum e uma importante fonte de ferro. Pode ser reconhecido por sua cor preta e por ser atraído por qualquer imã. As suas propriedades magnéticas permitem usá-las em antigas cabeças de gravação, nas fitas cassetes, no armazenamento de informações, filmes finos, em trens balas e mais recentemente no tratamento e diagnóstico do câncer (SANTANA, 2008).

A magnetita está sendo estudada pela medicina como uma forma de combate ao câncer. Nanopartículas magnéticas são grudadas em anticorpos para o combate à tumores por hipertermia. Esse mineral também é usado como agregado na confecção de concreto para blindagem de radiação ionizante proveniente de equipamentos de radioterapia. Além disso, a magnetita também é utilizada como adsorvedor na remoção de compostos orgânicos de soluções.

É um mineral muito denso, com peso específico 5,18, de brilho metálico, formado pelos óxidos de ferro II e III ( $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Apresenta na sua constituição, aproximadamente, 72,4% de Fe. Tem forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica. (WOLFF, 2009)

Grandes depósitos de magnetita foram encontrados em Kiruna, região nordeste da Suécia, e nas Montanhas Adirondack, na região de Nova Iorque dos Estados Unidos. Também foram encontrados depósitos na Noruega, Alemanha, Itália, Suíça, África do Sul, Índia, México, e nos estados americanos de Nova Jérsei, Pennsylvania, Carolina do Norte, Virginia, New Mexico, Utah e Colorado. É encontrada, algumas vezes, em grande quantidade nas areias de praia conhecidas como areia mineral, areia ferrosa ou areia preta. Este tipo de areia é encontrada em vários lugares, principalmente na Califórnia (Estados Unidos) e na costa oeste da Nova Zelândia.

No Brasil, a extração de minérios na Mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro em Minas Gerais resulta, após o beneficiamento do minério bruto, em um concentrado e um rejeito rico em magnetita, que não é aproveitado, sendo descartado pela indústria. Esse mineral ainda não é utilizado na indústria, pois o processo para obtenção de ferro metálico a

partir da magnetita, não se apresenta economicamente viável em virtude da grande demanda de energia durante o processo.

A indústria da construção civil tem enorme potencial para solução desse problema, incorporando os resíduos minerais ricos em magnetita, em materiais de construção como argamassas e concretos, podendo influenciar positivamente nas características físicas e possibilitando a confecção de argamassas e concretos a um custo inferior.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

O presente trabalho estudou o resíduo da indústria mineradora da microrregião do Planalto do Araxá. O resíduo foi coletado na empresa FOSFÉRTIL S/A na sua barragem de rejeito magnético. Este resíduo é resultado do processo de obtenção do concentrado de apatita que é matéria prima para a fabricação de fertilizantes.

##### 3.1.1 Materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova

O presente trabalho contou com uma fase experimental composta pela confecção, cura e ensaios laboratoriais de corpos-de-prova de argamassa e concreto com substituição da areia natural pelo resíduo da mineração. Os materiais utilizados na composição dos compósitos apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Descrição dos materiais utilizados para confecção dos compósitos cimentícios

Materiais	Descrição	Massa específica M.E. (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa unitária M.U. (Kg/dm <sup>3</sup> )	Módulo de finura M.F.
Aglomerante	Cimento Portland II E 32	2,950	1,000	-
Agregado miúdo	Areia Natural	2,667	1,420	2,760
	Resíduo	4,647	2,732	2,131
Agregado graúdo	Brita 1	2,682	1,000	6,949
Água	-	-	-	-

## 3.2 Métodos

O resíduo foi caracterizado físico e quimicamente. A caracterização física contou com os ensaios de umidade, granulometria, módulo de finura, massa específica, massa unitária, material pulverulento, teor de argila em torrões e materiais friáveis. A caracterização química e do grau de cristalinidade foi realizada pelos ensaios de caracterização via úmida, espectrometria de fluorescência de raios-X (EDX) e de difração de raios-X (DRX).

### 3.2.1 Caracterização do resíduo

O resíduo foi coletado na barragem de rejeitos pela equipe da empresa Fosfertil S/A e levado ao laboratório de preparação da amostra e depois levado para os testes e análise química via úmida. A amostra foi analisada de duas maneiras através do método de titulação por ataque de ácidos e análise de RX.

Da amostra foram separada três porções, uma para análise granulométrica, outra para análise química via úmida, ou seja, pelo método da titulação e a outra foi preparada e levada para leitura de RX.

Para a determinação do teor de umidade do resíduo foi pesada uma amostra e levada a estufa na temperatura de 105°C +/- 5°C. Foi mantida em estufa e pesada consecutivamente até a obtenção de constância de massa. Com os dados obtidos foi feito o cálculo de umidade do material conforme a equação 1.

$$U\% = (M_u - M_s) \times 100 / M_s \quad (1)$$

Onde,

U% é a umidade percentual do material;

M<sub>u</sub> é a massa úmida do material;

$M_s$  é a massa seca do material;

A análise granulométrica foi realizada para definir o tamanho das partículas do material, através do peneiramento a seco de uma amostra do resíduo e da pesagem dos grãos retidos em cada uma das peneiras da série normal de peneiras ABNT. Na Tabela 3.2 são apresentadas as peneiras utilizadas com suas respectivas aberturas de malha. As amostras foram quarteadas e pesadas em balança de precisão com capacidade máxima de 2,3kg e precisão de 0,1g. A amostra de 500g foi homogeneizada e previamente seca em estufa até a obtenção da constância de massa. O material seco foi colocado no conjunto de peneiras de 4,8mm a 0,075mm sob agitador, e o material retido foi pesado.

Tabela 3.2 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria

Série Normal	Série Intermediária
76 mm	-
-	64 mm
-	50 mm
38 mm	-
-	32 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,8 mm	-
2,4 mm	-
1,2 mm	-
0,6 mm	-
0,3 mm	-
0,15 mm	-

Em função das porcentagens retidas e acumuladas foi calculado o módulo de finura e a dimensão máxima dos agregados. O módulo de finura é a soma das porcentagens acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100, não sendo considerado o fundo e as peneiras intermediárias. Já a dimensão máxima característica é definida pela abertura da peneira, em mm, que retém uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%.

Para a determinação da massa específica (ME) foi utilizada balança de precisão com capacidade máxima de 2,3kg e precisão de 0,1g. Para o ensaio de massa específica foi utilizado o frasco de Chapman. Foi colocada água no frasco até o volume de 200cm<sup>3</sup>, a amostra foi previamente secada em estufa e, após pesada, foi introduzida no frasco de Chapman em pequenas quantidades com muito cuidado para não derramar fora do frasco, que contendo a amostra, foi agitado até a total eliminação das bolhas. Após um minuto de descanso foi feita a leitura final do volume deslocado (LF). A massa específica foi calculada através da equação 2.

$$ME = 500/LF \quad (2)$$

Para a determinação da massa unitária (MU) foi utilizado um recipiente previamente limpo, seco e de volume conhecido. O resíduo quarteado e homogeneizado foi colocado no recipiente e acertado a superfície com uma régua. Após esse procedimento foi pesado o recipiente contendo o resíduo e calculada a massa unitária. Para o cálculo foi utilizada a equação 3.

$$MU = M/V \quad (3)$$

Onde,

M é a massa do material;

V é o volume interno do recipiente;

Para a determinação do teor de material pulverulento foi separado do lote duas amostras A1 e A2, amostras foram previamente secas em estufa. A amostra A1 foi coberta com água e vertida em peneiras superpostas, sendo lavada até a completa limpeza, com a eliminação das partículas passantes. O material retido foi recolhido, seco e depois pesado. O cálculo foi efetuado conforme equação 4:

$$MP (\%) = (M_i - M_f) \times 100 / M_i \quad (4)$$

Onde,

MP (%) = teor de material pulverulento

$M_i$  = massa inicial

$M_f$  = massa final

Foi repetido o processo com a amostra A<sub>2</sub> e comparado os resultados.

Foi determinado o teor de torrões de argila e materiais friáveis, pois principalmente os de grandes dimensões, quando não dissolvidos durante a mistura do concreto, ocasionam pontos fracos em seu interior e quando dissolvidos envolvem os grãos resistentes dos agregados, reduzindo a aderência e conseqüentemente a resistência do concreto. Considera-se como sendo argila em torrões e materiais friáveis as partículas que puderem ser desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador.

Para essa determinação foi secada uma amostra do resíduo em estufa à 105°C +/- 5°C até a obtenção da constância de massa. Esta amostra foi peneirada sucessivamente através das peneiras com abertura de malha de 4,8 e 1,2mm. Após o peneiramento foram formadas sub-amostras com a massa superior a 200g, cada uma das sub-amostras foram pesadas, estendida em camada fina dentro de uma bandeja e examinada quanto a presença de torrões. Todo material que foi desfeito com os dedos foi considerado como sendo torrões de argila. Para mensurar a quantidade de torrões de argila e materiais friáveis, o material foi novamente peneirado na peneira com abertura de malha de 0,6mm. O material retido na peneira foi pesado. O teor de torrões de argila e materiais friáveis foi determinado através da equação 5.

$$MT (\%) = (M_i - M_f) \times 100 / M_i \quad (5)$$

Onde,

MP (%) = teor de material pulverulento

$M_i$  = massa inicial

$M_f$  = massa final

Materiais finos, como agregados miúdos, quando umedecidos podem sofrer um considerável aumento de volume, definido como inchamento. Esse fato ocorre devido ao afastamento dos grãos que compõem o agregado, provocado pela água livre que envolve sua superfície. Observa-se que areias finas apresentam inchamento superior ao constatado nas areias grossas. Em geral o inchamento varia de 20% a 30% para umidades na faixa de 5% a 8%. Acima desses valores a areia começa a saturar, ou seja, a água livre passa a ocupar os vazios existentes entre os grãos e, conseqüentemente a massa unitária aumenta e o inchamento reduz-se.

Para determinação do inchamento do resíduo foi utilizada uma amostra previamente seca em estufa à 105°C +/-5°C até a obtenção de constância de massa. Após o resfriamento da amostra, determinou-se a massa unitária com umidade (h) igual a 0%. Em seguida foi adicionada água de modo a obter os teores de umidade próximas a 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 e 12%. Para cada definição da massa unitária foi determinada a umidade do resíduo com aproximação de 0,1%. O material foi cuidadosamente homogeneizado após cada adição de água.

O inchamento do resíduo foi definido pela equação 6 a seguir.

$$I = (MU_o / MU_h) \times [ (100 + h) / 100 ] \quad (6)$$

Onde,

$MU_o$  = Massa unitária do agregado seco;

$MU_h$  = Massa unitária do agregado úmido;

h = Umidade do agregado ensaiado.

A morfologia do resíduo foi realizada por análise visual e para determinação da composição química foi empregada análise quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X, com aproximadamente 10g de amostra. Primeiro foi feito o ensaio de perda ao fogo a 1.000°C. Depois a amostra foi secada a 110°C durante tempo de uma hora. Foi utilizada uma balança analítica previamente tarada, e foi pesado o cadinho limpo e seco, sendo registrado o peso do cadinho vazio. Foi acrescentado ao cadinho de 1,5 a 2 gramas da amostra seca, o conjunto é pesado e registrado novamente o peso. O cadinho com a amostra foi colocado em mufla já pré- aquecida. Quando a mufla atingiu a temperatura de  $1000 \pm 50^\circ\text{C}$  a amostra foi calcinada por um período de 1 hora. Retirou-se o cadinho da mufla e o mesmo foi colocado sobre uma placa refratária até perder a incandescência. Em seguida o cadinho foi colocado no dessecador que ficou tampado até o cadinho e amostra atingirem a temperatura ambiente. Após esse processo foi registrado o peso final. Para o método de análise foi pesado 0,5000g de amostra e foi transferido para o cadinho de platina contendo tetraborato de lítio até à homogeneização da amostra com o fundente e foram colocados os cadinhos na máquina de fusão. Após a fusão, as pastilhas formadas foram encaminhadas para leitura no espectrômetro de raios-x utilizando curva de calibração preparada com matriz semelhante à amostra.

A macroestrutura do resíduo foi observada por análise visual cujas imagens foram registradas com uma máquina fotográfica HP Photosmart M637, com zoom ótico de 3x, lentes 5.9mm - 17.7mm e resolução de 7.2 megapixels, e auxílio de um tripé. A máquina fotográfica foi configurada para a melhor qualidade de imagem e flash luminoso automático.

A perda ao fogo (%PF) foi obtida de acordo com os procedimentos prescritos na NBR 5743/1989 (ABNT, 1989). Na execução do ensaio optou-se pelo método A, “Determinação direta - método de referência”, que consiste em colocar a amostra de 1,000g (+/- 0,001g) em um cadinho de porcelana tarado e calcinar em forno mufla à temperatura de  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  (+/-50°C), por 20 min.

Espera-se esfriar e é pesada a massa do cadinho mais amostra, após a calcinação em gramas. O valor de perda ao fogo foi obtido pela média aritmética de quatro determinações dadas pela Equação 3.

$$\%PF = \left( \frac{m_1 - m_2}{m} \right) \times 100 \quad (3)$$

onde:

$m_1$  = tara do cadinho mais massa de amostra ensaiada, em gramas (g)

$m_2$  = massa do cadinho mais amostra, após calcinação, em gramas (g)

$m$  = massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas (g)

Para o ensaio de perda ao fogo foram utilizados um forno tipo mufla, balança e cadinho de porcelana, conforme Figura 3.1.



Figura 3.1 –Materiais utilizados no ensaio de perda ao fogo.

### 3.2.2 Desenvolvimento e avaliação dos compósitos cimentícios

O presente trabalho contou com uma fase experimental composta pela confecção, cura e ensaios laboratoriais de corpos-de-prova de compósitos cimentícios com e sem agregado graúdo.

O compósito cimentício sem agregado graúdo foi confeccionado com o objetivo de produzir compósito sem a influência dos agregados graúdos. Para este compósito (argamassa) foram confeccionadas cinco proporções de materiais com substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo da indústria mineradora nos percentuais de 25, 50, 75 e 100% do volume do agregado miúdo. Na Tabela 3.3 são apresentadas as proporções dos materiais para a relação água cimento fixa (0,48) preconizada pela ABNT (1996).

Tabela 3.3 - Proporção de materiais utilizados para confecção do compósito cimentício sem agregado graúdo.

Materiais	Descrição	Quantidade (g)				
		Referência	25%	50%	75%	100%
Aglomerante	CP II E 32	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0
Agregado miúdo	Areia Natural	1872,0	1404,0	936,0	468,0	0,0
	Resíduo	0,0	828,6	1657,3	2485,9	3314,6
Água	-	300	300	300	300	300

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, foram conduzidos de acordo com a ABNT (1996). O compósito cimentício foi preparado por meio de um misturador mecânico e compactado manualmente nos moldes. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. Para tanto, foi necessário que a cuba de amassamento estivesse junto aos moldes durante o adensamento. A colocação do compósito cimentício na forma foi feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuído. Esta operação foi terminada com a rasadura do topo dos corpos-de-prova, por meio da espátula que foi deslizada sobre as bordas, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos-de-prova foram mantidos nas formas, sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques. Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova foram retirados da cura e ensaiados à compressão. O equipamento utilizado para os ensaios foi uma prensa hidráulica EMIC PC150. A velocidade de deslocamento do embolo do equipamento foi controlada por meio do ajuste de uma válvula de controle de fluxo de óleo. Na Figura 3.2 é observado o equipamento durante o experimento.



Figura 3.2 - Prensa hidráulica durante o experimento

Para confecção de concretos, a ABNT (2004) na NBR 6118/2004 elaborou uma correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto, sendo que essa qualidade é representada pela relação água/cimento em massa e classe de resistência do concreto, como deve ser observado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (ABNT, 2004)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de resistência do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS:

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

A determinação da proporção de materiais foi realizada para atender a Tabela 3.4, na classe de agressividade II com relação água/cimento  $\leq 0,60$  e classe de concreto  $\geq C25$ .

As classes de resistência do concreto foram determinadas pela NBR (ABNT, 1992). Elas são divididas conforme descrito nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Classes de resistência do grupo I (ABNT, 1992)

Grupo I de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)
C10	10
C15	15
C20	20
C25	25
C30	30
C35	35
C40	40
C45	45
C50	50

Tabela 3.6 - Classes de resistência do grupo II (ABNT, 1992)

Grupo I de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)
C55	55
C60	60
C70	70
C80	80

Os compósitos cimentícios com agregado graúdo, ou seja, concretos foram confeccionados quatro proporções de materiais com substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo da indústria mineradora nos percentuais de 25, 50 e 100% do volume do agregado miúdo. Na Tabela 3.3 são apresentadas as proporções dos materiais para a relação água cimento fixa 0,60.

Tabela 3.7 - Proporção de materiais utilizados para confecção dos concretos.

Materiais	Descrição	Quantidade (kg)			
		Referência	25%	50%	100%
Aglomerante	CP II E 32	12,7	12,7	12,7	12,7
Agregado miúdo	Areia Natural	28,24	21,18	14,12	0
	Resíduo	0	14,32	25,14	50,37
Agregado graúdo	Brita 1	33,60	33,60	33,60	33,60
Água	-	7,6	7,6	7,6	7,6

Para cada traço foram confeccionados 20 corpos-de-prova em moldes cilíndricos de aço, de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes durante 24h, e após a desmoldagem foram imersos em água potável para cura até o dia anterior a realização dos ensaios de resistência à compressão.

Antes da moldagem dos corpos de prova foram realizados os ensaios de caracterização física dos concretos confeccionados no estado fresco, através de ensaios de abatimento tronco de cone (*slump test*).

Os traços foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, sendo ensaiados cinco corpos-de-prova por idade. O ensaio de absorção de água, índice de vazios, massa específica, módulo de elasticidade estático e dinâmico foram realizados em três corpos de prova aos 28 dias, sendo que os corpos de prova ensaiados ao módulo de elasticidade foram os mesmos do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Os corpos de prova de concreto com 0, 25 e 50% foram submetidos aos testes de lascamento na presença de altas temperaturas. Da mesma maneira, os corpos de argamassa também foram levados para os testes de lascamento com 63 dias de cura. Foram submetidos à exposição de uma simulação de alta temperatura em forno tipo mufla com capacidade de elevação de temperatura de 0°C a 1000°C, três corpos de prova de cada traço, sendo que após a simulação de alta temperatura, foram capiados com enxofre e ensaiados sua resistência à compressão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos agregados

O resíduo estudado foi utilizado em substituição parcial e total do agregado miúdo natural na confecção de compósitos cimentícios e tiveram a sua caracterização física realizada. O resultado da massa específica dos agregados miúdos são apresentados na Figura 4.1. Observando os resultados apresentados é possível perceber que o agregado miúdo do resíduo apresentou massa específica 72,4% superior ao agregado miúdo natural. O aumento da massa específica dos agregados miúdos leva a compósitos mais densos e, geralmente, mais resistentes a abrasão.

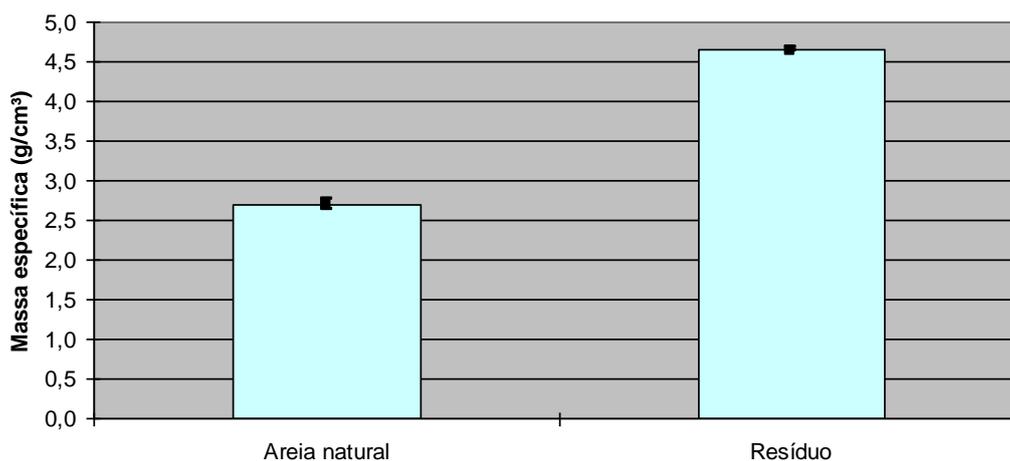


Figura 4.1 - Massa específica dos agregados miúdos

Os resultados da massa unitária dos agregados miúdos são apresentados na Figura 4.2. Observando os resultados apresentados é possível perceber que o agregado miúdo de resíduo

apresentou massa específica 77,1% superior ao agregado miúdo natural. O aumento da massa unitária dos agregados miúdos leva a maiores massas para mesmos volumes.

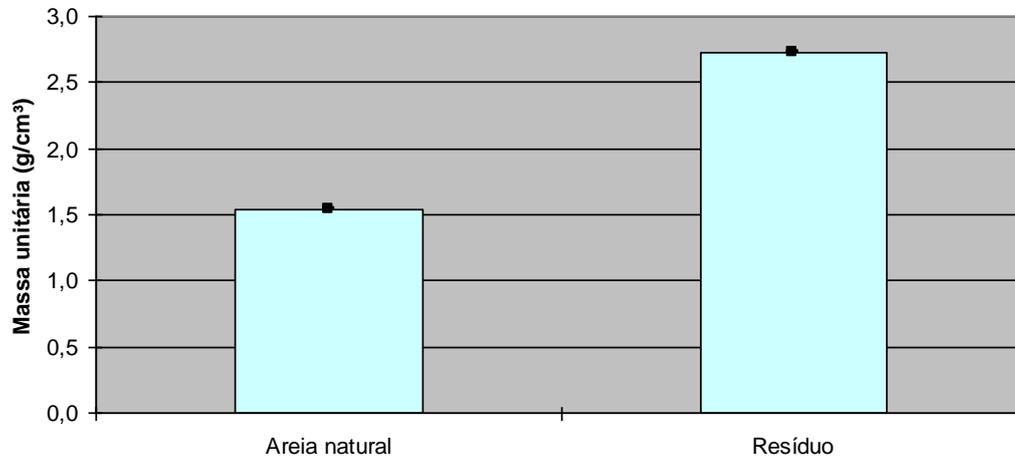


Figura 4.2 - Massa unitária dos agregados miúdos

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas granulométricas do agregado miúdo natural e do resíduo e verifica-se que a distribuição granulométrica dos agregados é bem similar, o que contribui para a facilidade na substituição na confecção dos compósitos e comparação dos resultados de outras propriedades.

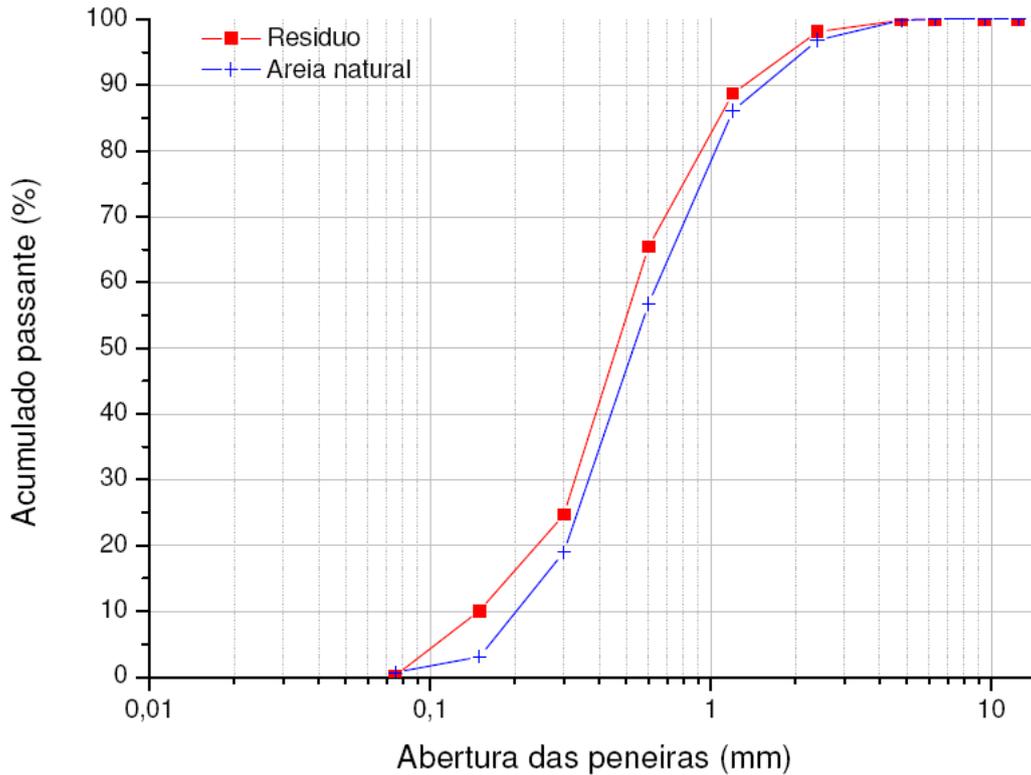


Figura 4.3 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de dimensão máxima característica do agregado miúdo natural e do resíduo. Mostrando que ambos os materiais apresentam a mesma dimensão máxima característica .

Tabela 4.1 - Dimensão máxima característica dos agregados miúdos

Agregado miúdo	Dimensão máxima característica (mm)
Areia natural	2,4
Resíduo da indústria mineradora (Magnetita)	2,4

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados de modulo de finura do agregado miúdo natural e do resíduo. Observa-se que apesar da distribuição granulométrica dos agregados serem próximas, o resultado obtido para o resíduo foi inferior.

Tabela 4.3 - Modulo de finura dos agregados miúdos

Agregado miúdo	Modulo de finura
Areia natural	2,384
Resíduo da indústria mineradora (Magnetita)	2,131

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados de teor de material pulverulento do agregado miúdo natural e de resíduo. O resulta mostra que o resíduo da indústria da mineração possui um elevado índice de material pulverulento.

Tabela 4.4 - Material pulverulento dos agregados miúdos

Agregado miúdo	Teor de material pulverulento (%)
Areia natural	2,10
Resíduo da indústria mineradora (Magnetita)	17,86

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados de teor de argila em torrões e materiais friáveis do agregado miúdo natural e do resíduo. O resultado mostra que os materiais possuem as mesmas características quanto a teor de argilas e torrões.

Tabela 4.5 - Teor de argila em torrões e materiais friáveis dos agregados miúdos

Agregado miúdo	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)
Areia natural	0,00
Resíduo da indústria mineradora (Magnetita)	0,00

Na Tabela 4.6 é apresentada a composição química do resíduo da indústria da mineração. Na composição química apresentada é possível observar o alto índice de Ferro presente no resíduo

Tabela 4.7 - Composição química do resíduo da indústria da mineração

Constituintes	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>
% encontrado	1,55	83,39	2,10	1,46	2,62	0,29	4,02	8,81

Na Figura 4.4 é possível observar uma imagem de um grão de resíduo da indústria mineradora com predominância de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita) realizada em Lupa Estereoscópica binocular com câmera acoplada.

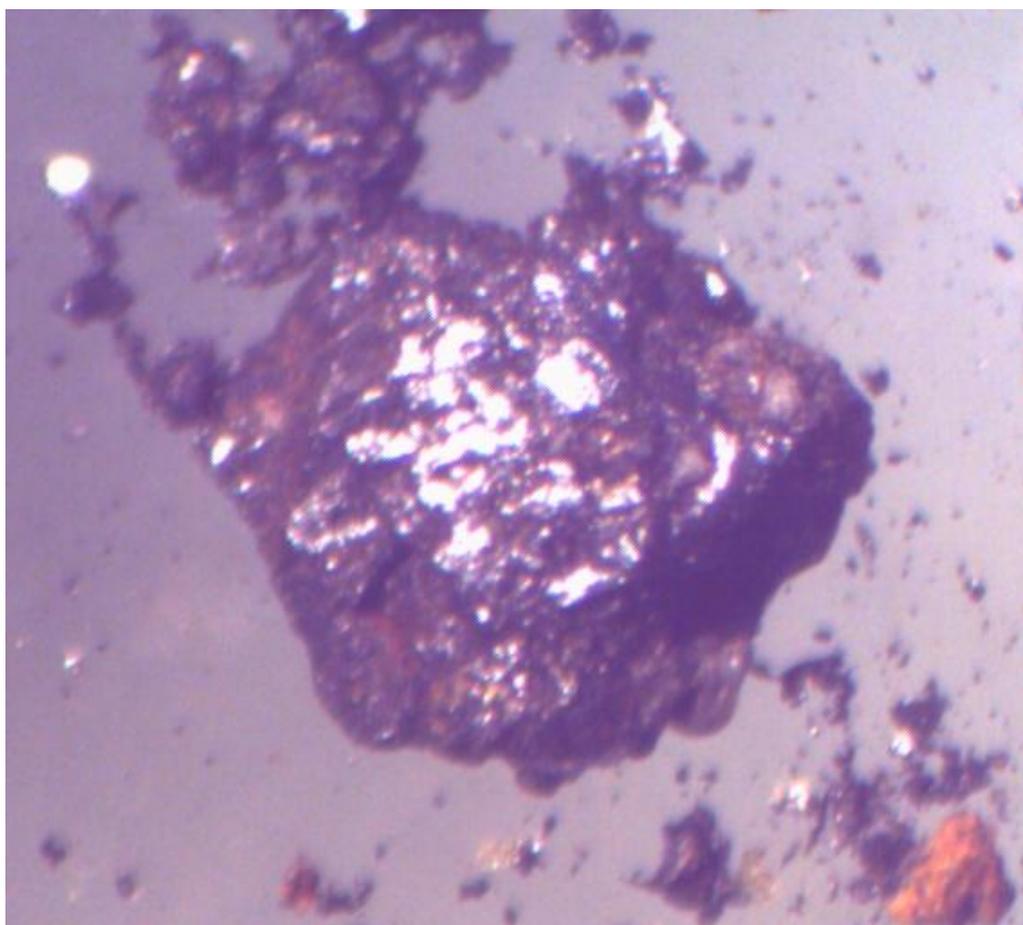


Figura 4.4 - Grão do resíduo da industria mineradora com predominância de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita)

Na Figura 4.5 é possível observar uma imagem de um grão de resíduo da indústria mineradora sem predominância de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita) realizada em Estereoscópio binocular com câmera acoplada.

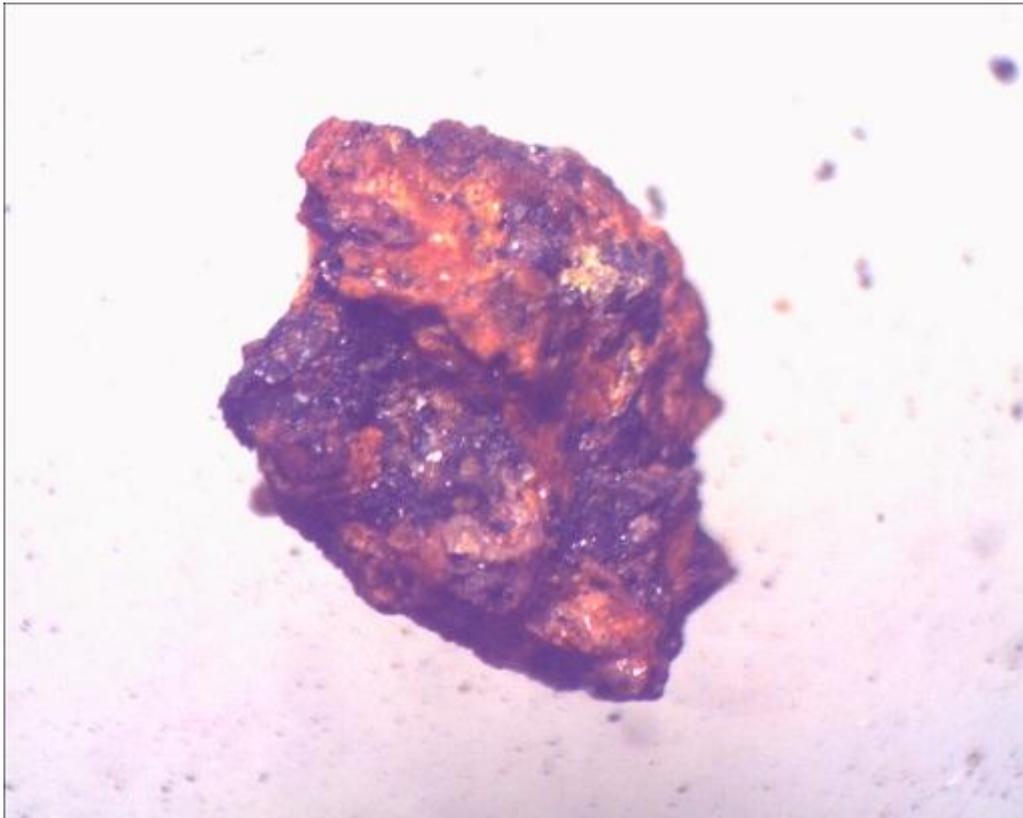


Figura 4.5 - Grão do resíduo da industria mineradora sem predominância de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Magnetita)

## 4.2 Caracterização dos compósitos cimentícios

### 4.2.1 Caracterização das argamassas

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão da argamassa. É possível observar que a argamassa confeccionada a partir da substituição de agregado miúdo natural por resíduo absorveu menos água. Comparando os resultados da argamassa de referência com as argamassas com substituição verificou-se que houve diminuição de até 1,5% na média. O agregado miúdo natural e o resíduo possuem granulometrias semelhantes o que se pode presumir é que as argamassas com substituição apresentam uma densidade maior, sendo este o motivo pelo qual absorveu menos água. Mesmo apresentando granulometrias próximas (Ver tabela 4.2) o módulo de finura do resíduo é igual ao do agregado miúdo. Na

elaboração dos traços de substituição não foi acrescentada mais água como havia ocorrido com o do concreto, no traço de argamassa foi utilizada apenas a quantidade de água previamente calculada tomando por base o fator água cimento, portanto a água absorvida durante o experimento representa a quantidade necessária para umedecer toda superfície externa e interna do corpo de prova necessitando o que nos leva a dizer que sendo mais denso houve a necessidade de menos água incorporada. Sendo mais densa é recomendado o seu uso em ambientes que necessitem de argamassa mais pesada e por ter uma boa plasticidade e trabalhabilidade torna-se mais fácil sua aplicação.

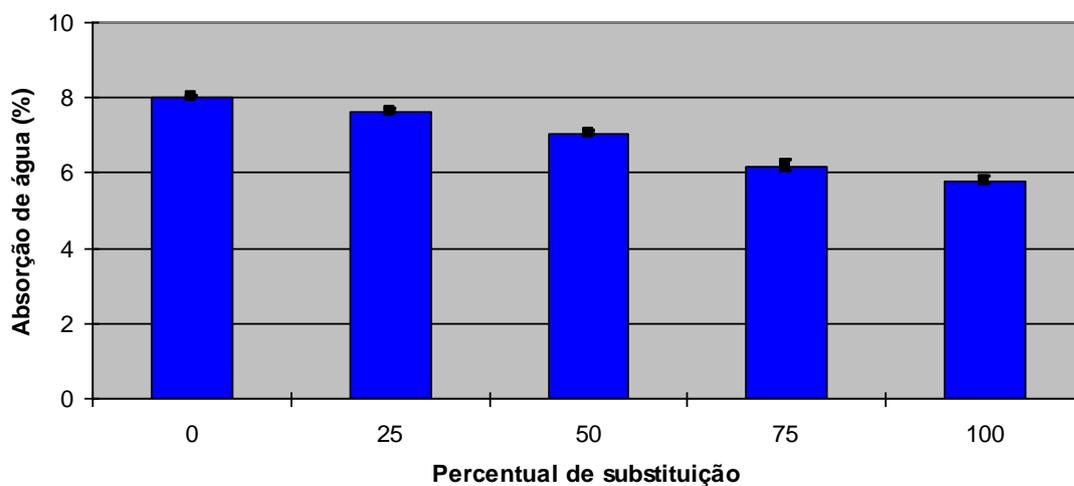


Figura 4.6 - Absorção de água das argamassas

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados do índice de vazios em argamassas. Pode-se perceber que de maneira geral e comparando com o traço de referência apresentaram praticamente os mesmos resultados. É possível que com uma maior densidade o número de vazios do corpo de prova tende a diminuir sendo, portanto menos porosa a argamassa. Nota-se que as argamassas com percentuais de substituição principalmente aquela com 100% apresentou um acréscimo de vazios, o que poderá indicar um aumento de porosidade, mas de outro lado absorveu menos água refutando tal idéia mostrando apenas que a argamassa apresenta uma densidade maior.

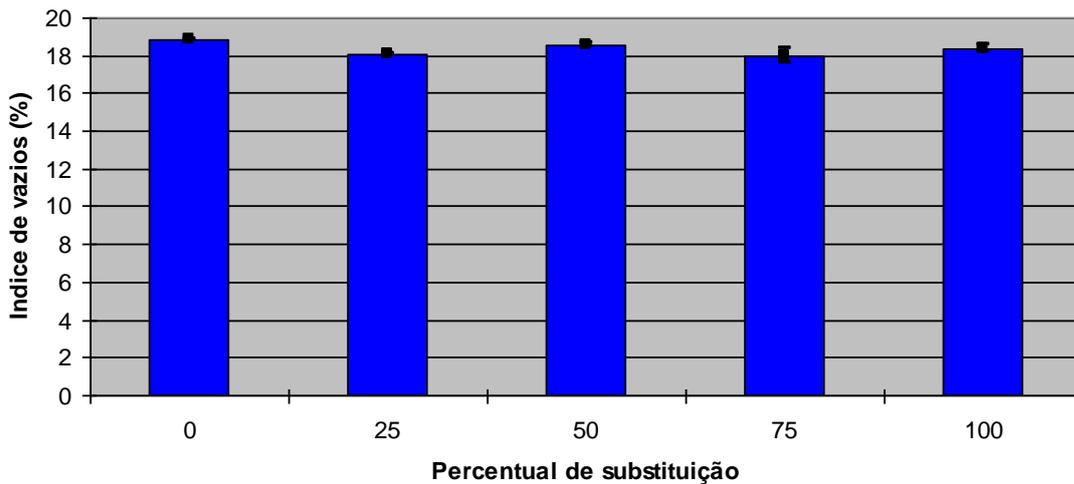


Figura 4.7 - Índice de vazios das argamassas

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados de massa específica saturada para argamassas, o gráfico mostra aumento da massa específica do compósito com o aumento do percentual de substituição.

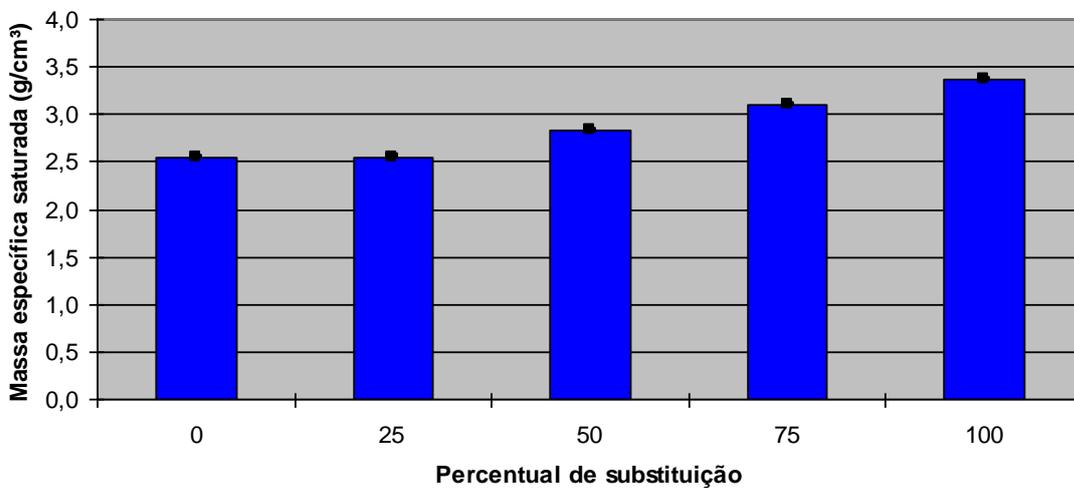


Figura 4.8 - Massa específica saturada das argamassas

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados de massa específica seca para argamassa. De acordo com o gráfico o aumento da massa específica é proporcional ao percentual de

substituição. É possível notar que a argamassa com um percentual de 100% de substituição do agregado natural pelo resíduo da indústria mineradora apresenta uma maior massa específica seca em relação aos de mais e principalmente em relação a de 0% de substituição . A massa específica seca teve um aumento da ordem de 5% o que demonstra o processo da densidade.

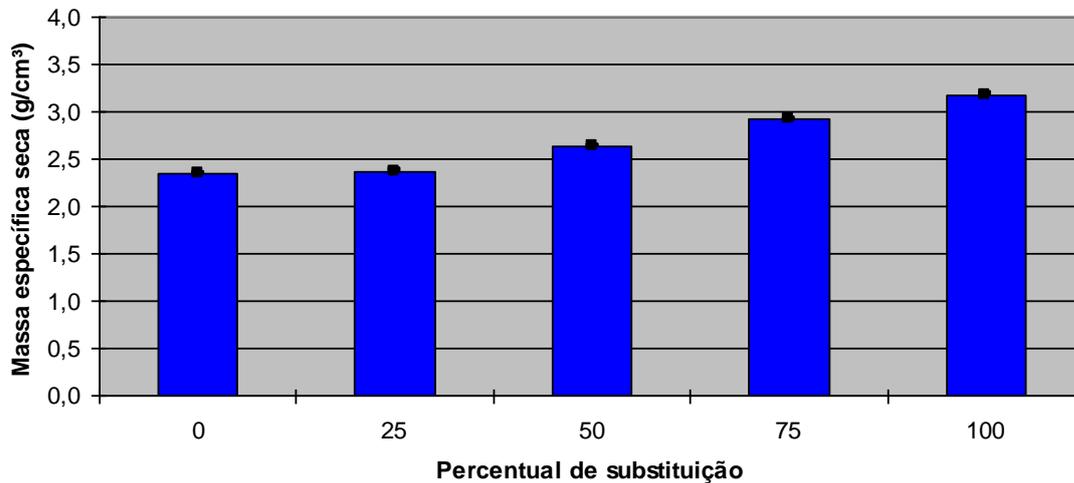


Figura 4.9 - Massa específica seca das argamassas

Na Figura 4.10 são apresentados os valores percentuais de resistência à compressão das argamassas desenvolvidas com substituição parcial e total do agregado natural pelo resíduo em relação a argamassa sem substituição. Na figura são indicadas as médias, as medianas e os valores máximos e mínimos dos resultados obtidos, sendo a média representada pela barra retangular, a mediana pelo quadrado, e o maior e menor resultado obtido pelos traços posicionados acima e abaixo da mediana.

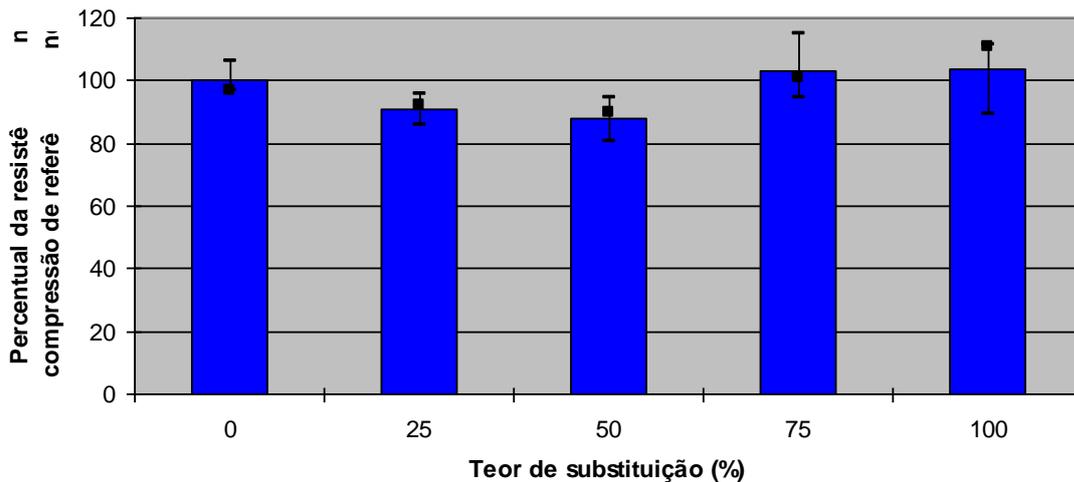


Figura 4.10 - Resistência à compressão relativa das argamassas confeccionadas

Na Figura 4.11 são apresentadas as temperaturas que ocorreram os danos causados pela elevação da temperatura. Nos percentuais de substituição de 0, 25, 50 e 75%, dos dois corpos de prova ensaiados para cada percentual de substituição, somente um dos corpos apresentaram danos. Para a substituição total, os dois corpos de prova não apresentaram danos. Analisando o gráfico é possível notar o aumento da temperatura do dano é compatível com a porcentagem de substituição de areia pelo resíduo.

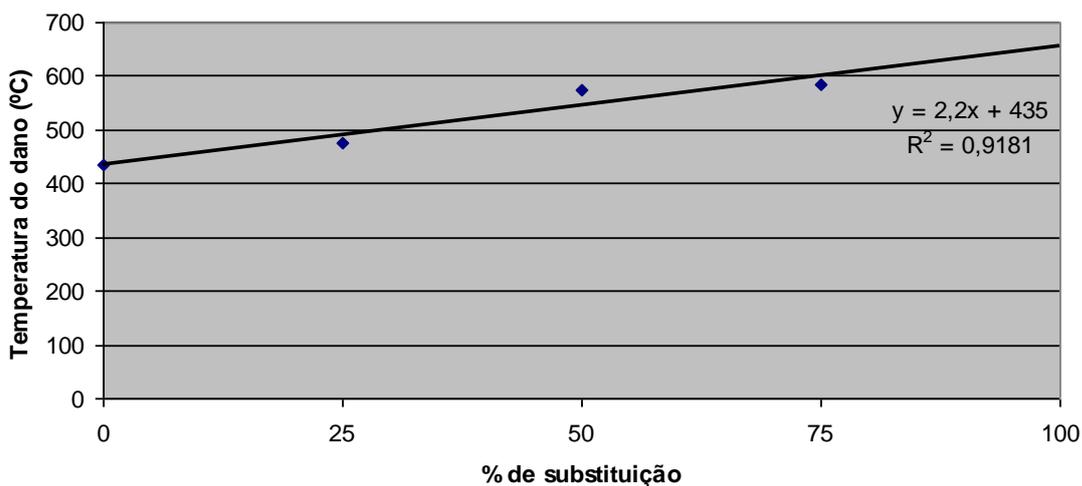


Figura 4.11 - Temperatura de dano das argamassas confeccionadas

## 4.2.2 Caracterização dos concretos

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão dos concretos. Foi possível observar que os concretos confeccionados a partir da substituição de agregado miúdo natural por resíduo absorveu mais água. Comparando os resultados do concreto de referência com os concretos com substituição verificou-se que houve um aumento de até 4,77% na média de absorção. O agregado miúdo natural e o resíduo apresentaram granulometrias próximas, mas os resultados apresentados para o módulo de finura e teor de material puerulento foram distintos, sendo o teor de material puerulento do resíduo maior. O traço de concreto confeccionado com o resíduo necessitou de maior quantidade de água para se obter o abatimento em tronco de cone (*slump test*) equivalente ao concreto de referência, o que pode explicar uma maior absorção de água, o que levaria a uma maior quantidade de poros abertos e conseqüentemente uma maior porosidade. A presença de maior porosidade mostra que este concreto pode não ser adequado para determinados ambientes como os industriais, pois, devido a porosidade fica comprometida sua durabilidade.

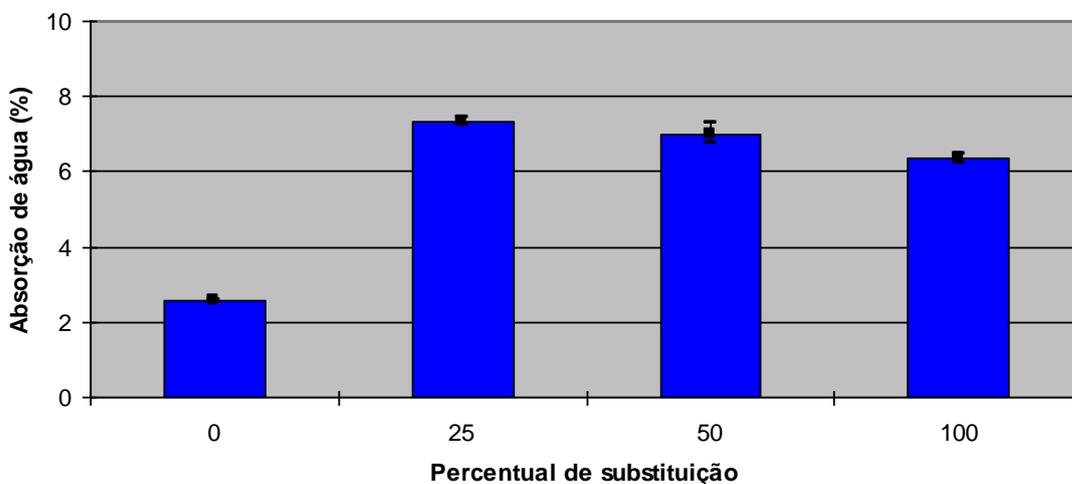


Figura 4.12 - Absorção de água por imersão dos concretos confeccionados

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados de índices de vazios dos concretos. Foi possível observar que os concretos confeccionados a partir da substituição de agregado miúdo natural por resíduo apresentou maiores índices de vazios. Comparando os resultados do concreto de referência com os concretos com substituição verificou-se que houve um aumento de até 11,42% na média do índice de vazios. O agregado miúdo natural e o resíduo

apresentaram granulometrias próximas, mas os resultados apresentados para o módulo de finura foram iguais, sendo o teor de material puerulento do resíduo maior. O traço de concreto confeccionado com o resíduo necessitou de maior quantidade de água para se obter o abatimento em tronco de cone ( *slump test* ) equivalente ao concreto de referência, o que pode explicar um maior índice de vazios, o que levaria a uma maior quantidade de poros abertos e conseqüentemente uma maior porosidade. A presença de maior porosidade mostra que este concreto pode não ser adequado para determinados ambiente como os industriais, pois devido à porosidade fica comprometida sua durabilidade.

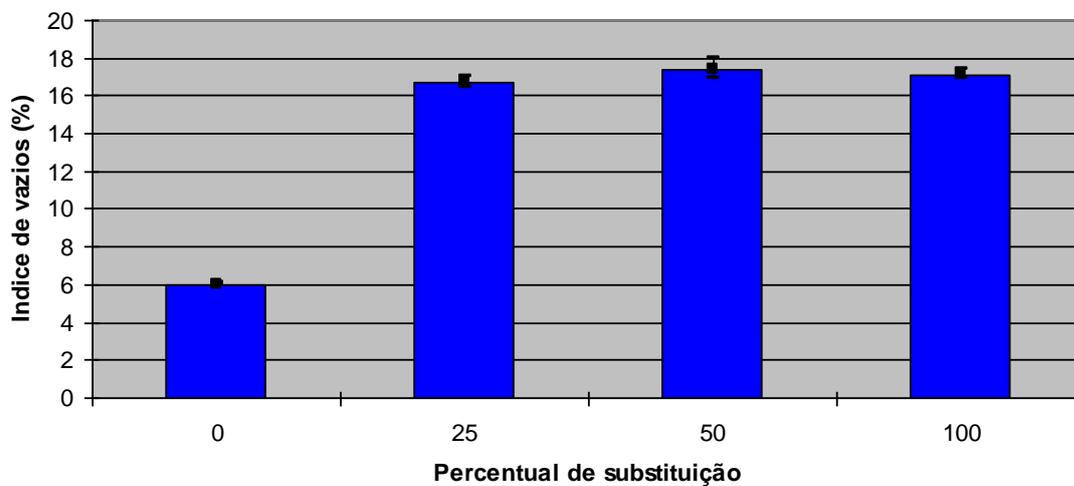


Figura 4.13 – Índice de vazios dos concretos confeccionados

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados de massa específica seca dos concretos. Foi possível observar que os concretos confeccionados a partir da substituição de agregado miúdo natural por resíduo apresentaram-se mais densos.

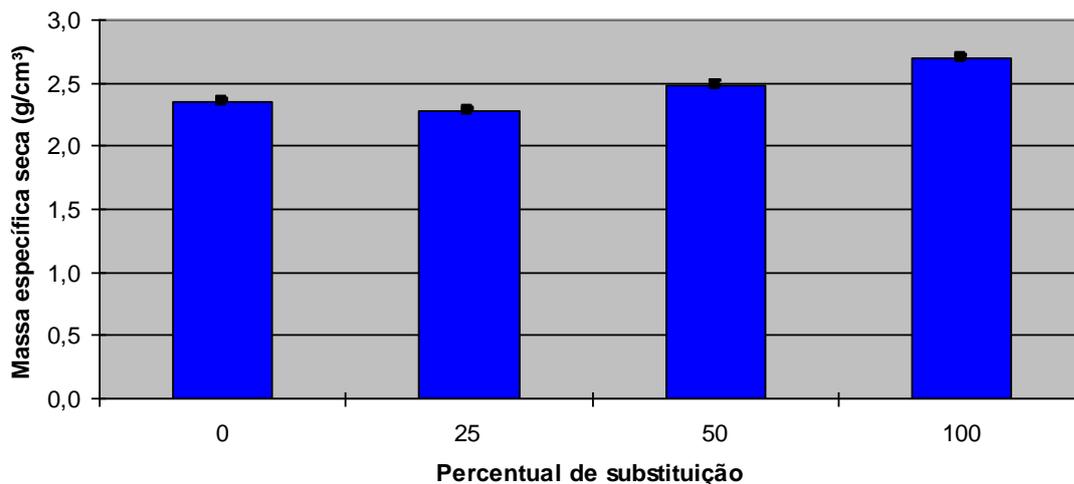


Figura 4.14 – Massa específica seca dos concretos confeccionados

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados de massa específica saturada dos concretos. Foi possível observar que os concretos confeccionados a partir da substituição de agregado miúdo natural por resíduo apresentaram-se mais densos.

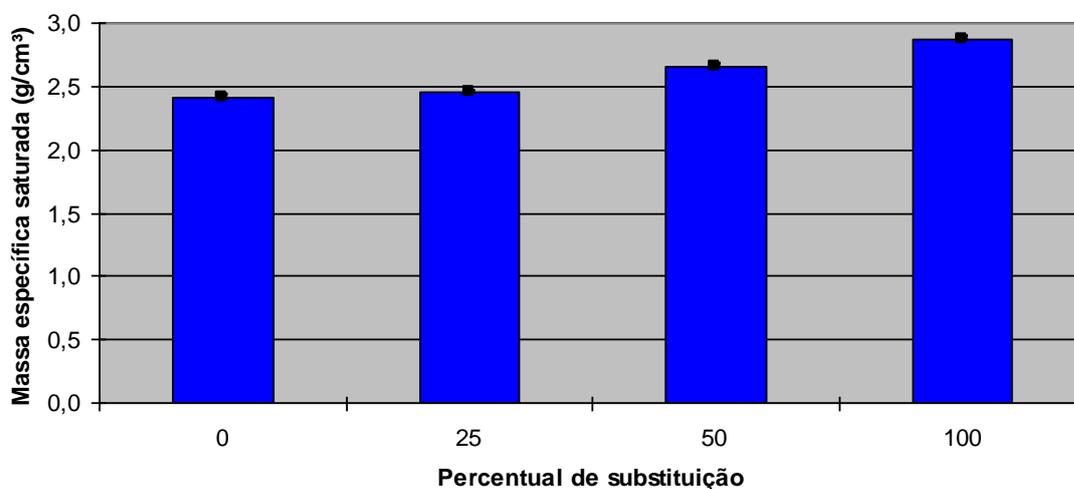


Figura 4.15 – Massa específica saturada dos concretos confeccionados

Na figura 4.16 são apresentados os valores percentuais de resistência a compressão dos concretos desenvolvidos com substituição parcial e total do agregado natural pelo resíduo em relação ao concreto sem substituição. Na figura são indicadas as médias, as medianas e os valores máximos e mínimos dos resultados obtidos, sendo a média representada pela barra

retangular, a mediana pelo quadrado, e o maior e menor resultado obtido pelos traços posicionados acima e abaixo da mediana.

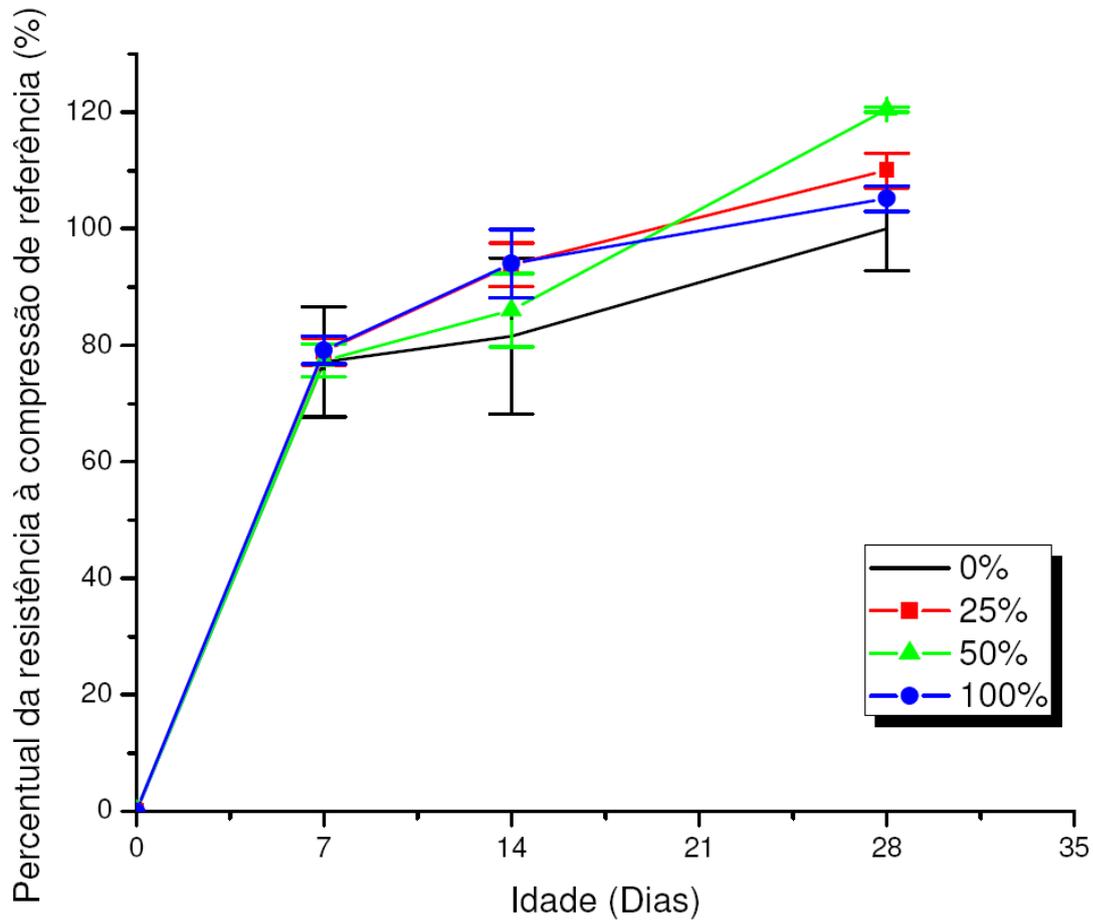


Figura 4.16 - Resistência à compressão relativa dos concretos confeccionados em função da idade

Na figura 4.17 são apresentados os resultados de resistência à compressão relativa dos concretos com 28 dias de cura.observa-se um aumento médio com o aumento do índice de substituição.

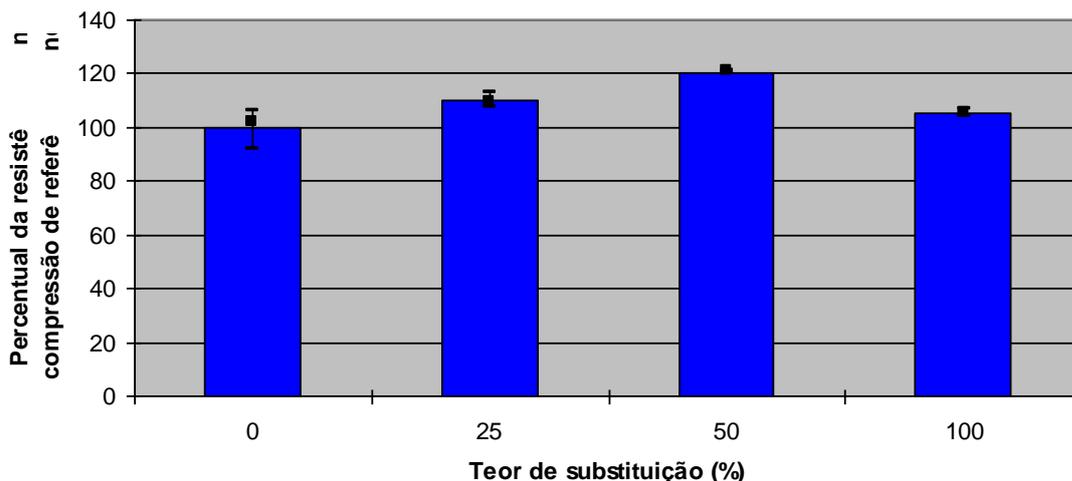


Figura 4.17 - Resistência à compressão relativa dos concretos confeccionados aos 28 dias

Na Figura 4.18 são apresentadas as temperaturas que ocorreram os danos causados pela elevação da temperatura. Observa-se que a temperatura de dano aumentou com o aumento do percentual de substituição do agregado natural pelo resíduo. Para os concretos com substituição total não foram realizadas a simulação de situação de incêndios, pois os concretos de referencia e com substituição parcial apresentaram rupturas explosivas.

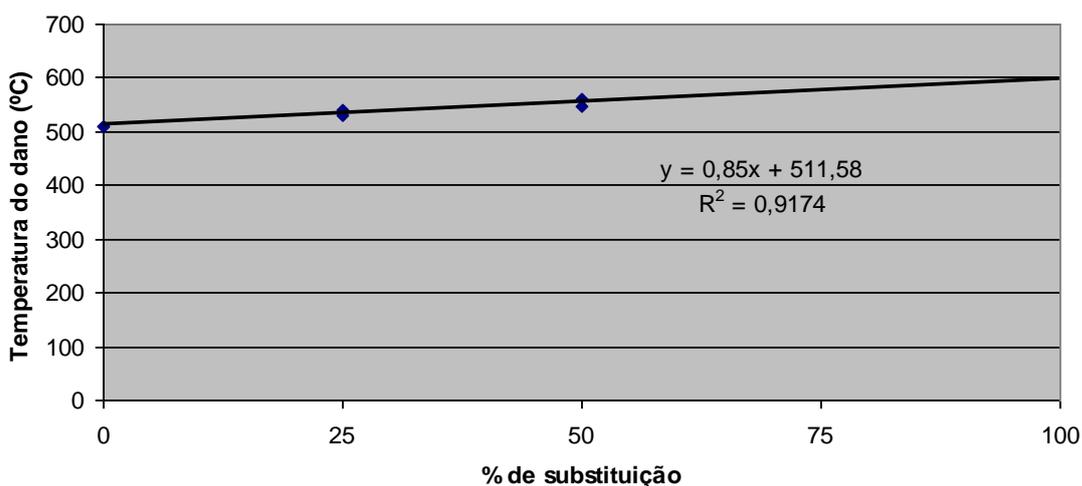


Figura 4.18 - Temperatura de dano dos concretos confeccionados

Nos experimentos com os concretos submetidos a altas temperaturas foram preparados corpos de prova que foram levados ao forno mufla durante duas horas e analisados visualmente o

efeito da temperatura no concreto. Foi verificado um aumento da perda de umidade, através do aumento da saída de vapor, a partir dos 400°C, temperatura essa medida pelo termostato da mufla. Também verificou um aumento da perda de gases com odores a partir dos 475°. Os lascamentos e danos ocorridos foram acompanhados com uma pequena explosão, visualmente se pode verificar a formação de pequena cavidade, provavelmente ocasionadas por bolsões de vapor aprisionados dentro dos corpos de prova.

Na Figura 4.19 é possível observar um grão do resíduo na superfície fraturada de um corpo de prova do concreto com substituição de 25% de areia natural por resíduo da indústria mineradora após a submissão a 500°C . Na imagem pode ser visto que a zona de interface entre o grão do resíduo e a pasta cimentícia é bem formada.

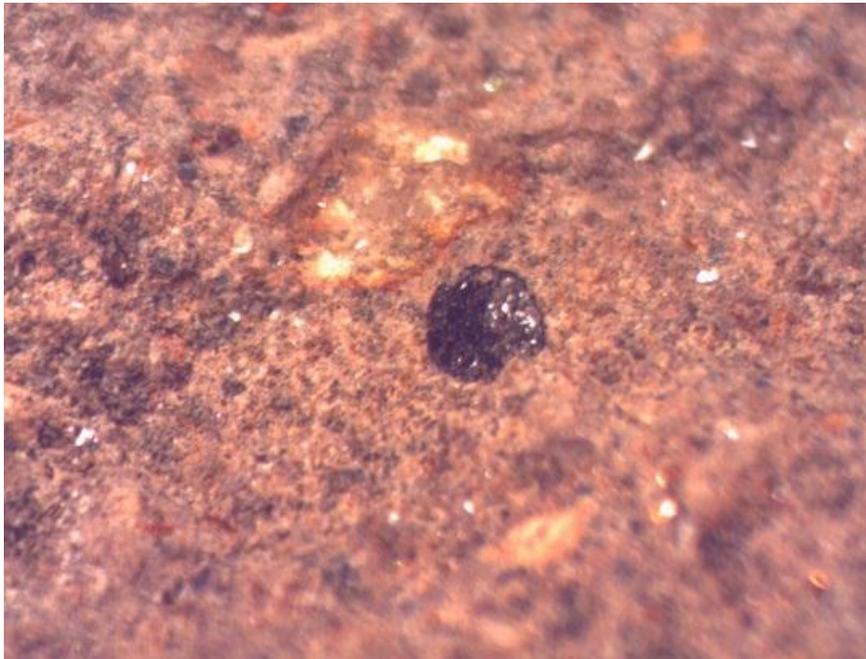


Figura 4.19 - Grão do resíduo na superfície fraturada de um corpo de prova do concreto

Na Figura 4.20 é possível observar uma superfície fraturada de um corpo de prova do concreto com substituição de 50% de areia natural por resíduo da indústria mineradora após a submissão a 500°C . Na imagem que a zona de interface dos grãos e a pasta cimentícia são bem formadas.



Figura 4.20 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto

Na Figura 4.21 é possível observar uma superfície fraturada de um corpo de prova do concreto com substituição de 100% de areia natural por resíduo da indústria mineradora após a submissão a 500°C . Na imagem pode ser zonas de interface dos grãos e a pasta cimentícia são bem formadas.



Figura 4.21 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto

Na Figura 4.22 é possível observar uma superfície fraturada de um corpo de prova do concreto com 100% de areia natural após a submissão a 500°C . Na imagem é possível perceber que a zona de interface de uma brita calcária e a pasta cimentícia apresentou trincas. É possível observar bolhas que não foram observadas nos concretos com a adição de resíduos da indústria mineradora.

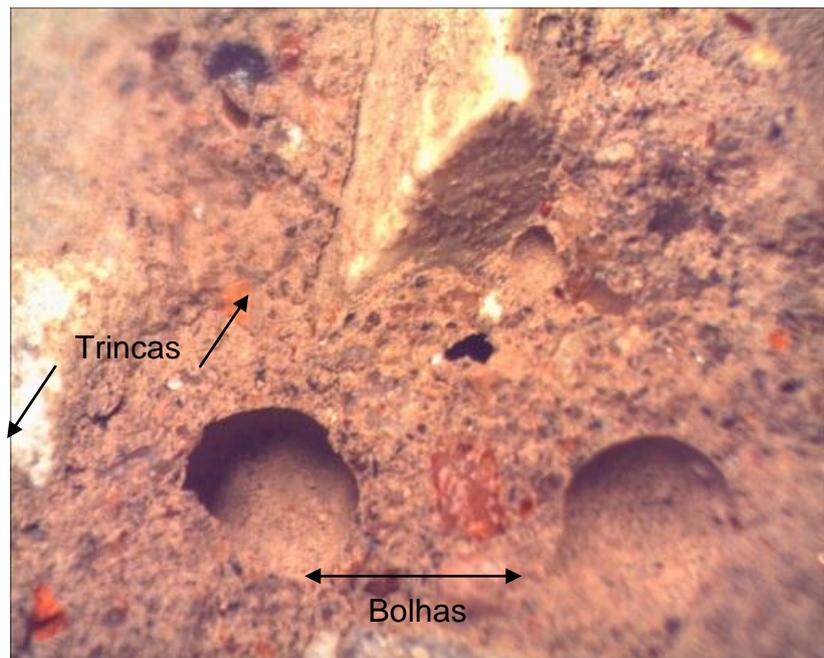


Figura 4.22 - Superfície fraturada de um corpo de prova do concreto

## 5 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho podemos concluir que:

- a utilização do resíduo da indústria mineradora com predominância de magnetita substitui a areia quartzosa natural de rio na confecção de argamassas e concretos com equivalência e superioridade em alguns quesitos;

- a utilização do resíduo da indústria mineradora com predominância de magnetita possui granulometria, módulo de finura, teor de argila em torrões e materiais friáveis compatíveis com o agregado miúdo natural;

- a utilização do resíduo da indústria mineradora com predominância de magnetita contribuiu para a melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos;

- a utilização do resíduo da indústria mineradora com predominância de magnetita contribuiu para melhorar a resistência ao lascamento em temperaturas elevadas dos compósitos;

Conclui-se com este trabalho que o compósito cimentício obtido através da substituição da areia natural de rio pelo rejeito da mineração com alto teor de magnetita (óxido de ferro) apresenta características físicas equivalentes ou superiores em alguns quesitos em relação ao agregado miúdo natural.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. D.; CASTRO, P. G. D. J. Concreto estrutural com agregados reciclados de entulho de demolição de obras (RED). Goiana. 8p. Universidade Estadual de Goiás – UEG, Brasil. Disponível em : [http://www.engenhariaagricola.ueg.br/arquivos\\_download/Prof.Dafico/CONCRETO%20ESTRUTURAL%20COM%20AG.pdf](http://www.engenhariaagricola.ueg.br/arquivos_download/Prof.Dafico/CONCRETO%20ESTRUTURAL%20COM%20AG.pdf). Acessado 15/08/2009.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível em [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV\\_CT206\\_2001.pdf](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf). Acessado 12/08/2009.

ARAUJO, C. B. Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Rio de Janeiro, 2006. 133 p. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9776 - Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

BAUER,L.A.F Materiais de Construção civil vol 1 3ªEdi LTC Edi.ltda São Paulo 1989.

BRANCO, V. T. F. C., MOTTA, L. M. G., SOARES, J. B. O efeito da heterogeneidade do agregado de escória de aciaria nas propriedades de misturas asfálticas. XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte.

BUEST NETO, G. T. Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland. Curitiba, 2006. 169p. Dissertação de Pós Graduação em construção civil – Universidade Federal do Paraná.

BUNGE ,Fertilizantes Perfil da Empresa;Revista Minerios e Minerales,Ed 298 ,2007)

BUTTLER, A. M. Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto – Influência da Idade de Reciclagem nas Propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Carlos, 2003. 199p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição

- do RCD. São Carlos, 2007. 254p. Tese apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos.
- COSTA, C. N; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. NUTAU 2002, USP, São Paulo, 2002.
- COUTINHO. A. S , Fabrico do betão Lisboa 1987.
- D`AGOSTINO, L. F. Praias de barragens de rejeito de mineração: Características e análise da sedimentação. São Paulo, 2008. 374p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
- FERNANDES, A. E. e SANTOS, H. I. Análise da operação de barragem de rejeitos da mineração Serra Grande S. A., Município de Crixás – Goiás. Goiânia, 2008. 15p. Universidade Católica de Goiás.
- FILEV, R. Escória de aciaria. Ficha técnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. Acessado em agosto de 2009. Disponível em [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria\\_de\\_aciaria.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm).
- GOUVEIA, ANTONIO MARIA CLARET. Notas de aula. UFOP: OURO PRETO: 2001.
- LEVY, S. M.; Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria . São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP
- M M E. Ministério de Minas e Energia relatório : Brasilia 2009
- MALHOTRA .H.L Propriedade dos materiais em altas temperaruras ,Materials and Struturies vol 15 ,Rilem ,Paris 1982.

- MARTINS, P. M. Utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração. São José dos Campos, 2006. 161p. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Pini, 1994.
- MOURA, W. A. e DAL MOLIN, D. C. Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto. Porto Alegre, 2004. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p 41 – 56, abr./jun. 2004.
- MOURA, W. A., GONÇALVES, J. P. e LEITE, M. B. Avaliação de Propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo. Ouro Preto, 2009. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(2): 221-225, abr. jun. 2009.
- NASCIMENTO, K. A. L. Utilização de escória proveniente da reciclagem do aço em concreto de cimento Portland. São Carlos, 2007. 110p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo.
- NEVILLE, A.M "Propriedades do concreto" 2ª edi. PINI, São Paulo 1997.
- NINCE, A. A. e FIGUEIREDO, A. D. Concreto expostos às altas temperaturas. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/494 - 31 p. São Paulo: EPUSP, 2008.
- NINCE, A. A. e FIGUEIREDO, A. D. Concreto expostos às altas temperaturas. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/494 - 31 p. São Paulo: EPUSP, 2008.
- Nunes, J.B.M; Costa, J.S. Analogia entre os agregados reciclados provenientes da construção civil aos agregados naturais. Centro Federal de Educação Tecnológica – Mato Grosso

(CEFET – MT). 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas – PE, 2008.

OLIVEIRA, M. J. E. Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo. *Exacta*, São Paulo, v. 4, n. especial, p. 15-24, 25 nov. 2006.

PRADO, D. M. Propriedades físicas e mecânicas de blocos de estruturas produzidos com agregados reciclados de concreto. São Carlos, 2006. 130p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

QUEIROZ, F. C; FRASCÁ, M. H. B. O. Estudo para aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. *Exacta*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 83 – 92, jan./jun. 2008.

REM (Revista da Escola de Minas) Ouro Preto, jan e mar 2008.

SEDEC, Avaliação e Diagnóstico do Setor Mineral Estado do Rio Grande do Norte. Coordenadoria de Desenvolvimento de Recursos Minerais (CODEM), Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC), acessado <<http://www.sedec.rn.gov.br/codem.asp>> em 21 de junho de 2009.

SEDEC, Avaliação e Diagnóstico do Setor Mineral Estado do Rio Grande do Norte. Coordenadoria de Desenvolvimento de Recursos Minerais (CODEM), Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC), acessado <<http://www.sedec.rn.gov.br/codem.asp>> em 21 de junho de 2009.

SEDEC, Avaliação e Diagnóstico do Setor Mineral Estado do Rio Grande do Norte. Coordenadoria de Desenvolvimento de Recursos Minerais (CODEM), Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC), acessado <<http://www.sedec.rn.gov.br/codem.asp>> em 21 de junho de 2009.

SILVA FILHO, A .F MOURA, W. A.; LEITE, R. S. Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para produção de concreto. Sitientibus, n. 26, p. 95-110, 2002.

SOUZA JUNIOR;TARLEY FERREIRA,Estrutura de Concreto armado;notas de aula 2010.

SOUZA, C. A. Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais. Belo Horizonte, 2006. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG.

SOUZA, F. L. Propriedades de concretos produzidos pela substituição de agregados naturais por rejeitos de usinas concreteiras. Joinville, 2007. 66p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas - CCT.

SOUZA, J., BEZERRA, M. T., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., CARVALHO, J. B. Q., OLIVEIRA, N. M. S. e SOUZA, A. J. D. Avaliação de argamassas com cinza e casca de arroz. Campina Grande, 2007. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador Bahia.

TERRA, L. E .M: Finos de pedreira para a execução de concreto estrutural ,práticas recomendadas ABESC 2003.

VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. Balanço Mineral Brasileiro, 2001.

VALVERDE: F. M. Balanço Mineral Brasileiro,Agregados para a construção civil .DNPM 2002.

VARGAS, A. S. estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Porto Alegre, 2002. 148p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIEIRA, G. L., DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.

WOLFF, A. P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de Minas da Vale. Ouro Preto, 2009. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. Campinas, 1997. 140p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.