



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO**

**ALTERNATIVAS DE RECICLAGEM DE LAMA DE ACIARIA EM  
CONCRETOS E ARGAMASSAS**

**ALDO SIERVO DE AMORIM**

**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientadora:  
Dra. Maria Aparecida Faustino Pires**

**São Paulo  
2000**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**ALTERNATIVAS DE RECICLAGEM DE LAMA DE ACIARIA EM  
CONCRETOS E ARGAMASSAS**

**ALDO SIERVO DE AMORIM**



**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientadora:**

**Dra. Maria Aparecida Faustino Pires**

**SÃO PAULO**

**2000**

À Geny e a minha mãe Angela  
que muito me incentivaram durante  
a realização deste trabalho.

*Considere-se que não há nada mais difícil,  
nem de sucesso mais duvidoso,  
nem mais arriscado,  
do que iniciar uma nova ordem de coisas.  
(Nicolau Maquiavel)*

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e ao Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA) pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À Dra Maria Aparecida Faustino Pires que desde o início confiou no meu trabalho orientando-me com grande incentivo, carinho, compreensão, amizade e paciência.

À Prof. Dra Maria Alba Cincotto do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP pela co-orientação e sugestões que foram de grande importância para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr Vanderley M. John do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, pelas sugestões e disponibilização dos laboratórios e pelas discussões técnicas, e em especial ao Químico Dorval Aguiar e ao Gerente do laboratório do CPqDCC Reginaldo Mariano.

Ao Prof. Dr Paulo Miranda do IPEN, pela parceria e amizade, e pela orientação desde o início do desenvolvimento deste trabalho, principalmente na realização das análises por microscopia óptica.

Ao Prof. Dr. Ramiro C. Nascimento do Departamento de Metalurgia da Escola Politécnica da USP, pela disponibilização dos laboratórios para a realização dos ensaios de pelotização.

Ao Eng José de Abreu e ao Eng. Francisco Mezzalira do Grupo Ciminias/Holdercin, pela disponibilização dos laboratórios e de insumos para realização dos corpos de prova de concreto.

À Associação Brasileira de Cimento Portland, em especial a Eng. Elsa Issae Nakakura, pela disponibilização dos laboratórios para a produção das argamassas.

Ao Dr Nelson B. Lima, à Dra Ivone Mulako Sato e à MSc Marycel Elena B. Cotrim pelas discussões técnicas e realização de ensaios de caracterização.

Aos amigos Dra Kátia Regina Ferrari, Dra Nilce Ortiz, MSc Marcos Rodrigues de Carvalho, MSc Jamil Ayoub, MSc Sérgio Petroni, MSc Dib Karan Jr, MSc Hélio Ferreto, Marta Maekawa, Wagner Terazan, Ricardo Cavaleiro, Sueli Casquel, Maria Aparecida Alves e demais colegas do CQMA pela ajuda e companheirismo durante todo o desenvolvimento do trabalho.

À todos os meus amigos e familiares que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

# ALTERNATIVAS DE RECICLAGEM DE LAMA DE ACIARIA EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

Aldo Siervo de Amorim

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é a utilização de um resíduo siderúrgico, cuja composição principal é a magnetita, em componentes da construção civil visando aumentar a média de reciclagem de resíduos no setor e, conseqüentemente, diminuir o impacto desse resíduo no meio ambiente.

Para tal foram estudadas adições deste resíduo, como obtido na siderúrgica COSIPA-SP, na formulação de concretos para a finalidade de blindagem de radiação, como componente da fração areia, ou como agregado graúdo, em forma de pelotas. Também foi pesquisado seu uso na composição de uma argamassa de revestimento, em substituição da fração fina de uma areia composta a partir de uma curva granulométrica teórica,

Os concretos produzidos com finalidade de blindagem de radiação mostraram que apenas para pequenas adições de resíduo (até 30%), não houve variação significativa nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova, nem nas propriedades de atenuação à radiação. Portanto, não justificando sua adição para o propósito de concreto pesado.

Os resultados obtidos no processo de pelletização mostram que as pelotas obtidas apresentaram massa específica de  $2,75 \text{ g cm}^{-3}$ , bem próxima à da brita comum ( $2,55 \text{ g cm}^{-3}$ ), mas apresentaram uma baixa resistência à compressão, 0,2KN para as pelotas e 5,8KN para a brita. Estes resultados mostram que a sua utilização poderia comprometer a resistência mecânica do concreto.

As argamassas produzidas pela adição da fração fina do resíduo, em substituição à areia, mostraram uma melhora na retenção de água no estado fresco (95%), em comparação com as produzidas sem resíduo (41%) e, para todas as proporções de substituição, a mesma resistência à compressão (aproximadamente 40 MPa). Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização mostraram que mesmo na maior substituição de areia por resíduo (14,55%), não houve grandes variações nos elementos analisados no extrato, podendo concluir que o resíduo fixou-se satisfatoriamente à argamassa. O seu aproveitamento mostra-se viável, desde que as propriedades magnéticas que ele confere à argamassa não comprometam o seu emprego.

## RECYCLING ALTERNATIVES OF CONVERTER SLAG IN CONCRETE AND MORTARS

Aldo Siervo de Amorim

### ABSTRACT

The objective of this work is the study of the use of a residue of a steel plant (COSIPA-SP), constituted by magnetite, in components of the civil construction, aiming to increase the recycling and, consequently, to decrease the impact of that residue in the environment. To reach this objective, additions of this residue were tested in the formulation of concrete with the purpose of radiation shielding, as pellets in coarse aggregate, and as substitute of the fine fraction of sand in the composition of a coating mortar.

The concrete produced with purpose of radiation shielding showed that for small residue additions (up to 30%), there was not significant variation in the mechanical properties, nor in the attenuation properties to the radiation. Therefore, it did not justify its addition for purpose of heavy concrete.

The results obtained on pelletizing process show that the obtained pellets presented value of specific gravity ( $2,75 \text{ g.cm}^{-3}$ ) very close to the one of the common crushed stone ( $2,55 \text{ g.cm}^{-3}$ ), however, they presented a low resistance to the compression, (0,2KN) for the pellets when compared to regular crushed stones (5,8KN). These results show that its use could commit the mechanical resistance of the concrete without bringing any advantage on density increase or increment of radiation attenuation.

The mortars produced by the addition of the fine residue in substitution to the sand, showed an improvement in the retention of water in green (95%), in comparison to the produced without residue (41%). Also, for all the tested proportions of substitutions, the same resistance to the compression (approximately 40 MPa) was achieved. The results of the leaching and solubility tests showed that even in case of largest amount of substitution of sand for residue (14,55%), there were not great variations on the analyzed elements in the extract, allowing to conclude that the residue behaved satisfactorily to the mortar. Its use as part of mortar composition showed to be viable, since the magnetic properties that it may confer to the mortar doesn't commit its purpose.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E A PRESERVAÇÃO AMBIENTAL	5
3.2 ESTRATÉGIAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS	7
3.3 CIMENTO PORTLAND	20
3.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA	31
3.5 COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS	40
<b>4 PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>44</b>
4.1 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E REAGENTES	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	47
4.3 ENSAIOS DE PELOTIZAÇÃO DO RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS	56

4.4	ENSAIOS DE COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVA GRANULOMÉTRICA	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>71</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	71
5.2	FORMULAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS PARA ESTUDOS DE BLINDAGEM DE RADIAÇÃO	77
5.3	ENSAIOS DE PELOTIZAÇÃO DE RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS PESADOS	84
5.4	COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS	89
5.5	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS POR POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	96
5.6	OBSERVAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM MICROSCÓPIO ÓTICO DE TRANSMISSÃO	100
5.7	ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DAS ARGAMASSAS	102
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÃO TECNOLÓGICA</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>109</b>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Resíduos reciclados como material de construção civil e grau de desenvolvimento da pesquisa no Brasil. As áreas em cinza forte indicam conhecimento consolidado. Cinza fraco conhecimento em desenvolvimento. Em branco conhecimento incipiente ou inexistente (JOHN, 1997).</i>	13
<i>Tabela 2: Geração, reciclagem e descarte de resíduos na Indústria Siderúrgica (CHEHEBE et al. 1994).</i>	16
<i>Tabela 3: Geração de resíduos numa usina siderúrgica moderna (ASSIS et al. 1997):</i>	17
<i>Tabela 4: Composição e Massa Específica de Agregados Pesados (MEHTA &amp; MONTEIRO, 1994)</i>	27
<i>Tabela 5: Características Físicas dos Agregados Utilizados no Projeto das Paredes de Blindagem, da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).</i>	29
<i>Tabela 6: Valores estimados e Resultados Obtidos no Projeto das Paredes de Blindagem da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).</i>	30
<i>Tabela 7: Massas Específicas (no estado fresco e no estado endurecido) Obtidas no Projeto das Paredes de Blindagem da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).</i>	31
<i>Tabela 8: Distribuição granulométrica do agregado.</i>	43
<i>Tabela 9: Resultados da análise química dos cimentos CPII-E-32 e CPV-ARI-PLUS (HOLDERCIM, 1999).</i>	52
<i>Tabela 10: Características físicas dos cimentos CPII-E-32 e CPV-ARI-PLUS (HOLDERCIM, 1999).</i>	52
<i>Tabela 11: Composição da mistura a ser pelotizada.</i>	57
<i>Tabela 12: Análise química do cimento Portland CPI-S (CARNEIRO, 1999).</i>	61
<i>Tabela 13: Características físicas do cimento Portland, CPI-S (CARNEIRO, 1999).</i>	61
<i>Tabela 14: Composição granulométrica da areia para formulação das argamassas.</i>	63

<i>Tabela 15: Composição granulométrica do resíduo necessária para a formulação das argamassas.</i>	<u>64</u>
<i>Tabela 16: Composição da Lama de Aciaria utilizando-se a Técnica de Fluorescência de R-X.</i>	<u>72</u>
<i>Tabela 17: Medidas de área específica e densidade do resíduo.</i>	<u>74</u>
<i>Tabela 18: Distribuição granulométrica do resíduo por peneiramento.</i>	<u>75</u>
<i>Tabela 19: Resistência à compressão dos corpos-de-prova nas diversas proporções de adição de resíduo.</i>	<u>78</u>
<i>Tabela 20: Densidade dos corpos-de-prova.</i>	<u>82</u>
<i>Tabela 21: Coeficiente de atenuação de massa.</i>	<u>83</u>
<i>Tabela 22: Resultados de massa unitária das pelotas, da brita e da hematita.</i>	<u>86</u>
<i>Tabela 23: Resultados do ensaio de massa específica das pelotas, da brita e da hematita.</i>	<u>87</u>
<i>Tabela 24: Carga de ruptura das pelotas, da brita e da hematita.</i>	<u>88</u>
<i>Tabela 25: Resultados dos ensaios nas argamassas compostas com resíduo.</i>	<u>90</u>
<i>Tabela 26: Resultado dos ensaios de porosimetria para as diversas argamassas.</i>	<u>97</u>
<i>Tabela 27: Ensaio de solubilização das diversas argamassas e do resíduo.</i>	<u>103</u>
<i>Tabela 28: Ensaio de lixiviação das diversas argamassas e do resíduo.</i>	<u>104</u>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama esquemático de uma fábrica de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 1994).	22
Figura 2: Esquemática da colocação de absorvedores entre a fonte de radiação e o detetor (IPEN/CNEN-SP, 1986).	33
Figura 3: Absorção exponencial da radiação (IPEN/CNEN-SP, 1986).	33
Figura 4: Esquemática do efeito fotoelétrico (IPEN/CNEN-SP, 1986).	36
Figura 5: Espalhamento coerente (elástico) (IPEN/CNEN-SP, 1986).	36
Figura 6: Espalhamento incoerente (inelástico) (IPEN/CNEN-SP, 1986).	37
Figura 7: Esquemática do efeito de produção de pares (IPEN/CNEN-SP, 1986).	38
Figura 8: Distribuição granulométrica do agregado.	43
Figura 9: Composição percentual dos principais constituintes da lama de Aciaria.	73
Figura 10: Difratoograma da lama de aciaria.	74
Figura 11: Composição granulométrica obtida por peneiramento.	76
Figura 12: Distribuição granulométrica do resíduo obtida por laser.	77
Figura 13: Corpos-de-prova de concreto, cilíndricos.	79
Figura 14: Corpos-de-prova de concreto, prismáticos, para ensaios de blindagem.	80
Figura 15: Comparação dos ensaios de resistência à compressão em função do tipo de cimento e da porcentagem de resíduo.	80
Figura 16: Densidade dos corpos-de-prova.	82
Figura 17: Coeficiente de atenuação de massa.	83
Figura 18: Pelotas de resíduo produzidas com adição de cimento.	85
Figura 19: Massa unitária das pelotas, da brita e da hematita.	86
Figura 20: Resultados de absorção de água para as pelotas, brita e hematita.	87
Figura 21: Carga de ruptura das pelotas, da brita e da hematita.	89
Figura 22: Argamassas produzidas com e sem resíduo.	91
Figura 23: Resultados da relação água:cimento.	91
Figura 24: Resultados dos ensaios de determinação da densidade teórica ( $W_c$ ).	92

<i>Figura 25: Resultados dos ensaios de determinação da densidade no estado fresco (<math>W_a</math>).</i>	93
<i>Figura 26: Resultados dos ensaios de determinação de teor de ar incorporado.</i>	93
<i>Figura 27: Resultados dos ensaios de determinação de retenção de água.</i>	94
<i>Figura 28: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.</i>	95
<i>Figura 29: Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.</i>	95
<i>Figura 30: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra de referência (0%).</i>	98
<i>Figura 31: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 50% de resíduo (50%).</i>	98
<i>Figura 32: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 75% de resíduo (75%).</i>	99
<i>Figura 33: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 100% de resíduo (100%).</i>	99
<i>Figura 34: Observação em microscópio ótico da argamassa com 100% de resíduo substituindo a fração fina da areia.</i>	101
<i>Figura 35: Observação em microscópio ótico da argamassa sem resíduo (0%).</i>	101

# 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios que a sociedade moderna enfrenta é a proteção ao meio ambiente. Os principais pontos deste desafio são: a redução do consumo energético, de matérias primas naturais e a produção de resíduos. A quantidade de resíduos gerados vem aumentando consideravelmente como resultado direto das diversas atividades e processos que acompanham o desenvolvimento industrial.

Segundo a definição da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-SP (CETESB), resíduos "sólidos ou semi-sólidos" são produtos do processamento industrial que, por suas características, não podem ser lançados na rede de esgoto. O mesmo pode ser definido para determinados resíduos líquidos do mesmo processo industrial ou doméstico que não são passíveis de tratamento pelos métodos convencionais. Inclui-se também nesta definição os lodos de tratamento de efluentes industriais (CETESB, 1982). A disposição inadequada destes resíduos pode gerar novas fontes de poluição e ocasionar novo impacto ao meio ambiente resultando em processos de recuperação, em sua maioria, difíceis e onerosos.

Segundo dados do último inventário, realizado pela CETESB em 1997, o Estado de São Paulo gera 512.196 toneladas por ano de resíduos sólidos perigosos, 19.519.026 toneladas por ano de resíduos não inertes e 1.012.899 toneladas por ano de resíduos inertes. A destinação adequada de resíduos sólidos, sejam domésticos ou industriais, constitui assim um dos principais desafios dos profissionais que militam na área de Meio Ambiente. A tendência mundial é a dos 5 "Rs" (reprojetar, reduzir, reciclar, reutilizar e reaproveitar) (TRIPOLI, 2000).

O problema dos resíduos sólidos industriais no Estado de São Paulo vem se agravando no decorrer dos anos, essencialmente pela disposição inadequada

no solo. Segundo estudo preparado pela CETESB, 53% dos resíduos perigosos são tratados, 31% são armazenados e os 16% restantes são destinados a aterros aprovados ou ilegais (PIVA, 2000).

A deposição de resíduos gera concentração de produtos num espaço determinado, resultando um grave problema ambiental, enquanto que a reciclagem permite o seu reaproveitamento ou a dispersão dos compostos contaminantes em áreas maiores. Os resíduos podem ser gerados: (a) na fase de produção de um bem ou (b) na fase de consumo. Os resíduos gerados na fase de produção são mais facilmente reciclados, pois sua produção é concentrada e tende a apresentar características mais homogêneas. Já a reciclagem dos resíduos gerados na fase de consumo de um bem é mais difícil, porque depende de atividades complexas e de custo elevado para coleta e descontaminação.

A destinação adequada desses resíduos vem se tornando uma fonte de preocupação cada vez maior para as empresas. A disposição de resíduos em aterros industriais é considerada um recurso muito caro. Esta disposição tem sido feita em terrenos cada vez mais afastados encarecendo o transporte dos resíduos. Outros fatores que aumentam os custos desta disposição são as operações de manutenção e controle necessários em aterros industriais.

A indústria siderúrgica nacional, por exemplo, é conhecida pelo porte do seu parque industrial e a sua produção. No entanto, apesar de todo seu desenvolvimento, este ramo industrial produz cerca de 700 Kg de resíduos por tonelada de aço produzida. Destes somente 62% são reciclados em outras atividades produtivas, ficando o restante estocado ao longo dos anos. Entre os resíduos não reciclados encontram-se os finos, lamas, borras e refratários (CHEHEBE et al. 1994).

Assim, encontrar alternativas tecnológicas para destinação desses resíduos vem sendo uma das prioridades das empresas siderúrgicas, Institutos de pesquisa e órgãos governamentais. Atualmente, a meta é aumentar a média de reaproveitamento dos resíduos siderúrgicos, seja no próprio processo, ou em processos de terceiros.

A construção civil é o setor industrial que consome maior volume de matéria prima, assim sendo, passa a ser, também, um setor de grande possibilidade recicladora. Este setor industrial está presente em todas as regiões do país e em muitos casos apresenta muita tolerância quanto aos materiais usados em componentes com diferentes funções. Estas funções podem ser cumpridas de maneira satisfatória por produtos simples, com baixa resistência mecânica, tolerância a elevadas variações químicas, etc.

Desde o início do século a indústria cimenteira tem sido uma indústria recicladora tendo utilizado alguns resíduos na produção de cimento diferenciado como escória de alto forno e cinza volante.

Procurando-se desenvolver alternativas tecnológicas para contribuir no aumento da reciclagem de resíduos siderúrgicos estudaram-se, neste trabalho, diversas formas de se imobilizar, em elementos da construção civil, um resíduo constituído de óxido de ferro (lama de aciaria), produzido pela Usina José Bonifácio de Andrada e Silva (Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA/SP).

Em ensaios iniciais avaliou-se a possibilidade do reaproveitamento do resíduo em concreto estrutural para aplicação em blindagens de câmaras radioativas, uma vez que o resíduo em estudo, apresenta alta densidade.

No desenvolvimento deste trabalho foram estudadas também diversas técnicas que possibilitassem a adição da maior quantidade deste resíduo como material de construção civil. Foram aplicadas técnicas de pelletização para aglomerar o resíduo visando sua utilização como agregado graúdo, e a técnica de curvas granulométricas para produção de argamassas, como substituição da fração fina de uma areia.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o reaproveitamento de resíduo siderúrgico, a lama de aciaria, como agregado graúdo e miúdo para a construção civil, visando aumentar a média de reciclagem de resíduos no setor e consequentemente diminuir o impacto desse resíduo no meio ambiente.

Sendo o resíduo siderúrgico estudado constituído essencialmente de óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), na forma de magnetita, de elevada densidade, foi estudado a adição deste resíduo, como obtido na siderúrgica, na formulação de concretos com a finalidade de blindagem de radiação, em forma de pelotas para sua utilização como agregado graúdo e como substituição da fração fina de uma areia composta a partir de uma curva granulométrica teórica na composição de uma argamassa de revestimento.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E A PRESERVAÇÃO AMBIENTAL**

A questão ambiental assume cada vez mais destaque na sociedade moderna, repercutindo em políticas governamentais, bem como no setor produtivo do País e do mundo. As agressões ao meio ambiente, se não forem evitadas ou minimizadas, em breve tornarão o processo de degradação irreversível, acarretando o comprometimento da qualidade de vida das próximas gerações.

As relações com a natureza precisam ser repensadas e a indústria está na vitrine dessa questão por representar um dos elos mais sensíveis dessa relação. O mundo está caminhando para uma mudança de paradigmas de mecanicista para ecológico, de um sistema de valores enfatizando expansão, competição e dominação para um outro guiado pela conservação, cooperação, e parcerização, sob o ponto de vista mundial (JOHN, 2000).

Nas normas da série NBR-ISO 14.000 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a proteção ambiental apresenta uma revolução em gestão de negócios (Sistemas de Gestão Ambiental, NBR-ISO 14.001, 1996). Uma grande vantagem competitiva para as organizações é minimizar a geração de resíduos e gerenciar o consumo de seus recursos (HOJDA, 2001). Estes novos procedimentos farão com que organizações de todos os tipos estejam cada vez mais preocupadas em atingir e demonstrar um desempenho ambiental correto, controlando o impacto de suas atividades, produtos ou serviços no meio ambiente. As empresas que utilizam os Sistemas de Gestão Ambiental obtêm instrumentos para o gerenciamento de todos os aspectos que sejam relacionados com o meio ambiente, tendo em vista um maior atendimento à legislação e a um melhor desempenho ambiental.

O reaproveitamento de resíduos e o melhor aproveitamento das matérias primas são vistos por especialistas como as únicas saídas para a continuidade do processo tecnológico já implementado, pois atuam em perfeita sintonia com as necessidades do terceiro milênio. Ao mesmo tempo, a reciclagem permite o reaproveitamento de recursos e contribui para diminuir as agressões ao meio ambiente.

O desenvolvimento sustentável pode ser definido (SANTOS, 2001) como sendo aquele que atende às necessidades dos presentes sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades.

Esta visão sustentável não é nova, mas somente a poucos anos passou a ser reconhecida como uma alternativa coerente para a degradação ambiental. A realidade começa a mudar a partir de algumas experiências em empresas, que provaram ser possível conciliar a excelência produtiva com a proteção ambiental. Os setores de produção de energia, papel/celulose e têxtil destacam-se como os pioneiros nessa conquista no Brasil (LERÍPIO et al. 1997).

Os resíduos gerados pelos diferentes processos industriais são a principal fonte de degradação ambiental. Grande parte da legislação ambiental, hoje disponível, envolve: **(a)** estabelecimento de limites máximos para emissões atmosféricas e de efluentes líquidos; **(b)** estabelecimento de procedimentos restritos para classificação e deposição de resíduos em aterros. Estas medidas significam maiores custos para os produtores e mesmo para o Estado.

O crescimento do grau de exigência de medidas de proteção ambiental encarece os custos dos aterros de resíduos sólidos e, também, dos equipamentos de controle nas indústrias. Em países do primeiro mundo os custos de deposição em aterros controlados variam entre US\$30 e US\$60 por tonelada (JOHN, 1997).

Duas alternativas, não excludentes, podem ser consideradas quando se busca a redução dos custos de deposição e tratamento de resíduos: **(a)** redução do volume de resíduos produzidos; **(b)** reciclagem de resíduos.

A redução do volume de resíduos produzidos apresenta sempre limitação técnica difícil de ser ultrapassada em uma determinada base tecnológica. A reciclagem ou reutilização dos resíduos não apresenta, a princípio, qualquer limite desta natureza e é a única alternativa que pode gerar recursos financeiros.

Como se sabe a construção civil consome grandes quantidades de materiais, especialmente em países que, como o Brasil, continuam ampliando seu ambiente construído. O mercado de consumo de materiais de construção abrange todas as regiões do país, permitindo reduzir os custos de transporte. Grande parte dos componentes necessários à produção de edifícios pode ser produzida com materiais sem grande sofisticação técnica. Assim, a construção civil é um mercado atrativo para a realização de reciclagem secundária de resíduos e, provavelmente, já é o principal setor da economia a reciclar resíduos. Atualmente esta reciclagem ocorre especialmente na indústria cimenteira que incorpora, somente no Brasil, entre 2 a 3 milhões de toneladas de escória de alto forno granulada a cada ano (SILVA et al. 1997).

### **3.2 ESTRATÉGIAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS**

A estratégia tradicional de colocação de resíduos no mercado tem sido a da "venda ou doação de resíduos". Nesta linha atuam as bolsas de resíduos organizadas a partir da Federação da Indústria. Neste modelo, normalmente o cliente (usuário) é que detém a tecnologia de reciclagem e, via de regra, o resíduo é empregado em substituição a outro produto. A ênfase de venda é, sempre, o menor preço. Muitas vezes é impossível a colocação do resíduo no mercado mesmo na forma de doação. Esta abordagem é relativamente eficiente e resolve o problema do ponto de vista da sociedade e do produtor do resíduo, mas apresenta seus limites.

Em primeiro lugar, o produtor não possui maior controle da forma de utilização do resíduo e as falhas na utilização do mesmo podem afastar consumidores e, mesmo, causar problemas ambientais e de saúde de trabalhadores e usuários. Em segundo lugar, o “mercado” assim estabelecido é instável e, muitas vezes, monopsônico ou oligopsônico. Em terceiro lugar, o faturamento obtido com a comercialização do resíduo é, muitas vezes, desprezível ou inexistente.

Uma visão mais moderna da reutilização de resíduos é a partir de uma caracterização do resíduo, selecionando formas de reciclagem que maximizem o potencial intrínseco do resíduo e que apresentem vantagens competitivas potenciais em termos de desempenho e não em termos de preço ou custo. Ou seja, aplicações nas quais o produto agregue valor para o consumidor (JOHN, 1997).

### 3.2.1 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Um resíduo com uso potencial na indústria de construção é o “pó de carvão” (resíduo produzido na mineração do carvão). Em 1976 na Inglaterra produziram-se 50 milhões de toneladas, que se somaram aos 3.000 milhões de toneladas já estocadas. No mesmo ano, 207 milhões de toneladas de agregado natural foram produzidos. NIXON & GUTT (1981) apresentaram um procedimento de manufatura de agregados sintéticos utilizando “pó de carvão”. O processo consistiu na pelotização do material e posterior aquecimento preliminar entre 500 e 800°C para eliminar voláteis, sendo por fim os pelotes sinterizados a 1200 °C. Nesses estudos não foram encontrados problemas de durabilidade do concreto em 5 anos de observação e, a suscetibilidade ao ataque da reação álcali-agregado parece ser comparável aos agregados comuns embora testes a longo prazo continuem a ser realizados.

DANTAS & SBRIGHI (1986) estudaram o reaproveitamento de lama vermelha como agregado para o concreto. A lama vermelha é um rejeito da transformação do minério de alumínio, denominado bauxita, material metálico de grande aplicação na metalurgia moderna. Este rejeito é constituído basicamente de silicatos de ferro e alumínio, com elevada causticidade originado do processamento alcalino a que é submetida a bauxita. O seu aspecto físico é de um material no qual predominam as frações granulométricas muito finas embebido em soluções altamente cáusticas, o que leva a grandes problemas para sua deposição, seja pelo elevado volume gerado, seja pela significativa agressividade ao meio ambiente, que poderia advir de uma disposição não criteriosa deste material.

Para obtenção do agregado, a lama vermelha é aglomerada em disco pelletizador. As pelotas são levadas ao aparelho de sinterização onde ocorre a aglomeração à temperatura de 1200 °C, obtida pela queima do carvão contido nas pelotas. O sinter obtido é então britado, estabilizado em tambor rotativo e classificado granulometricamente. Em função do poder de absorção de água de agregados fabricados por sinterização, os ensaios foram realizados após a saturação do material, com o objetivo de torná-lo estável no processo de mistura, dando condições para correção da relação água/cimento. Nestes termos, procuraram-se dar garantias para que o agregado de lama vermelha sinterizada nem fornecesse nem retirasse água do sistema.

Analisando o desempenho de corpos-de-prova confeccionados com estes agregados e os confeccionados com agregados graníticos, comumente utilizados na grande São Paulo, verificou-se a viabilidade do uso com maior leveza do material e a possibilidade de atender à faixa de resistência à compressão compreendida entre 10 MPa e 25 MPa, à idade de 28 dias.

CHAMIE (1994) estudou a imobilização de resíduos de lamas galvânicas também em matriz de cimento. Observou que para relações cimento:resíduo iguais ou superiores a 6:1 a matriz pode ser classificada como inerte. Verificou também que os elementos constituintes do resíduo (lama galvânica contendo de

60 a 75% de umidade e como constituintes tóxicos os metais Pb, Cd, Cr, Zn, Ni e Fe) se incorporam à estrutura cristalina da matriz.

VALLE (1994) aborda em seus estudos o gerenciamento de resíduos realizado pela AÇOMINAS. No seu processo produtivo a empresa gera cerca de 610 kg de resíduos por tonelada de aço produzido, sendo deste total 59% escórias de alto forno e aciaria. A escória de alto forno é utilizada como matéria prima na indústria cimenteira ou em substituição ao agregado miúdo em argamassas e concretos, o que reduz o consumo de cimento. No que diz respeito às escórias de aciaria, após seu beneficiamento, a parte metálica é reciclada e o restante, denominado agregado siderúrgico, tem utilização como lastro ferroviário, na pavimentação de vias, seja como material de base ou acabamento, e como agregado em concreto não estrutural.

BARBOSA et al. (1994). estudaram a viabilidade técnica da adição do "Resíduo Oriundo do Forno Elétrico" (ROFE), ao cimento Portland obtendo assim um cimento alternativo para a construção civil. A produção mensal do pó oriundo do forno elétrico na Siderúrgica Mendes Júnior S.A é de 600 toneladas, apresentando-se como material sem propriedades aglomerantes à temperatura ambiente, pois é composto essencialmente pelo óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ). Esta pesquisa concluiu pela viabilidade da adição do ROFE ao cimento Portland (CPII-E/32) com o traço de 1:3 (ROFE : cimento), sendo que os resultados dos ensaios de resistência à compressão comparados com os do concreto sem resíduo não mostraram diferenças significativas e que neste traço há um maior consumo de ROFE (resíduo industrial com custo desconsiderado) e um menor consumo de cimento (produto de elevado custo).

Pesquisadores utilizaram o rejeito da demolição de estruturas de concreto, já obsoletas, como agregado na fabricação de um novo concreto. Obtiveram um material com características semelhantes aos que utilizam agregados naturais. Esta técnica enfrenta o problema que a geração de rejeito de concreto é dispersa, não sendo uma fonte constante de agregados (TOPÇU & GUNÇAN, 1995).

O concreto tem sido utilizado em vários países para imobilizar resíduos. Como exemplo temos a utilização de cinza de bagaço de cana como substituição de agregado fino nas ilhas Maurício, uma pequena ilha no Oceano Índico. Nesta ilha, onde é grande a produção de cana de açúcar, o bagaço é queimado para produção de energia o que produz aproximadamente 20.000 toneladas anuais de cinza. Foi utilizada a cinza granulada (11.000 toneladas) como substituição de parte da areia, cuja obtenção é cara, e o concreto obtido teve desempenho semelhante ao concreto sem o resíduo (BANGUAT, 1997).

No estado do Texas, Estados Unidos, utilizou-se uma técnica na qual o resíduo resultante da remoção de chumbo, cádmio e cromo da água de lavagem de pontes metálicas foi imobilizado em matriz de concreto. Os resultados obtidos mostraram que a lixiviação dos resíduos, depois de imobilizados no concreto, estavam dentro dos limites americanos, e que a resistência à compressão deste novo concreto era semelhante à do concreto sem resíduo (SALT et al. 1997).

A presença de resíduos em concreto também foi estudada no projeto de imobilização de solos contaminados com benzeno ou subprodutos da atividade petrolífera como agregado na produção de concreto. Este projeto novamente manteve a fixação dos poluentes na matriz, sem que as propriedades de resistência se mantivessem semelhantes àquelas obtidas para o concreto sem o resíduo (EZELDIN et al. 1997).

AYHAN et al. (1998), estudaram a aplicação de cinza de carvão, produzida em termoelétricas, cujo aumento de produção tem se transformado em um problema ambiental, como aditivo ao concreto. Utilizando as propriedades pozolânicas da cinza foi possível a substituição de até 25% de cimento, baseado num consumo de 300 Kg/m<sup>3</sup> de material cimentício, e um ganho de 24,3% no aumento da resistência à compressão comparado ao traço de controle.

ISAIA (1995), estudou os efeitos da adição de teores normais e elevados de cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em misturas binárias ou terciárias de cinza volante com as duas últimas pozolanas. A análise e interpretação dos resultados permitem concluir que, entre os concretos

estudados, o que apresentou melhor desempenho nas variáveis concernentes à durabilidade foi o que conteve cinza volante em mistura ternária com cinza de casca de arroz na proporção de (20 + 30)%.

JOHN (1997) recentemente realizou um estudo referente ao "status" da pesquisa sobre reciclagem de diversos resíduos como materiais alternativos para uso na construção civil. A Tabela 1 apresenta um resumo do estado da arte da pesquisa de novos materiais, tanto do ponto de vista da substituição de cimento por outro material com propriedades aglomerantes, como da substituição de agregados, sempre tendo em mente a reutilização de um resíduo para minimizar seu impacto no meio ambiente.

Tabela 1: Resíduos reciclados como material de construção civil e grau de desenvolvimento da pesquisa no Brasil. As áreas em cinza forte indicam conhecimento consolidado. Cinza fraco conhecimento em desenvolvimento. Em branco conhecimento incipiente ou inexistente (JOHN, 1997).

Resíduos	Caracterização	Risco Ambiental	Alternativas de Reciclagem	Estudos laboratoriais	Risco Ambiental do produto	Viabilidade Econômica	Desenvolvimento do Processo	Controle de qualidade/Normatização	Transferência da Tecnologia	Novas Alternativas
Escória de Alto Forno										
Cinza Volante										
Escória de Aciaria										
Cinza de Grelha										
Entulho de Obra										
Cinza de Casca de Arroz										
Escória de Cobre										
Cinza de Xisto Betuminoso										
Fosfogesso										
Fibras Vegetais										
Microsilica										
Cal de Carbureto										
Resíduos de Madeira										
Areia de Fundição										
Beneficiamento de Rochas										
Aparas de Plástico										

### 3.2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS PERIGOSOS

O encapsulamento, processo muitas vezes dito como solidificação, estabilização ou fixação, consiste em estabilizar os resíduos perigosos e transformá-los em materiais menos poluentes, através da adição de aglomerantes e produtos químicos. Este método envolve reações químicas e processos físicos e visa atingir os seguintes objetivos: melhorar as características físicas e de manuseio destes resíduos, diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de constituintes poluentes, limitar a solubilidade de qualquer constituinte no resíduo, desintoxicar os constituintes poluentes.

As principais técnicas de encapsulamento de resíduos atualmente encontradas estão baseadas em materiais pozolânicos, em materiais termoplásticos, em polímeros orgânicos, em auto-solidificação e em formulação de vidros, de minerais sintéticos ou cerâmicos.

A solidificação através da adição de cimento Portland ou outros produtos inorgânicos é particularmente eficiente para resíduos com elevados teores tóxicos, pois, devido ao pH obtido na mistura com cimento, diversos cátions multi-valentes são convertidos em carbonatos e hidróxidos insolúveis. Íons metálicos também podem ser retidos na estrutura cristalina formada pelo cimento. A seguir são descritas as vantagens e desvantagens dessa técnica (GIRALDELLI, 1990):

#### **Vantagens:**

- matéria-prima abundante e barata;
- tecnologia de manuseio e mistura do cimento é conhecida e os equipamentos são comuns;
- não é necessária a secagem do resíduo;
- os sistemas são muito tolerantes a variações químicas e os resíduos só necessitam de pré-tratamento se contiverem componentes que retardem as reações do cimento;

- as características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas através de revestimentos selantes;
- pode-se variar a quantidade de cimento usado para se produzir produtos com alta capacidade de suporte, bons materiais de fundação ou de sub-base.

#### **Desvantagens:**

- geralmente são necessárias grandes quantidades de cimento, o que pode ser compensado pelo baixo custo do material;
- os produtos finais não revestidos podem requerer um projeto de aterro específico;
- os resíduos contendo grandes quantidades de impurezas que afetam o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento podem necessitar de um pré-tratamento ou da utilização de cimentos especiais de custo mais elevado, ou de aditivos;
- a alcalinidade do cimento transforma o íon amônio em gás amônia.

#### **Solidificação/Estabilização Ideal**

Um processo de fixação ideal torna os constituintes nocivos, quimicamente não reativos e/ou estáveis, de tal forma inertes, que, para uma disposição final segura, não seja necessária nenhuma contenção secundária. Para ser completamente eficaz, o processo de tratamento deve gerar um produto final com características tais que apresente boa estabilidade dimensional, resistência às intempéries, baixa permeabilidade, capacidade de suporte elevada e resistência ao ataque de agentes biológicos.

Com o conhecimento total do resíduo a ser tratado e dos processos de tratamento de que se dispõe, é possível a produção de um produto final que se aproximará das condições ideais preconizadas para um material estabilizado.

### 3.2.3 RESÍDUOS DE SIDERURGIA

Uma usina siderúrgica integrada a coque é capaz de gerar cerca de 700 kg de resíduos por tonelada de aço líquido. Estimando uma produção de 700 milhões de toneladas de aço por ano, a geração anual de resíduos é da ordem de meio bilhão de toneladas.

Segundo estudos realizados na Companhia Siderúrgica Nacional – CSN (ASSIS et al. 1997), é possível identificar 83 tipos de resíduos gerados numa usina siderúrgica. Os resíduos se apresentam sob a forma de:

- Gases de coqueria, alto-forno e aciaria LD;
- Fumaças;
- Resíduos sólidos (escórias, pós, carepa, etc.)
- Efluentes líquidos;
- Lamas;
- Resíduos sociais.

A Tabela 2 apresenta os resultados do gerenciamento dos resíduos produzidos no processo siderúrgico. Estes resíduos são constituídos predominantemente por escórias de alto-forno e aciaria (cerca de 50%) sendo que o restante engloba finos, pós, lamas, borras e refratários. No que se refere a emissões, a indústria siderúrgica se caracteriza por grandes volumes de efluentes sólidos, líquidos e gasosos, em geral, não tóxicos.

Tabela 2: Geração, reciclagem e descarte de resíduos na Indústria Siderúrgica (CHEHEBE et al. 1994).

	$10^3 \text{ t ano}^{-1}$	$\text{Kg t}^{-1}$	(%)
Geração	14.984	703	100
Reciclagem	9.345	439	62,4
Descarte	5.639	264	37,6

A Tabela 3 mostra valores percentuais, típicos, da contribuição de cada divisão de uma usina siderúrgica, integrada, a coque, na geração total de resíduos (os quantitativos anuais são da CSN) (ASSIS et al. 1997).

Tabela 3: Geração de resíduos numa usina siderúrgica moderna (ASSIS et al. 1997):

<b>Divisões da Usina</b>	<b>Resíduos (%)</b>	<b>Geração (t ano<sup>-1</sup>)</b>
Coqueria	0,56	15.228
Sinterização	8,50	228.837
Alto-forno	49,17	1.323.346
Calcinação	7,96	214.261
Aciaria LD	25,98	699.113
Lingotamento contínuo	2,05	55.320
Laminador desbastador	1,07	28.920
Dessulfuração de gusa	0,12	3.240
Laminador de Tiras à Quente	2,28	61.343
Laminador de Tiras à Frio	0,38	10.467
Decapagem contínua	0,22	6.028
Linhas de acabamento	0,12	3.269
Fundição	1,51	40.116
Oficina mecânica/elétrica	0,08	2.267
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>2.691.845</b>

### 3.2.4 FORMAÇÃO DE POEIRAS DURANTE A FABRICAÇÃO DO AÇO

A produção de aço pode ser feita, principalmente, tanto em aciarias elétricas como também a oxigênio. Seja qual for o tipo de processo utilizado há sempre a formação de poeira que é coletada pelo sistema de limpeza de gases.

Para impedir a poluição, unidades de despoeiramento tais como instalações para lavagem de gases, câmara dos sacos de filtragem e precipitadores eletrostáticos podem compor o sistema de limpeza de gases. A importância dada à limpeza dos gases por determinada usina pode diferir consideravelmente, mas é digno mencionar que isto não é somente mais um assunto para proprietários das usinas decidirem. Atualmente, os órgãos governamentais e a própria comunidade têm forte participação neste assunto.

A taxa de geração de poeira durante a operação de conversores é fruto de uma temperatura muito alta situada na zona de impacto de jato de oxigênio, e também devido ao processo de descaburação do metal líquido, período em que ocorre a maior formação de poeira.

A formação de poeira em conversores é causada essencialmente pela ejeção de partículas do metal líquido ocasionada pela reação do oxigênio com o CO na superfície do banho metálico. Usando uma câmara projetada para fazer com que gotas de Fe-C percorram uma região rica em oxigênio, verifica-se que as gotas desintegram-se e dessa forma produzam gotas ainda menores. A ação das bolhas de CO e a posterior oxidação e explosão das gotículas ejetadas contribuem, em muito, para a formação de poeira tanto em escala laboratorial (96% da poeira foi gerada pela ação das bolhas de CO) como em escala industrial. A explosão das gotas inicialmente ejetadas ocorre porque uma porção da camada de óxido que cobre a bolha é sugada para dentro dela, fazendo com que haja a formação de CO e a conseqüente explosão da gota (MANTOVANI, 1998).

Esta poeira em suspensão é removida do ambiente utilizando-se um sistema de filtros-manga, que são lavados, e, os sólidos retidos e a água utilizada irão dar origem à lama de aciaria. Esta lama é bombeada para espessadores em seguida filtrada em um filtro prensa. As tortas obtidas são transportadas por uma esteira para serem carregadas em caminhões para uma área de deposição, que no caso da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), tem um estoque estimado

em fevereiro de 2000 de 11.252 toneladas ocupando um volume de 9.700 m<sup>3</sup> (LENZ, 2000).

A seguir apresenta-se uma breve descrição da Usina José Bonifácio de Andrada e Silva.

#### **Usina Siderúrgica JOSÉ BONIFÁCIO DE ANDRADA E SILVA (COSIPA) (PEREIRA, 1998)**

A usina siderúrgica José Bonifácio de Andrada e Silva foi instalada em Cubatão (SP) na década de 60, aproveitando os insumos da região, juntamente com outras indústrias (petroquímicas), vindo a seguir o complexo de fertilizantes. Localizada, juntamente com as outras indústrias, numa estreita faixa de terreno sólido de planície entre os manguezais e a escarpa da Serra do Mar, ocupa uma área total de aproximadamente 20 Km<sup>2</sup> (cerca de 1/8 da área total do município de Cubatão). Encontra-se na cabeceira de uma área estuarina, em que há mistura de água doce e salgada, onde a complexidade da biota excede os demais ambientes aquáticos. Há de se destacar, também, a vegetação da Serra do Mar – Mata Atlântica, que, nas encostas próximas a Cubatão, sofre ainda a ação dos poluentes aero-dispersos oriundos do complexo industrial.

A ocupação da região de Cubatão ocorreu em função de suas características: área abrigada para o desenvolvimento do porto, proximidade e facilidade de transporte para a região metropolitana de São Paulo, e boa disponibilidade de água (rio Cubatão e afluentes) e energia elétrica (Usina de Henry Borden).

Nessa região, todos os ecossistemas são altamente produtivos, pois, além da Mata Atlântica e do estuário, há extensas áreas de manguezais, apesar de grande parte ter sido ocupada e degradada. Esses manguezais sofrem um processo cíclico de inundação e drenagem face ao regime das marés, propiciando a retenção das cheias dos rios e a formação de bancos de sedimento, e o desenvolvimento de um ecossistema natural extremamente produtivo. Porém, a ocupação da região por grandes complexos industriais levou as condições

naturais de equilíbrio a sofrerem uma alteração radical, devido principalmente a três fatores: aterramento dos manguezais, execução de obras viárias de desmontes e desmatamentos, e fechamento de canais e braços de rios, reduzindo a área geral das seções para escoamento das águas e causando elevação das linhas d'água.

Os rios dessa região caracterizam-se por drenarem áreas íngremes da Serra do Mar, onde se observam as precipitações mais intensas da costa do Atlântico. As séries históricas de postos pluviométricos e fluviométricos permitem relacionar as vazões de picos de cheias com os respectivos períodos de retorno. Normalmente, e de forma simplificada, admitem-se as vazões de  $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para o rio Cubatão e de  $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para o rio Mogi, como as vazões de projeto para obras fluviais. O regime de vazão dos rios é de grande interesse para a usina siderúrgica, bem como para outras indústrias que ocupam áreas adjacentes e da comunidade que habita de maneira dispersa as áreas próximas.

Originalmente, quase todas as áreas ribeirinhas aos rios Cubatão, Mogi e Piaçaguera inundavam-se periodicamente, pois grande parte delas era de manguezais e, como tal, situava-se ao nível do mar, pouco abaixo da cota 3,0 m. Com o passar do tempo e a ocupação urbana e industrial essas áreas foram sendo aterradas, tendo atingido a cota 5,0 e até 5,5 m, como no caso dos terrenos da siderúrgica.

### **3.3 CIMENTO PORTLAND**

#### **3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

O cimento Portland foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir utilizando uma pedra típica de Portland, uma ilha situada ao sul do País. Como o resultado

da invenção de Aspdin se assemelhásse na cor e na dureza à essa pedra ele registrou com esse nome sua patente.

O produto dos fornos de cimento é chamado de clinker. O clinker consiste principalmente em silicato de cálcio, formado através da reação entre o calcário e a argila sob altíssimas temperaturas. O cimento Portland, que é o ingrediente ativo no concreto, é um cimento hidráulico (isto é, reage com água) e é produzido pela pulverização do clinker seguida de sua mistura ao sulfato de cálcio.

Fornos de cimento são grandes fornalhas tipicamente com 3,6m de diâmetro, 137m de comprimento e ligeiramente inclinadas na horizontal. A produção de cimento requer uma reação química entre calcário e argila. Uma mistura química precisa entre calcário, sílica, alumina e óxido de ferro é colocada no alimentador do forno rotatório. Este processo térmico da matéria-prima misturada pode ser descrito em 3 estágios: secagem, calcinação e clinquerização.

O combustível é queimado na seção de descarga do forno. Durante essa operação o forno tem uma rotação lenta (60 a 80 revoluções por hora). Após um período de 3 ou 4 horas, os materiais descem ao longo do forno rotativo e são progressivamente aquecidos. O aquecimento dos materiais ocasiona uma série de reações químicas muito importantes. No primeiro terço do forno, a matéria-prima é desidratada e aquecida a 875° C. No segundo terço do forno, chamada zona de calcinação, o calcário libera o dióxido de carbono, produzindo óxido de cálcio ou cal. No último terço ou zona de sinterização, os materiais são aquecidos até 1.340° C, onde os argilo-minerais e outros materiais recém formados fundem-se parcialmente. Quando os materiais alcançam 1.420° C, a cal reage com a sílica dos argilo-minerais para formar os novos minerais do cimento Portland. Essa reação final leva aproximadamente 20 minutos para se completar (BERNOIT & HAMEL, 1993). A Figura 1 apresenta de maneira esquemática uma fábrica de cimento.

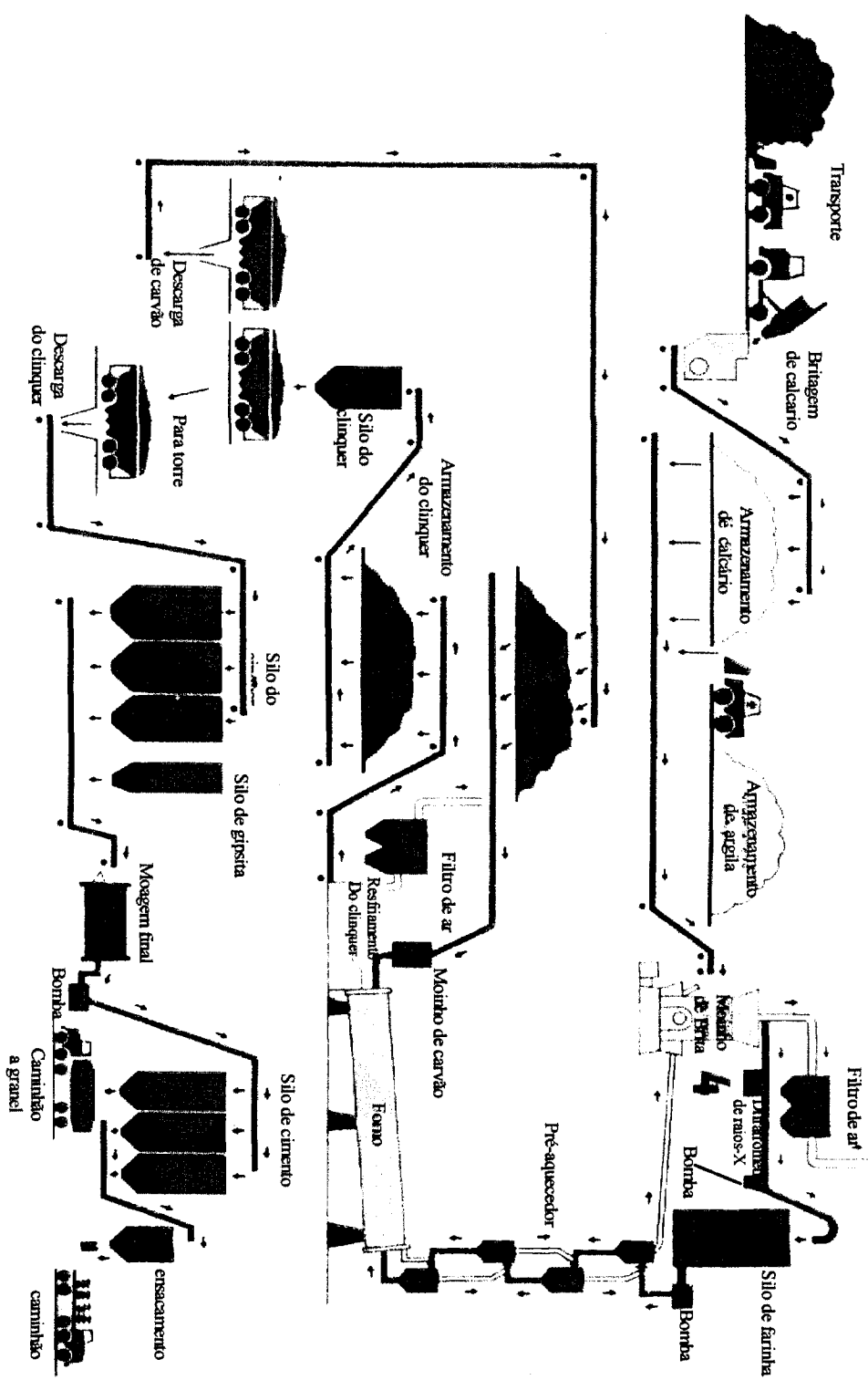


Figura 1: Diagrama esquemático de uma fábrica de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O cimento Portland anidro não aglomera areia e agregado graúdo; ele só adquire a propriedade adesiva quando misturado à água. Isto acontece porque a reação química do cimento com a água, comumente chamada de hidratação do cimento, gera produtos que possuem características de pega e endurecimento.

Foram propostos dois mecanismos de hidratação do cimento Portland. A hidratação por dissolução-precipitação envolve a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e, devido à sua baixa solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada. Portanto, o mecanismo de dissolução-precipitação visa uma completa reorganização dos constituintes dos componentes originais durante a hidratação do cimento. No outro mecanismo, denominado topoquímico ou hidratação no estado sólido do cimento, as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em solução. A partir de estudo sobre pastas de cimento, parece que o mecanismo de dissolução-precipitação é dominante nos estágios iniciais de hidratação do cimento, ao passo que, em estágios posteriores, quando a mobilidade iônica torna-se restrita, a hidratação da partícula residual de cimento pode ocorrer por reação do estado sólido.

Uma vez que o cimento é composto de uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação consiste na ocorrência simultânea dos compostos anidros com água. Entretanto, todos os compostos não hidratam à mesma velocidade. Os aluminatos são conhecidos por hidratarem muito mais rapidamente do que os silicatos e são amplamente responsáveis pelo enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação) características da pasta de cimento. Já os silicatos, que compõem 75% do cimento Portland comum, têm importante papel na determinação das características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência).

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a alta temperatura tendem a entrar em solução, e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies iônicas. Como

resultado das combinações entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, após alguns minutos de hidratação do cimento Portland, aparecem os primeiros cristais aciculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratado chamado etringita. Algumas horas depois, cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado começam a preencher o espaço vazio ocupado inicialmente pela água e as partículas de cimento em dissolução. Após alguns dias, dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento, a etringita pode se tornar instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que tem a forma de placas hexagonais (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A seguir são descritos os tipos, quantidades e características das quatro fases sólidas principais geralmente presentes na pasta:

- **Silicato de cálcio hidratado.** A fase silicato de cálcio hidratado, abreviado para **C-S-H**, constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado e é, conseqüentemente, a mais importante na determinação das propriedades da pasta. A morfologia do C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Devido às suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, os cristais só puderam ser observados com o advento do microscópio eletrônico.
- **Hidróxido de cálcio.** Cristais de hidróxido de cálcio (também chamado de portlandita) constituem 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Em contraste com o C-S-H, o hidróxido de cálcio é um composto com uma estequiometria definida,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ele tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos. A morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas.
- **Sulfoaluminatos de cálcio.** Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida e, conseqüentemente, desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade. Já foi estabelecido que, durante os primeiros estágios da hidratação a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de trissulfato hidratado,  $\text{C}_6\text{A}\bar{3}\text{H}_{32}$ , também chamado etringita, o qual forma cristais aciculares.

- **Graços de clínquer não hidratado.** Dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratado podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação.

### 3.3.2 CONCRETO E PRODUTOS RELACIONADOS

As características do concreto dependem da natureza do agregado, da natureza da pasta de cimento-água e das quantidades relativas dos dois. Quando de 0,4 a 0,7 unidades (em massa) de água são misturados com 1,0 unidade de cimento, o produto tem inicialmente uma consistência pastosa. Devemos ver o concreto como sendo a mistura do agregado com a referida pasta. Esta pasta endurece lentamente por hidratação. Em outras palavras, as propriedades do concreto são governadas por sua estrutura interna, a exemplo do que ocorre com qualquer outro material (VAN VLACK, 1988).

#### **Agregados**

A areia e o cascalho devem ser materiais duráveis com uma resistência muito maior que aquela esperada para o concreto final. Além disso, é necessária a medida do tamanho do agregado que é obtido por análise granulométrica. Um tamanho granulométrico médio tem significado limitado. Por exemplo, a distribuição de grãos pode ser numa faixa muito estreita, como é típico da areia de praia, ou com grande variação de tamanho, como em areias de rios e ainda resultarem num mesmo tamanho médio. Deste modo o engenheiro está usualmente interessado não só no valor médio, mas também na distribuição dos tamanhos, determinada através da percentagem de material retido em peneiras sucessivas.

## **Cimento**

A resistência da pasta de cimento e água já endurecida praticamente estabelece a resistência do concreto, visto que com o uso de um agregado resistente, qualquer ruptura ocorrerá entre a areia e/ou agregados graúdos. Consequentemente, e em primeira instância, um resultado produzido somente da mistura de cimento e água poderia representar tão satisfatória resistência quanto na presença de agregado. Contudo, seu preço seria proibitivo. Deste modo, a mistura de cimento e água é "diluída" com materiais muito resistentes e baratos. Conceitualmente, o concreto contém cascalho ou rocha britada, com areia preenchendo os interstícios, enquanto a pasta de cimento-água preenche os espaços entre os grãos de areia.

### **3.3.3 CONCRETO COMO BLINDAGEM PARA RAIOS X E RADIAÇÃO GAMA**

Materiais comuns tais como concreto e chumbo podem ser usados como absorvedores ou blindagens para reduzir exposições aos trabalhadores. Radiação Beta (elétrons) é completamente freada em poucos centímetros destes materiais. A espessura de qualquer material que reduza a quantidade de radiação passando através dele pela metade é chamada de camada semi-redutora. Para radiação X e gama, o processo de absorção depende em grande grau da absorção de Compton e do espalhamento, o qual, por sua vez aumenta com a densidade de elétrons dos átomos.

Como primeira aproximação, a densidade de elétrons varia diretamente com a densidade do material. Onde o espaço é problema, o chumbo é geralmente utilizado para obter a blindagem desejada. Chumbo, no entanto, necessita suporte estrutural extra, uma vez que não é auto-sustentável. O concreto, por sua vez, é o material de blindagem mais usual principalmente por razões econômicas, estruturais e disponibilidade no local além de suas boas qualidades de blindagem (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

## Agregados Pesados

Comparados ao concreto normal, que tipicamente tem massa específica de  $2400 \text{ kg m}^{-3}$ , concretos pesados variam de  $2880$  a  $6100 \text{ kg m}^{-3}$  e tem aplicação para blindagem da radiação. Agregados pesados (isto é, aqueles que têm massa específica maior do que os agregados normais) são usados para produção de concreto pesado. Rochas naturais adequadas para a produção de agregados pesados consistem predominante de dois minerais de bário, vários minerais de ferro e um de titânio (Tabela 4).

Tabela 4: Composição e Massa Específica de Agregados Pesados (MEHTA & MONTEIRO, 1994)

Tipo de agregado	Composição química do mineral principal	Massa específica do mineral puro ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Massa unitária típica ( $\text{kg m}^{-3}$ )
Waterita	$\text{BaCO}_3$	4290	2320
Barita	$\text{BaSO}_4$	4500	2560
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	5170	2720
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4900-5300	3040
Lepidocrocita	Óxidos de ferro hidratados contendo 8% a 12% de água	3400-4000	2240
Goethita			
Limonita			
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	4720	2560
Fosfetos de ferro	$\text{Fe}_3\text{P}$ , $\text{Fe}_2\text{P}$ , $\text{FeP}$	5700-6500	3680
Agregados de aço	Fe	7800	4480

## **Materiais e Dosagem**

Por causa da alta massa específica das partículas do agregado, a segregação do concreto fresco é uma das principais preocupações na dosagem da mistura. Do ponto de vista da elevada massa específica e da menor tendência à segregação, é desejável que tanto o agregado miúdo quanto o graúdo sejam produzidos com rochas e minerais de alta massa específica.

Devido à forma e à textura áspera das partículas de agregados britados, o concreto pesado tende a ser áspero. Para superar esse problema, é costume usar uma areia mais fina, maior proporção de areia no agregado do que no concreto convencional e um teor de cimento superior a  $360 \text{ kg m}^{-3}$ .

Como exemplo, num estudo do "Corps of Engineers", da estação experimental de distribuição de água, usando  $430$  a  $575 \text{ kg m}^{-3}$  de cimento Portland do tipo I, magnetita ou ilmenita como agregado, com dimensão máxima de  $12$  ou  $38 \text{ mm}$  e fator água-cimento  $0,30$  ou  $0,35$ , foram produzidos concretos pesados ( $3.680 \text{ kg m}^{-3}$  de massa unitária), que desenvolveram resistências à compressão, aos  $7$  dias de  $52$  a  $65 \text{ MPa}$  e de  $62$  a  $76 \text{ MPa}$ , aos  $28$  dias (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

### **3.3.3.1 Estudo de Caso de Aplicação de Concreto Pesado (DANTAS et al. 1998)**

A seguir está descrita resumidamente a execução prática da aplicação de concreto pesado no projeto desenvolvido para o setor de radioterapia da Casa de Saúde Santa Marcelina. Foi utilizada uma série de agregados pesados para obter um concreto pesado, optando-se pela utilização de um cimento que apresentasse a menor liberação de calor durante o processo de hidratação o qual corresponde ao valor menor ou igual a  $60 \text{ cal g}^{-1}$ , aos  $7$  dias de idade.

As massas específicas dos concretos resultantes deveriam ser: maior ou igual a 4000 Kg m<sup>-3</sup> para um volume de 280 m<sup>3</sup>, e maior ou igual a 4200 Kg m<sup>-3</sup> para um volume de 30 m<sup>3</sup>, em função do projeto idealizado, levando em conta a limitação do espaço disponível. Assim sendo, praticamente, todo o agregado utilizado nesse concreto foi de alta densidade, apresentando como principais características os valores apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Características Físicas dos Agregados Utilizados no Projeto das Paredes de Blindagem, da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).

	Agregado Miúdo		Agregado Graúdo		
	Pó de hematita	Granalha de aço fina	Hematita I	Hematita II	Granalha de aço grossa
Massa específica (kg m <sup>-3</sup> ) (NBR-9937 da ABNT)	5.120	7.030	5.000	4.980	7.580
Dimensão máxima característica (mm) (NBR-7211 da ABNT)	9,5	1,2	19,0	32,0	9,5
Módulo de finura (NBR-7211 da ABNT)	1,84	2,18	6,74	7,38	5,49

### 3.3.3.2 Traços de concreto

Em função dos estudos de dosagem realizados em Laboratório, individualizou-se um traço de concreto (Traço 1) procurando atender à exigência de massa específica mínima de 4.000 kg m<sup>-3</sup>, e um outro (Traço 2), para a massa específica  $\geq$  de 4.200 kg m<sup>-3</sup>.

- **Traço 1:** 1,00 : 2,58 : 2,02 : 5,44 : 1,94 (cimento : pó de hematita : granalha fina de aço : hematita I : granalha grossa de aço), com relação água:cimento 0,72, massa específica  $4.173 \text{ kg m}^{-3}$  e consumo de cimento de  $298 \text{ kg m}^{-3}$ . A consistência medida pelo abatimento do tronco de cone ficou situada entre 40mm e 70mm.
- **Traço 2:** 1,00 : 2,11 : 3,54 : 3,06 : 3,06 : 1,82 (cimento : pó de hematita : granalha fina de aço : hematita I : hematita II : granalha grossa de aço), com relação água/cimento 0,71, massa específica  $4.250 \text{ kg m}^{-3}$  e consumo de cimento de  $280 \text{ kg m}^{-3}$ . A consistência medida pelo abatimento do tronco de cone ficou situada entre 40mm e 70mm.

Neste trabalho as paredes resultantes não apresentaram qualquer tipo de fissura e o valor estimado da resistência à compressão e os obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores estimados e Resultados Obtidos no Projeto das Paredes de Blindagem da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).

Resistência à Compressão	Traço 1 (massa específica $\geq 4.000 \text{ kg m}^{-3}$ )	Traço 2 (massa específica $\geq 4.200 \text{ kg m}^{-3}$ )
Valor estimado (MPa)	24,0	28,9
Valor obtido (MPa)	32,7	41,3
Desvio (MPa)	5,3	6,0
Coeficiente de variação (%)	12	14,5

Sendo que a estrutura foi calculada com resistência à compressão de 20,0 MPa.

Os valores das massas específicas dos concretos no estado fresco e no estado endurecido estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Massas Específicas (no estado fresco e no estado endurecido) Obtidas no Projeto das Paredes de Blindagem da Casa de Saúde Santa Marcelina (DANTAS et al. 1998).

	Traço 1 (massa específica $\geq 4.000 \text{ kg m}^{-3}$ )		Traço 2 (massa específica $\geq 4.200 \text{ kg m}^{-3}$ )	
	estado fresco	estado endurecido	estado fresco	estado endurecido
Massa Específica ( $\text{kg m}^{-3}$ )	4.164	4.014	4.365	4.276
Desvio ( $\text{kg m}^{-3}$ )	47	65	49	64
Coefficiente de Variação (%)	1,14	1,62	1,13	1,51

Conclui-se por este trabalho que a execução de concretos pesados possui tecnologia conhecida, apenas necessitando dos agregados corretos.

### 3.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

Os mecanismos de interação dos fótons com a matéria são independentes de sua origem, sendo função apenas de sua energia. Neste texto o termo raio gama será considerado sinônimo de qualquer tipo de radiação eletromagnética (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - IPEN/CNEN-SP, 1986).

Na interação de partículas carregadas com a matéria, a energia é perdida em consequência de um grande número de colisões, a maioria das quais com elétrons orbitais. Este processo de passos múltiplos não acontece na interação dos raios gama com a matéria. Em princípio, os fótons são absorvidos ou desviados de sua trajetória original por meio de uma única interação.

Outra diferença notável entre a interação dos raios gama e das partículas carregadas com a matéria consiste na quantidade de ionização primária que eles produzem. Quando um fóton produz uma ionização, isto acontece em uma única vez, arrancando um elétron de um átomo por diversos processos. Este elétron liberado, chamado elétron secundário pode possuir quase tanta energia quanto um fóton inicial e, por sua vez, produzirá novas ionizações até consumir toda a sua energia. Por exemplo, um elétron de 1 MeV pode produzir aproximadamente 30.000 pares de íons antes de ficar em repouso. Em outras palavras, pode-se considerar que a ionização da matéria quando atravessada por fótons é consequência dos elétrons secundários, já que cada fóton em princípio produz pouca, ou às vezes, só uma ionização.

#### **3.4.1 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR**

Ao se propagar através da matéria, um feixe de raios gama sofre uma redução de sua intensidade, este processo chama-se de atenuação. Colocando absorvedores de uma certa espessura entre uma fonte de raios gama e um sistema detetor de radiação (Figura 2) e, variando o número destes absorvedores, teremos uma série de valores, cujas leituras obtidas estarão relacionadas com o número de absorvedores.

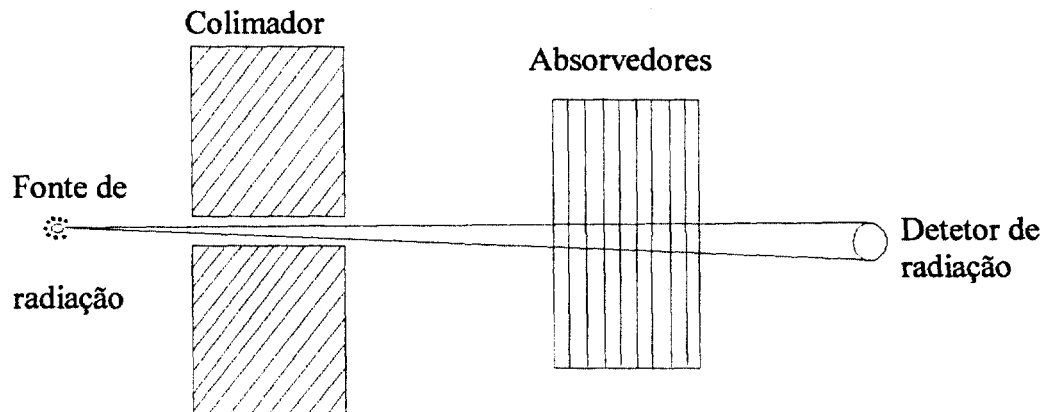


Figura 2: Esquematização da colocação de absorvedores entre a fonte de radiação e o detetor (IPEN/CNEN-SP, 1986).

Se levarmos estes valores a um sistema cartesiano ortogonal, a curva obtida será uma exponencial (Figura 3) e, se analisarmos bem, notaremos que a redução fracional da intensidade do feixe, por unidade de absorvedor é constante. Obviamente estes absorvedores são todos do mesmo material e de mesma espessura.

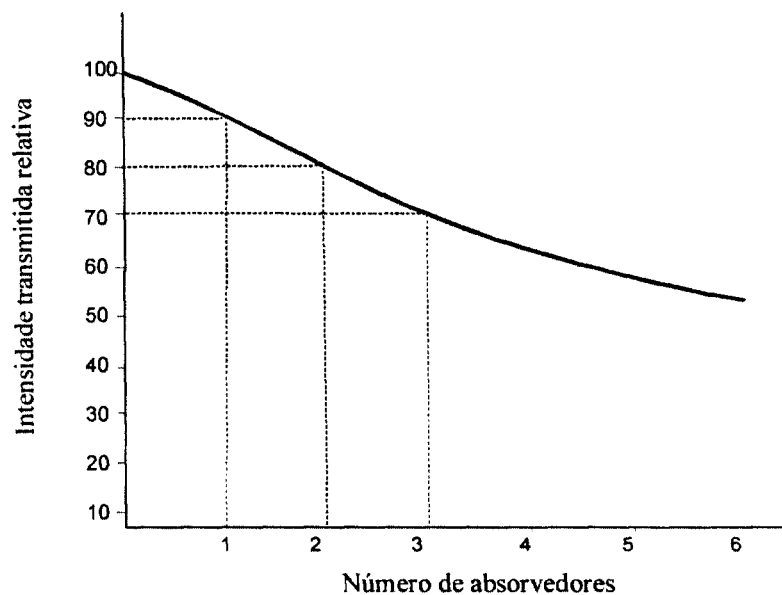


Figura 3: Absorção exponencial da radiação (IPEN/CNEN-SP, 1986).

O que se pretende mostrar é que, se um absorvedor reduz a intensidade de um feixe de radiação em 10%, um segundo absorvedor igual, reduzirá 10% do feixe já reduzido em 10% e assim sucessivamente, portanto teremos :

- sem absorvedor → intensidade transmitida relativa = 100%
- 1 absorvedor → intensidade transmitida relativa = 90%
- 2 absorvedores → intensidade transmitida relativa = 81%
- 3 absorvedores → intensidade transmitida relativa = 72%

Esta constante é chamada "coeficiente de atenuação linear" ou "coeficiente total de atenuação" e é a redução fracional por unidade de espessura do material absorvedor.

Tal coeficiente é representado pela letra grega " $\mu$ " sendo dado em  $\text{cm}^{-1}$ . Fisicamente,  $\mu$  representa a probabilidade de um fóton ser removido do feixe.

Exemplificando, se  $\mu = 0,03 \text{ cm}^{-1}$ , significa que teremos 3% de probabilidade por centímetro do fóton ser removido do feixe. Para cada energia do feixe de radiação e para cada material absorvedor, teremos um coeficiente de atenuação específico.

Uma espessura  $dx$  reduz a intensidade de um feixe de uma quantidade  $dI$ , proporcional à intensidade " $I$ ", à espessura  $dx$ , ao material absorvedor ( $Z$ ) e à energia do feixe ( $E_x$ ). Logo, podemos escrever:

Equação 1

$$dI = - I dx \mu (Z, E_x)$$

Mas, a dependência com o material e com a energia do feixe é traduzida pelo coeficiente de atenuação linear " $\mu$ ", e o sinal negativo representa o decréscimo da intensidade do feixe com o aumento da espessura. Logo:

## Equação 2

$$dI = -\mu I dx \Rightarrow dI / I = -\mu dx$$

Lembrando que para:  $x = 0$  implica que  $I = I_0$ , integrando temos:

## Equação 3

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Que é a formula de atenuação de um feixe de radiação (IPEN/CNEN-SP, 1986).

## 3.4.2 PRINCIPAIS EFEITOS DE INTERAÇÃO

Os três tipos de interação que os fótons sofrem com a matéria são:

- > efeito fotoelétrico;
- > efeito Compton;
- > produção de pares.

Esses três efeitos ocorrem simultaneamente.

**O efeito fotoelétrico**

Neste fenômeno, o fóton interage com o átomo e desaparece totalmente, resultando desta interação, a expulsão de um elétron, geralmente da camada K do átomo (Figura 4). Este acontecimento é chamado de efeito fotoelétrico ou "absorção fotoelétrica". Como este processo envolve elétrons ligados, ele vai depender do número atômico "Z" do material absorvedor. O coeficiente total de absorção é representado pela letra grega  $\tau$  e é diretamente proporcional a "Z<sup>3</sup>" e inversamente proporcional a "E<sup>3</sup>".

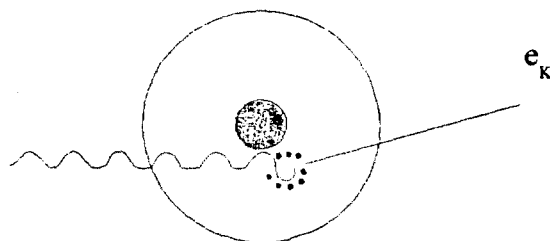


Figura 4: Esquemática do efeito fotoelétrico (IPEN/CNEN-SP, 1986).

### O efeito Compton

O físico Arthur Compton, estudando o espalhamento elástico (Figura 5), certa vez notou uma diferença de energia entre o fóton incidente e o espalhado. Para explicá-la, atribuiu esta diferença de energia à liberação de um elétron orbital do átomo (Figura 6). Como esta colisão existe entre fótons e elétrons orbitais, a probabilidade deste choque acontecer vai depender da quantidade de elétrons por grama de material, da densidade eletrônica do meio onde se propagam os fótons.

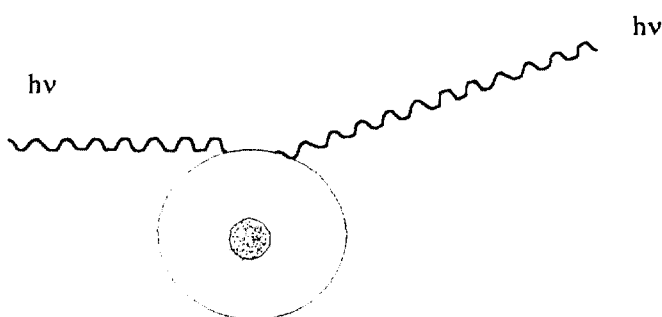


Figura 5: Espalhamento coerente (elástico) (IPEN/CNEN-SP, 1986).

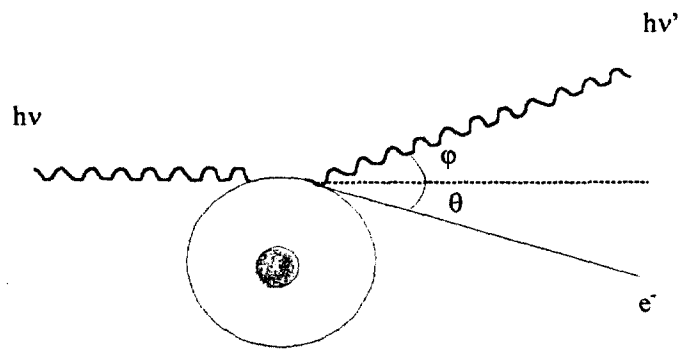


Figura 6: Espalhamento incoerente (inelástico) (IPEN/CNEN-SP, 1986).

Como resultado da colisão Compton, a energia inicial do fóton é repartida entre o fóton espalhado e o elétron ejetado. Esta divisão pode ser representada pela Equação 4:

Equação 4

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_K$$

onde, "σ" representa o coeficiente de atenuação total pela colisão Compton e sendo "σ<sub>s</sub>" o coeficiente de espalhamento e "σ<sub>K</sub>" o coeficiente de transferência de energia.

### Produção de pares

Quando um fóton com energia superior a 1,022 MeV interage nas vizinhanças do núcleo de um átomo, ele pode desaparecer e em seu lugar surgir um par de elétrons, sendo um negativo e outro positivo (Figura 7). Este processo é um excelente exemplo de conversão de energia em matéria. De acordo com a equação de Einstein, ( $E=mc^2$ ) a energia equivalente à massa do elétron em repouso é 0,511 MeV e como duas partículas são formadas, a energia mínima do fóton para o acontecimento desse fenômeno será de 1,022 MeV.

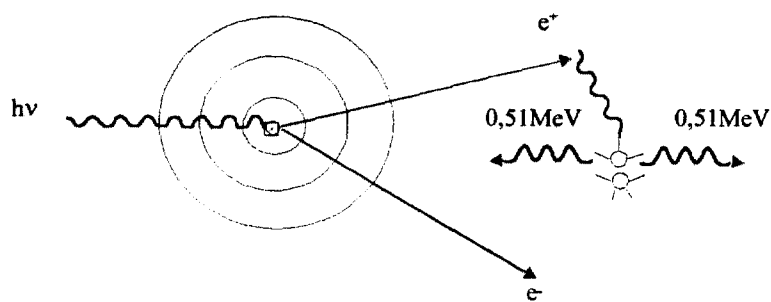


Figura 7: Esquematização do efeito de produção de pares (IPEN/CNEN-SP, 1986).

Tanto o elétron quanto o pósitron (elétron positivo) perdem sua energia cinética no meio, e quando o pósitron praticamente não apresentar mais energia, aniquilar-se-á com um elétron livre qualquer no meio originando duas radiações eletromagnéticas em sentidos opostos e de 0,511 MeV cada uma.

Como esse fenômeno ocorre no campo nuclear ele vai depender do número atômico "Z" do material absorvedor. O coeficiente total para produção de pares é representado pela letra grega " $\pi$ " e é diretamente proporcional à energia do fóton incidente.

### 3.4.3 COEFICIENTES TOTAIS DE ATENUAÇÃO E ABSORÇÃO

A atenuação total de um feixe de raios X ou  $\gamma$  será as somas das atenuações causadas por cada um dos processos já estudados.

Equação 5

$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

Onde " $\mu$ " é o símbolo do coeficiente de atenuação total e tem dimensão de  $\text{cm}^{-1}$  (IPEN/CNEN-SP, 1986).

### 3.4.4 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA

O uso do coeficiente linear de atenuação é limitado pelo fato de que varia conforme a densidade do absorvedor, mesmo quando o material absorvedor não muda. Devido a isto o *coeficiente de atenuação de massa* normalmente é mais utilizado e é definido como (KNOLL, 1989):

$$\text{Coeficiente de atenuação de massa} = \mu / \rho$$

onde "ρ" representa a densidade do meio.

Este coeficiente é independente da densidade do absorvedor e tem unidade medida em  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ .

Em termos do coeficiente de atenuação de massa, a formula de atenuação de um feixe de radiação pode ser escrita como:

Equação 6

$$I = I_0 e^{-(\mu / \rho) \rho x}$$

O produto "ρx", conhecido como *espessura de massa* do absorvedor, é um parâmetro significativo para determinar o grau de atenuação de um material. A unidade da espessura de massa é historicamente dada em  $\text{g.cm}^{-2}$ . A espessura dos absorvedores utilizados em medidas de radiação é freqüentemente medida em espessura de massa ao contrário de espessura física, devido a ser uma quantidade física mais fundamental (IPEN/CNEN-SP, 1986).

### 3.5 COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Compor uma argamassa ou um concreto a partir da dosagem racional dos diversos componentes remonta ao trabalho pioneiro de Willian Füller (FÜLLER & THOMPSON, 1907), que determinou o perfil ideal de uma curva para obter a máxima compacidade do concreto, englobando nessa curva o aglomerante e o agregado.

Atualmente, no Brasil, a dosagem de concretos e argamassas é feita com base em traços descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais. Para argamassas de revestimento adotam-se, com freqüência, traços de dosagem: 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia) em volume, numa proporção aglomerante:agregado de 1:3. Na prática, no entanto, identifica-se a utilização de traços mais pobres, como 1:6 a 1:9, não dando qualidade ao revestimento e afetando sua durabilidade (CARNEIRO, 1999).

Uma argamassa é composta pela fração ativa (aglomerante) geralmente cimento e cal hidratada, e pela fração inerte (agregado) a areia. O cimento é o responsável pela resistência mecânica e a cal pela capacidade de deformação da argamassa. A areia não participa das reações químicas mas sua composição granulométrica e o formato dos seus grãos interferem:

- No estado fresco: trabalhabilidade e retenção de água;
- No estado endurecido: resistência mecânica, capacidade de deformação e permeabilidade.

CARNEIRO (1999), utilizou a equação matemática, desenvolvida por FURNAS (1931, apud CARNEIRO, 1999) com base nos estudos de FÜLLER & THOMPSON (1907), para gerar curvas de distribuição granulométrica contínua e obter argamassas de máxima compacidade.

A equação que melhor representa uma distribuição granulométrica contínua é a equação do termo geral do somatório de uma progressão geométrica. Neste modelo matemático utiliza-se a idéia que a máxima compacidade é obtida pelo preenchimento de vazios, entre camadas sucessivas, pelas partículas menores da camada sobre a qual esta está assentada, ou seja, os vazios da primeira camada são preenchidos pelas partículas da segunda camada, e assim sucessivamente, sem alteração no volume.

Equação 7:

$$A = 100(1 - Pr) / (1 - Pr^n)$$

Onde:

A: corresponde à quantidade de material retido na peneira de abertura máxima, logo abaixo da peneira de abertura máxima característica;

Pr: é a razão entre as quantidades em massa retidas em cada peneira (nunca podendo ser igual a 1);

n: é número de peneira da série.

Assim os próximos termos da série geométrica são obtidos utilizando a Equação 8:

Equação 8:

$$A_{n+1} = A_n \times Pr \quad \text{com } Pr < 1$$

Em seu trabalho CARNEIRO (1999), compôs 5 grupos de argamassas utilizando a série de peneiras normal (ABNT-NBR-5734, 1989), cuja razão de abertura das malhas é 1,19, sendo 21 peneiras correspondentes aos agregados; e a série de peneiras principal (ABNT-NBR-5734, 1989) cuja razão de abertura de malhas é 1,41, sendo 11 as peneiras correspondentes aos agregados.

Nesses grupos variou-se o valor da razão de porcentagens retidas (Pr) entre as peneiras sucessivas, de modo a atender o objetivo de uma distribuição granulométrica contínua. Foi fixado como diâmetro máximo característico para o agregado 2,4mm, que representa uma areia de tamanho médio empregada em argamassas, e o diâmetro de 0,075mm foi considerado como limite entre a fração ativa e a inerte nas argamassas produzidas. Utilizou-se cimento e cal como aglomerantes e adotou-se a consistência de  $265 \pm 15$ mm.

Utilizando como princípio o trabalho desenvolvido por CARNEIRO (1999), neste trabalho utilizou-se a série principal, cuja abertura das malhas é 1,41 e o valor de razão de porcentagens retidas (Pr) equivalente à 0,95. Utilizou-se apenas o cimento como aglomerante resultando num traço em massa de 1:2,48 (cimento:agregado). A Tabela 8 apresenta a distribuição granulométrica do agregado utilizado neste trabalho e a Figura 8 apresenta o formato da curva de distribuição granulométrica.

Tabela 8: Distribuição granulométrica do agregado.

Peneira (mm)	% retida
2,4	0,0
1,7	10,82
1,18	9,77
0,85	8,82
0,6	7,96
0,425	7,18
0,3	6,48
0,212	5,85
0,15	5,28
0,106	4,76
0,075	4,31
Fundo	0,0

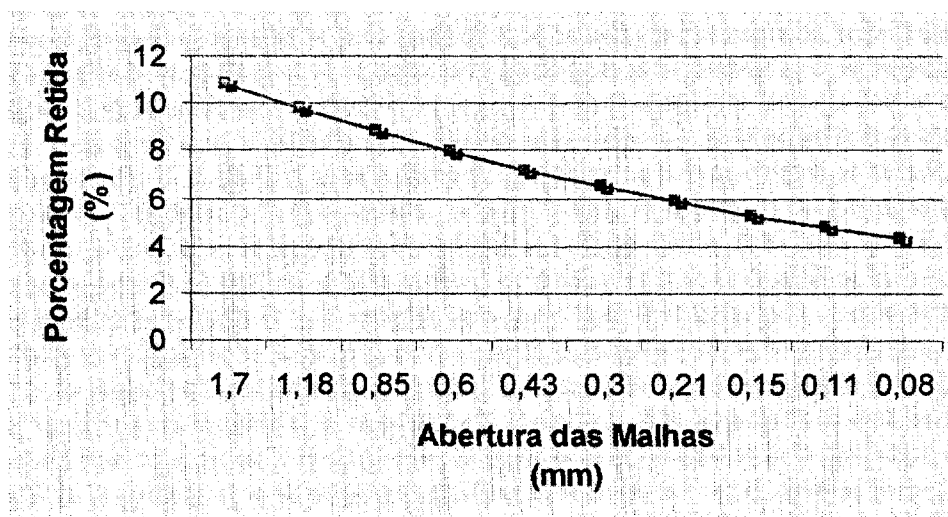


Figura 8: Distribuição granulométrica do agregado.

## **4 PARTE EXPERIMENTAL**

Visando estudar a influência da adição de lama de aciaria em concretos e argamassas de modo a aumentar a média de reciclagem deste tipo de resíduo e contribuir para a conservação do meio ambiente, os estudos experimentais foram divididos em etapas distintas:

### **4.1 Caracterização do resíduo:**

4.1.1 Descrição do resíduo;

4.1.2 Caracterização física e química do resíduo.

### **4.2 Formulação de concretos com adição de resíduo para estudos da blindagem de radiação:**

4.2.1 Produção dos corpos-de-prova de concreto com substituição de areia pelo resíduo;

4.2.2 Caracterização física do concreto produzido utilizando os ensaios de resistência à compressão;

4.2.3 Irradiação dos corpos-de-prova com fonte gama e determinação do poder de atenuação.

### **4.3 Ensaio de pelotização do resíduo para produção de agregados graúdos:**

4.3.1 Produção das pelotas de resíduo com adição de cimento;

4.3.2 Caracterização física do material pelotizado.

### **4.4 Ensaio de composição de argamassas a partir de curva granulométrica:**

4.4.1 Separação granulométrica da areia e do resíduo para serem utilizados na composição da argamassa;

4.4.2 Preparação das argamassas e execução dos ensaios no estado fresco e endurecido;

- 4.4.3 Caracterização das argamassas utilizando-se o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- 4.4.4 Observação das argamassas em microscópio petrográfico;
- 4.4.5 Realização dos ensaios de lixiviação e solubilização nas argamassas;
- 4.4.6 Determinação de metais lixiviados e solubilizados das argamassas.

A seguir são descritos os equipamentos, os materiais e os métodos utilizados nas diversas etapas experimentais desenvolvidas neste trabalho.

## **4.1 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E REAGENTES**

### **a) Equipamentos**

- Agitador vertical contínuo;
- Balança analítica MARTE, modelo A-40 K;
- Balança para peso imerso AWA LABOR, modelo 34013;
- Batedeira planetária;
- Betoneira (adaptada para pelotização no laboratório da Escola Politécnica-USP);
- Detetor de NaI(Tl) tipo Poço;
- Espectrofotômetro de difração de raios - X, modelo RTNT, da RIGAKU Co.;
- Espectrofotômetro de fluorescência de raios - X, modelo RIX 3000, da RIGAKU Co.;
- Espectrômetro de emissão atômica com fonte de plasma induzido, modelo M 120, SPECTROFLAME;
- Estufa FANEN, modelo 315-9;
- Fonte radioativa de Cobalto-60 de 3,62 mCi de atividade;
- Granulômetro a Laser, modelo 1064, CILAS;
- Microscópio petrográfico, com luz transmitida, LEICA DMRX, com Analisador de imagens LEICA Q 500 IW e Câmara digital JVC TK-C 1380 ;
- Misturador rotativo (adaptado no laboratório da Escola Politécnica/USP);
- Moedor manual;

- Moinho de bola, ASTECMA;
- Porosímetro de mercúrio MICROMERITICS, modelo Auto Pore III;
- Prensa INSTRON, modelo 556;
- Recipiente metálico paralelepipedal com volume de 1,004 L e 662 g;
- Separador granulométrico e jogo de peneiras de diferentes aberturas;

#### **b) Materiais e Reagentes**

- Ácido acético grau analítico: 0,5N;
- Agregado graúdo granítico – brita tipo 1;
- Areia quartzosa, doada pela Associação Brasileira de Cimento Portland;
- Cimento Portland CPII-E32, doado pela Engemix;
- Cimento Portland CPI-S, doado pela Companhia de Cimento Itambé;
- Cimento Portland CPV-ARI PLUS-RS/MS, doado pela Engemix;
- Hematita, doado pela Engemix;
- Lama de aciaria seca - Resíduo da Siderúrgica COSIPA.
- Tijolos de chumbo de 50mm de espessura;

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

### 4.2.1 DESCRIÇÃO DO RESÍDUO UTILIZADO

Segundo LENZ et al. (2000) em uma usina integrada brasileira, cada tonelada de aço (produto acabado) gera, aproximadamente, 200kg de resíduos sólidos ricos em ferro (25 a 85% em massa), ou seja, levando-se em conta o parque siderúrgico nacional, temos aproximadamente  $3 \times 10^6$  toneladas anuais.

Em geral, os resíduos sólidos, ricos em ferro, apresentam-se nas seguintes classes/formas e porcentagens (em massa):

- Pós 10%;
- Finos 50%;
- Lamas 20%;
- Carepas 20%.

Atualmente tais resíduos recebem a seguinte destinação:

- Aproximadamente 6% das lamas são comercializadas e 14% destinadas às áreas de acumulação;
- Pós, finos e carepas retornam à sinterização.

O resíduo utilizado neste trabalho é uma lama de aciaria proveniente da COSIPA, localizada no município de Cubatão.

Este resíduo é produzido no setor de aciaria, na etapa de produção do aço, aonde o ferro gusa é oxidado através da injeção de ar comprimido sob pressão. A etapa de injeção de ar comprimido tem como produto o aço e, como subproduto, são gerados sólidos em suspensão, que são removidos do ambiente utilizando-se um sistema de filtros manga. A lama de aciaria é produzida na etapa de lavagem

dos filtros. Essa lama é bombeada para espessadores, filtrada em filtros prensa e transportada por esteira para ser carregada por caminhões para uma área de deposição, a 4 km de distância da unidade de geração. O resíduo, originalmente coletado no ar, apresenta granulometria fina e é constituído predominantemente de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (ou  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro III (magnetita).

Aproximadamente 500 kg do resíduo seco foram coletados na área de deposição da siderúrgica, embalados em tambores de 200 L, e enviados ao IPEN onde receberam tratamento adequado para armazenamento e utilização.

#### **4.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO RESÍDUO**

A caracterização física e química constitui uma etapa fundamental para o estudo de qualquer material. Neste item, são apresentados resumidamente os princípios fundamentais das técnicas e/ou procedimentos empregados neste trabalho, associados às observações referentes ao resíduo estudado.

Inicialmente, o resíduo utilizado neste trabalho foi seco em estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , por um período de 3 horas, até o peso ficar constante e, em seguida, as amostras foram caracterizadas com relação à sua composição química e identificação mineralógica pelas técnicas de difração de raios X e fluorescência de raios X.

O resíduo, desagregado manualmente, foi então caracterizado quanto à sua granulometria, utilizando-se duas técnicas de análise granulométrica: separação granulométrica mecânica (utilizando peneiras série ABNT) e, por granulometria a laser.

A seguir são descritos os procedimentos analíticos utilizados para cada ensaio de caracterização física e química do resíduo.

#### **4.2.2.1 Fluorescência de Raios X**

Com o intuito de se avaliar a composição química do resíduo estudado, foi realizado uma análise quantitativa de elementos utilizando-se a técnica de fluorescência de raios X.

O princípio da técnica baseia-se na medida das intensidades fluorescentes características dos elementos químicos, produzidas por uma fonte de radiação controlada que age como fonte de excitação externa. Essas radiações características são típicas para cada elemento químico e envolvem transições eletrônicas dos elétrons das camadas mais internas.

A espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada por dispersão de comprimento de onda. A determinação foi quantitativa pelo método de parâmetros fundamentais, a qual não utiliza padrões mas apenas as curvas de sensibilidade do equipamento. Foi utilizado um tubo de raios X com ânodo de Ródio (Rh) excitado com 50kV e 50 mA.

#### **4.2.2.2 Difração de Raios X**

A técnica de difração de raios X pode ser definida como um fenômeno de espalhamento de radiação eletromagnética por um arranjo cristalino de átomos cujo espaçamento é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação incidente. O difratograma de uma substância cristalina permite, por comparação com um banco de dados conhecido, identificar qualitativamente a fase cristalina da amostra (FANCIO, 1999).

As amostras a serem analisadas por difração de raios X podem estar na forma de monocristais ou policristais. As amostras policristalinas são utilizadas na técnica conhecida como método do pó, onde se utiliza um pó fino constituído por

cristalitos orientados aleatoriamente. A incidência de um feixe de radiação monocromática na amostra irá produzir um padrão de círculos concêntricos.

A geometria mais utilizada para os difratômetros é a de Bragg-Brentano, onde um feixe de radiação monocromática incide em uma amostra na forma de pó compactado, rotacionada em um ângulo  $\theta$ , enquanto os dados são coletados por um detetor que se move em  $2\theta$ .

O padrão de difração obtido por contagens de um detetor é um gráfico da intensidade, medida em contagens por segundo, em função da posição angular. A posição angular do feixe difratado depende dos espaçamentos entre os planos de átomos na amostra e do comprimento de onda da radiação. A posição das linhas de difração contém dados para identificação de fases, determinação do parâmetro de célula, mudanças de fase (polimorfismo) e os valores da distância interplanar ( $d$ ) (CULLITY, 1967).

#### **4.2.2.3 Composição Granulométrica por Peneiras e Granulometria a Laser**

A composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras (série ABNT).

A determinação do tamanho médio de partículas na faixa de  $0,1\mu\text{m}$  a  $500\mu\text{m}$  foi feita por espalhamento laser. A luz coerente de um laser de baixa potência, emitindo em um comprimento de onda de  $830\text{nm}$ , atravessa a célula contendo uma amostra do pó a ser analisado, em suspensão em um líquido apropriado; como resultado, o feixe de luz é difratado. A distribuição da energia da luz na figura de difração depende do tamanho das partículas; quanto menor a partícula maior o ângulo de difração. A dispersão dos pós foi feita em água destilada utilizando  $0,05\%$  de hexametnofosfato de sódio utilizando ultra-som (FRANÇA, 1999).

#### **4.2.3 FORMULAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PARA ESTUDOS DE BLINDAGEM DE RADIAÇÃO**

Com o intuito de conhecer o comportamento do resíduo em estudo em matriz de concreto bem como, determinar alguns parâmetros importantes como coeficiente de atenuação da radiação, foram produzidos corpos-de-prova contendo diferentes proporções de resíduo em substituição à areia, utilizando dois tipos de cimento: o cimento CII-E-32 e o Cimento CPV-ARI-PLUS. Em ambas as formulações mantiveram-se constantes o traço em massa dos materiais e a relação água:cimento.

Optou-se pelo cimento CII-E-32 por este ser o mais encontrado na região sudeste do Brasil. O cimento CII-E é um cimento Portland composto com adição de 6 a 34%, em massa, de escória granulada de alto-forno. Este cimento é o mais fabricado no Estado de São Paulo, devido à facilidade de obtenção de escória proveniente de siderúrgicas. O cimento CII-E-32 alcança no mínimo 32 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura.

Utilizou-se também o cimento CPV-ARI-PLUS por ser um cimento especial graças à propriedade de alcançar alta resistência nas primeiras idades. Este cimento é obtido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira mais rapidamente elevada resistência. O cimento CPV-ARI-PLUS utilizado possuía adição de sílica ativa, resistente a sulfatos e resistência mecânica de no mínimo 40 MPa aos 28 dias de cura.

A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam, respectivamente, as composições químicas e as características físicas dos cimentos CII-E-32 e CPV-ARI-PLUS.

Tabela 9: Resultados da análise química dos cimentos CPII-E-32 e CPV-ARI-PLUS (HOLDERCIM, 1999).

Determinações	CPII-E-32 (%)	CPV-ARI-PLUS (%)
Perda ao fogo	5,06	2,66
Resíduo insolúvel	0,42	0,0
SiO <sub>2</sub>	21,35	19,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	4,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,78	3,94
CaO	59,55	63,64
MgO	1,81	0,83
SO <sub>3</sub>	1,69	2,83
CO <sub>2</sub>	4,52	0,0
K <sub>2</sub> O	0,0	0,74

Tabela 10: Características físicas dos cimentos CPII-E-32 e CPV-ARI-PLUS (HOLDERCIM, 1999).

Ensaio	CPII-E-32	CPV-ARI-PLUS
Finura		
Resíduo #200 (%)	3,5	0,0
Resíduo #325 (%)	15,6	0,32
Tempo de fim de pega (minutos)	259	210
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	3.332	4.587

Para a produção dos corpos-de-prova de concreto, necessários para o estudo de imobilização de resíduo e de blindagem de radiação, contamos com a colaboração do Grupo HOLDERCIM que auxiliou na produção dos diversos tipos de concreto a serem pesquisados.

Foram encaminhados aos laboratórios do Centro Tecnológico do Grupo HOLDERCIM, em São Caetano do Sul, cerca de 250 Kg de resíduo. Foram produzidos e estudados 08 diferentes formulações de concreto. Foram utilizados dois tipos de cimento (cimento CII-E-32 e o cimento CPV-ARI-PLUS) e três diferentes composições para substituição da areia por resíduo. Corpos-de-prova de concreto isentos de resíduo também foram produzidos como material de referência para a realização dos testes.

#### **4.2.3.1 Produção dos corpos-de-prova de concreto pesado com substituição da areia pelo resíduo**

Foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos que depois de curados, por 28 dias, foram submetidos aos ensaios para a determinação da densidade, resistência à compressão e atenuação à radiação gama.

Os corpos cilíndricos, utilizados para o ensaio de resistência à compressão, possuíam as dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, e os corpos prismáticos, utilizados para os ensaios de densidade e poder de atenuação, 20cm de largura por 13cm de altura e 20cm de profundidade.

Para a confecção dos corpos-de-prova foram utilizados dois tipos de cimento: o cimento CII-E-32 e o cimento CPV-ARI-PLUS. Em ambas as formulações manteve-se constante o traço em massa dos materiais e a relação água:cimento. A substituição de areia por resíduo foi de 10, 20 e 30%.

O traço utilizado para o concreto sem resíduo foi 1:1,217:1,833 (cimento:areia:brita) e manteve-se constante a relação água:cimento em 0,4. Utilizou-se esse traço buscando um concreto com alta durabilidade, sabidamente obtido com relação água:cimento de 0,4, resultando nesse traço unitário em massa. Foi utilizado também o aditivo plastificante EUCOPLAST 802-P na proporção de 0,3% e o aditivo super-plastificante EUCOPLAST 1203-P na

proporção de 1%, sendo que essas porcentagens se referem a massa de cimento.

O aditivo plastificante permite a redução da quantidade de água necessária na mistura, melhorando com isso todas as propriedades do concreto e sua trabalhabilidade.

O aditivo super-plastificante proporciona a obtenção de concretos e argamassas auto-adensáveis e com alta fluidez e pode reduzir em até 25% a água de amassamento, resultando em maiores resistências e menor permeabilidade em concretos e argamassas.

#### **4.2.3.2 Caracterização física do concreto utilizando ensaios de resistência à compressão**

Com o objetivo de verificar se a adição de resíduo poderia comprometer a resistência mecânica do concreto produzido, os corpos-de-prova foram mantidos em cura úmida por 28 dias e, posteriormente executado o ensaio de resistência à compressão conforme norma "Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto" ABNT-NBR-5739 (1994). Esse ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova a uma carga perpendicular, em uma máquina de ensaio de compressão, contínua e sem choques, com velocidade de carregamento de  $0,3 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $0,8 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ , até que o corpo-de-prova se rompa. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da Holdercim e estão expressos em unidades de MPa.

#### **4.2.3.3 Irradiação dos corpos-de-prova com fonte gama e determinação do poder de atenuação**

Para a realização dos ensaios de blindagem foi utilizado um sistema de irradiação no laboratório do Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN. Os corpos-de-prova prismáticos foram colocados sobre o detetor de NaI(Tl), tipo poço, utilizando-se uma placa de aço como suporte e tijolos de 50mm de chumbo para atenuar o feixe de radiação e não saturar o detetor.

Como os ensaios foram executados de forma a medir o poder de atenuação dos corpos-de-prova prismáticos, primeiramente irradiou-se o sistema sem os corpos-de-prova e posteriormente, os corpos-de-prova foram posicionados atravessando a espessura (13cm) e utilizados os valores médios das medidas.

A fonte utilizada, em todos os ensaios, foi de Cobalto-60 com atividade aproximada de  $1,3394 \times 10^8$  Bq. Todos os cuidados quanto à proteção radiológica, visando impedir exposições excessivas ou indevidas, foram tomados.

O tempo utilizado para cada medida de atenuação foi de 10 minutos para cada corpo-de-prova. Foram realizadas 3 medidas. A média dos resultados obtida está apresentada no Capítulo 5.

A densidade dos corpos-de-prova foi calculada pesando-se os corpos-de-prova e dividindo pelo volume, obtido pela medida das dimensões de cada face.

### **4.3 ENSAIOS DE PELOTIZAÇÃO DO RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS**

Com o objetivo de estudar a viabilidade da adição deste resíduo em forma de pelotas, para sua utilização como agregado graúdo em formulações de concreto, foram produzidas pelotas do resíduo com a adição de cimento em duas proporções fixas.

A pelotização é um processo de granulação de pós, cuja finalidade é agregar, na forma esférica, um grande número de partículas com características desejáveis (SEO et al. 1993).

A técnica de pelotização é de grande importância na área de granulação de pós por propiciar maior contato entre as partículas e permitir a obtenção de pelotas com uniformidade dimensional, resistência mecânica e permitir, de forma econômica, o aproveitamento de pós ultra-finos.

A formação de pelotas ocorre durante o movimento de rotação do pelletizador, onde partículas umedecidas formam núcleos que, ao colidir com outras partículas envolvidas por um filme superficial de água e com partículas secas, crescem formando corpos esféricos até o tamanho desejado.

A uniformidade no tamanho e na forma das pelotas depende de vários fatores tais como, a forma das partículas, distribuição granulométrica dos pós, superfície específica, umidade, composição química da matéria prima, tipo de aglutinante, etc.. Além destes fatores, a pelotização desenvolve-se preferencialmente segundo dois mecanismos: ligações sólidas e forças interfaciais (pressão capilar) em sistemas sólido-líquido.

#### 4.3.1 PRODUÇÃO DAS PELOTAS DE RESÍDUO PELA ADIÇÃO DE CIMENTO

Primeiramente o resíduo foi seco em estufa a 105 ° C, por 3 horas, até não haver variação de massa. Após secagem do material este foi triturado em moinho de bolas (Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP) para uma maior homogeneidade granulométrica. Foi tratado um total de 30 kg de resíduo, divididos em bateladas de 5 kg.

Após esse processo o material foi misturado com cimento Portland CPV-ARI-PLUS, em duas proporções 7 e 10% , em massa de cimento. Esse cimento foi utilizado por obter alta resistência nas primeiras idades o que permitiria a utilização das pelotas mais rapidamente. A Tabela 11 apresenta as massas dos materiais utilizados.

Tabela 11: Composição da mistura a ser pelotizada.

Porcentagem de cimento na Mistura (%)	Massa Total (g)	Massa do Cimento (g)	Massa do resíduo (g)
7	4.000	280	3720
7	5.000	350	4650
10	5.000	500	4500

A mistura resíduo-cimento foi homogeneizada, em um misturador rotativo, por aproximadamente 24 horas. Os materiais foram então pelotizados, borrifando-se água, em uma betoneira adaptada para funcionar como disco pelotizador. Estes experimentos foram executados no Departamento de Metalurgia da Escola Politécnica da USP.

#### 4.3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL PELOTIZADO

A caracterização física do material pelletizado foi realizada utilizando-se ensaios de determinação de massa unitária, massa específica, absorção de água e carga de ruptura.

As pelotas obtidas no processo de pelletização foram classificadas, por peneiramento, utilizando-se as pelotas com diâmetro médio de 20mm. Após classificação, estas foram curadas, à temperatura e umidade ambiente, para posterior realização dos ensaios de caracterização física do material. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, e como critério de comparação, foram também executados ensaios com brita e hematita de diâmetro semelhante.

- **Determinação da Massa Unitária.** Os ensaios para a determinação da massa unitária foram executados segundo o procedimento descrito na norma "Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária" - ABNT-NBR – 7251 (1982). Esse ensaio consiste em preencher um recipiente paralelepipedal, sendo o agregado lançado de uma altura de 10 a 12cm do topo do recipiente. O agregado deve ser seco em estufa até não haver variação de massa e a amostra a ser ensaiada deve ter pelo menos o dobro do volume do recipiente. A massa unitária vem a ser o quociente da massa do agregado lançado pelo volume do recipiente, sendo expressa em  $\text{kg dm}^{-3}$ .

- **Determinação da Massa Específica.** Os ensaios para a determinação da massa específica na condição seca, da massa específica na condição saturada superfície seca e absorção de água foram executados segundo os procedimentos descritos na norma "Agregados - Determinação de Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo" - ABNT-NBR-9937 (1987). O agregado foi seco em estufa a temperatura de 105 a 110°C, até não haver variação de massa, e depois resfriado ao ar a temperatura ambiente entre 1 e 3 horas, registrando a massa do agregado na condição seca (A). Subseqüentemente o agregado foi imerso em água, a temperatura ambiente, por um período de 24 horas.

Após esse período a amostra foi removida da água e espalhada sobre um pano absorvente até a eliminação das películas visíveis de água. Determina-se a massa da amostra na condição saturada superfície seca, registrando-se o valor obtido (B). Imediatamente após, o material foi pesado no recipiente para a amostra imersa e o valor obtido registrado (C).

A massa específica na condição seca ( $\gamma_s$ ) foi determinada utilizando-se a Equação 9:

Equação 9:

$$\gamma_s = A / B - C$$

A massa específica na condição saturada superfície seca ( $\gamma_{sss}$ ) foi determinada utilizando-se a Equação 10:

Equação 10:

$$\gamma_{sss} = B / B - C$$

A absorção expressa em porcentagem (a), foi determinada utilizando-se Equação 11:

Equação 11:

$$a = B - A / A$$

Sendo:

A = massa do agregado, seco em g cm<sup>-3</sup>

B = massa do agregado na condição saturada superfície seca

C = leitura correspondente ao agregado imerso em água

**-Ensaio de Carga de Ruptura.** Os ensaios de carga de ruptura das pelotas foram executados, para diferentes tempos de cura (7 e 28 dias), em uma prensa hidráulica (INSTRON), utilizando a velocidade de deslocamento de  $1\text{mm min}^{-1}$ . Apenas como referência e comparação foram realizados ensaios com brita e hematita. Cabe salientar que não existe uma padronização para este ensaio sendo executado com o objetivo de avaliar a resistência mecânica das pelotas.

#### **4.4 ENSAIOS DE COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVA GRANULOMÉTRICA**

Para substituir a fração fina de uma areia na composição de uma argamassa foram separadas as frações granulométricas adequadas da areia e do resíduo.

A curva granulométrica teórica escolhida foi baseada no estudo executado por CARNEIRO (1999), por ter obtido as maiores resistências mecânicas. Neste estudo, entretanto, CARNEIRO (1999), compunha as argamassas utilizando proporções iguais de cimento e cal. Neste trabalho utilizaremos apenas o cimento como aglomerante.

O cimento utilizado na composição das argamassas foi o CPI-S, o mesmo utilizado por CARNEIRO (1999), cuja composição química e características físicas estão apresentados na Tabela 12 e na Tabela 13, respectivamente. Esse cimento foi utilizado por não possuir nenhuma adição que pudesse influir nos ensaios de lixiviação e solubilização de metais executados nas argamassas.

Tabela 12: Análise química do cimento Portland CPI-S (CARNEIRO, 1999).

Determinações	Resultado (%)
Perda ao fogo	4,36
Resíduo Insolúvel	0,43
SiO <sub>2</sub>	18,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37
CaO	62,5
MgO	3,20
SO <sub>3</sub>	3,16
Na <sub>2</sub> O	0,06
K <sub>2</sub> O	0,79
CO <sub>2</sub>	2,36
Cal livre	3,10
CaCO <sub>3</sub>	5,36

Tabela 13: Características físicas do cimento Portland, CPI-S (CARNEIRO, 1999).

Ensaio	Resultado
Massa específica (kg dm <sup>-3</sup> )	3,06
Massa unitária (kg dm <sup>-3</sup> )	0,925
Finura	
Resíduo #325 (%)	1,9
Resíduo #200 (%)	0,0
Tempo de pega (min)	190 a 315
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> . g <sup>-1</sup> )	3,460

#### **4.4.1 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA E DO RESÍDUO PARA A COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA.**

Nesta etapa foram realizadas as separações granulométricas da areia e do resíduo para serem utilizados na composição das argamassas conforme Tabela 8. Para a separação granulométrica da areia utilizou-se o separador granulométrico cedido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) juntamente com uma areia de rio lavada, quartzosa, também cedida pela ABCP.

O resíduo foi seco em estufa a 105°C, por 3 horas, até não haver variação de massa. O resíduo seco foi em seguida desagregado em um moedor manual utilizando a fração mais fina para a separação granulométrica. A fração mais grossa foi novamente desagregada para se obter uma quantidade razoável de material. A separação granulométrica foi efetuada nos laboratórios de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Para a execução dos ensaios de composição de argamassas foram utilizados aproximadamente 100 kg de areia e 30 kg de resíduo. Este material foi peneirado para a confecção de 6 argamassas de traço constante de 1:2,48 (cimento : agregado). Para confeccionar 4 formulações de agregado (substituição de 100%, 75%, 50% e branco) foram necessários 59,435 kg de agregado, sendo 52,672 kg de areia e 6,763 kg de resíduo.

Em termos de traço total da argamassa as substituições de 100%, 75% e 50% representaram a adição de 14,55%, 10,90% e 7,27% de resíduo em substituição à areia.

O resíduo substituiu a areia nas frações das peneiras de abertura: 0,125mm; 0,150mm e 0,075mm (ABNT # 100,#150 e #200), nas proporções de 100%, 75% e 50%. Foi produzida também uma argamassa de referência no qual não foi substituída a areia pelo resíduo. Na Tabela 14 e na Tabela 15 são apresentadas as frações granulométricas da areia e do resíduo, respectivamente, necessárias para composição do agregado.

Tabela 14: Composição granulométrica da areia para formulação das argamassas.

			Quantidade de areia em cada substituição de resíduo das diversas argamassas				
Peneira Série ABNT (#)	Peneira Abertura (mm)	% retida	Com 100% de resíduo (kg)	Com 75% de resíduo (kg)	Com 50% de resíduo (kg)	Sem resíduo (kg)	Total necessário (kg)
8	2,360	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,700	10,82	2,256	2,256	2,256	2,256	9,024
16	1,180	9,77	2,034	2,034	2,034	2,034	8,136
20	0,850	8,82	1,836	1,836	1,836	1,836	7,344
30	0,600	7,96	1,662	1,662	1,662	1,662	6,648
40	0,425	7,18	1,494	1,494	1,494	1,494	5,976
50	0,300	6,48	1,350	1,350	1,350	1,350	5,400
70	0,212	5,85	1,218	1,218	1,218	1,218	4,872
100	0,150	5,28	0,0	0,274	0,549	1,098	1,921
150	0,106	4,76	0,0	0,247	0,495	0,990	1,732
200	0,075	4,31	0,0	0,223	0,447	0,949	1,619
	Fundo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 15: Composição granulométrica do resíduo necessária para a formulação das argamassas.

			Quantidade de resíduo para completar a curva granulométrica das diversas argamassas				
Peneira Série ABNT (#)	Peneira Abertura (mm)	% retida	Com 100% de resíduo (kg)	Com 75% de resíduo (kg)	Com 50% de resíduo (kg)	Sem resíduo (kg)	Total necessário (kg)
100	0,150	5,28	1,098	0,823	0,549	0,0	2,470
150	0,106	4,76	0,990	0,742	0,495	0,0	2,227
200	0,075	4,31	0,949	0,670	0,447	0,0	2,066
	Fundo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

O resíduo e a areia foram misturados manualmente para se evitar a quebra das partículas e alterar a distribuição granulométrica.

#### 4.4.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.

As argamassas foram preparadas no Laboratório de Argamassas da ABCP segundo procedimento da norma "Cal Hidratada para Argamassas - Determinação da Retenção de Água" - ABNT-NBR-9290 (1986). Este procedimento consiste em colocar em uma bateadeira planetária uma quantidade de água inicial e o cimento e, posteriormente, adicionar o agregado sob agitação contínua. Após o tempo de 4 minutos é determinado o índice de consistência. Repetindo o procedimento com mais ou menos água até obter-se o índice de consistência desejado.

Seguindo o procedimento de CARNEIRO (1999), fixou-se o índice de consistência em  $265 \pm 15$  mm e a partir desse procedimento determinou-se a relação água:cimento, sendo esse procedimento repetido para cada traço de

argamassa. O índice de consistência consistiu na medida do espalhamento (diâmetro) de uma porção de argamassa inicialmente moldada em fôrma tronco-cônica sobre uma mesa de ensaio. A argamassa moldada é forçada a deformar-se mediante quedas padronizadas dessa mesa (30 golpes em 30 segundos). São medidos dois diâmetros ortogonais da base do tronco de cone da argamassa após a deformação, sendo a média aritmética dessas medidas o índice de consistência, expresso em milímetros.

A partir do conhecimento da relação água:cimento foi determinado a massa específica no estado fresco ( $W_a$ ) pelo método gravimético (CINCOTTO et al. 1995), que consiste em preencher em camadas um recipiente rígido de peso e volume conhecido e, entre uma e outra camada, compactar a argamassa com soquete de maneira a expulsar ao máximo as bolhas de ar aprisionado. O recipiente é então pesado e a divisão do peso da argamassa pelo volume do recipiente fornece a massa específica no estado fresco, expressa em  $g\ cm^{-3}$ .

A massa específica teórica ( $W_c$ ) é determinada pela Equação 12., e expressa em  $g\ cm^{-3}$ :

Equação 12:

$$W_c = \frac{M_c + M_g + M_a}{(M_c / d_c) + (M_g / d_g) + (M_a / d_a)}$$

Onde:

$M_c$ = massa do cimento utilizado (g);

$M_g$ = massa do agregado utilizado (g);

$M_a$ = massa da água utilizada (g);

$d_c$ = massa específica do cimento ( $g\ cm^{-3}$ );

$d_g$ = massa específica do agregado ( $g\ cm^{-3}$ );

$d_a$ = massa específica da água ( $g\ cm^{-3}$ ).

O teor de ar incorporado (AR) é determinado pela Equação 13, e expresso em porcentagem:

Equação 13:

$$AR = 100 \times [ 1 - (W_a/W_c) ]$$

Onde:

( $W_a$ ) = massa específica no estado fresco ( $\text{g cm}^{-3}$ );

( $W_c$ ) = massa específica teórica ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Para o ensaio de determinação de retenção de água utilizou-se o teste descrito na norma "Cal Hidratada para Argamassas - Determinação da Retenção de Água" - ABNT-NBR 9290, (1986). Segundo CINCOTTO et al. (1995), a denominação deste método não é muito adequada, pois este na verdade avalia a retenção de consistência e não a retenção de água da argamassa, embora existam muitas semelhanças entre as duas determinações. O método consiste na determinação do índice de consistência antes e após uma porção de argamassa ser submetida a uma sucção correspondente a uma coluna de 51 mm de mercúrio durante 60 segundos, em um funil de Büchner modificado. O valor do índice de retenção de água (RA), em porcentagem, é calculado pela Equação 14.

Equação 14:

$$RA = [ (A - 125) / (B - 125) ] \times 100$$

Onde:

A = valor do espalhamento em mm, após ser aplicada a sucção;

B = valor do espalhamento em mm, antes de ser aplicada a sucção.

Foram moldados corpos-de-prova de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  e submetidos a cura úmida por 28 dias para os ensaios no estado endurecido. Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial foram executados segundo a norma NF EN 196-1 "Méthode d'essais de ciments - Détermination des Résistances Mécaniques", de maneira análoga ao executado por CARNEIRO (1999). O ensaio de resistência à tração na flexão foi executado com os corpos-de-prova apoiados sobre dois pontos e o carregamento vertical aplicado no centro, com velocidade de  $50 \pm 10 \text{ N s}^{-1}$  até a fratura, e os dados apresentados em MPa.

O ensaio de resistência à compressão foi executado na metade do prisma, resultante do ensaio à flexão, sob carregamento axial, com velocidade de  $2.400 \pm 200 \text{ N s}^{-1}$ , aplicado até a fratura do corpo, e os dados apresentados em MPa. Os resultados desses ensaios estão apresentados no capítulo 5.

Posteriormente os mesmos corpos-de-prova foram preservados em álcool isopropílico, com o intuito de frear a hidratação do cimento, para os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, observação no microscópio ótico e ensaios de lixiviação e solubilização.

#### **4.4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS UTILIZANDO-SE O ENSAIO DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO**

A determinação de tamanho de poros por penetração de mercúrio é baseada no comportamento de líquidos não molhantes em capilares. A capilaridade trata de geometrias de equilíbrio entre interfaces sólido - líquido e ângulos de contato entre o líquido e a parede de poros. Um líquido não pode entrar espontaneamente em um pequeno poro, se o ângulo de contato for maior do que  $90^\circ$ , devido à tensão superficial (depressão capilar). Entretanto, esta resistência pode ser vencida por aplicação de pressão. A pressão requerida é função do tamanho do poro.

Assim, é possível acompanhar a penetração de mercúrio, nos poros de uma amostra seca e que foi submetida a vácuo, relacionando a variação de nível de mercúrio em um tubo capilar com a pressão exercida para promover a penetração de mercúrio nos poros da amostra.

A partir do volume de mercúrio que penetrou na amostra, é possível determinar a porosidade da amostra, expressa pela razão: volume de vazios/volume total, onde o volume de vazios é tomado como o volume de mercúrio e o volume total são igual ao volume da amostra mais o volume de mercúrio (LOWELL & SHIELDS, 1984).

Os ensaios foram realizados no Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica-USP, utilizando o porosímetro de mercúrio da MICROMERITICS modelo Auto Pore III.

#### **4.4.4 OBSERVAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO NAS ARGAMASSAS POR MICROSCOPIA ÓTICA DE TRANSMISSÃO**

A partir dos corpos-de-prova foram produzidas lâminas petrográficas no laboratório de Petrografia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, da Universidade Estadual Paulista, campus de Rio Claro as quais foram caracterizadas no microscópio petrográfico, de luz polarizada transmitida, LEICA DMRX, com Analisador de imagens LEICA Q 500 IW e Câmara digital JVC TK-C 1380.

#### **4.4.5 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO NAS ARGAMASSAS**

Com o objetivo de verificar a fixação do resíduo nas argamassas, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de lixiviação e solubilização.

Cabe ressaltar que estes ensaios se aplicam na classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, segundo norma " Resíduos Sólidos - Classificação" ABNT-NBR-10004 (1987), e foram usados no presente trabalho como referência.

Esses ensaios são utilizados quando se pretende determinar o comportamento de uma substância em face dos fenômenos físicos-químicos que ocorrem durante uma percolação, e procura reproduzir em laboratório os fenômeno de arraste, de diluição e dessorção que ocorrem pela passagem da água através do resíduo quando disposto.

O ensaio de lixiviação seguiu a norma "Lixiviação de Resíduos Sólidos - Procedimento", ABNT-NBR 10.005 (1987), que consiste na utilização de uma solução de ácido acético 0,5 N como solução lixiviante. A matriz solidificada é inicialmente pulverizada e passada através de uma peneira nº 4 (4,76 mm), sendo separados 200g do material pulverizado, que serão posteriormente colocados em contato com 2 litros de água deionizada. O pH do meio é ajustado e mantido em cinco (5) por adição de ácido acético 0,5N; o total de ácido acético a 5% introduzido no meio não pode exceder  $4\text{ml g}^{-1}$  de resíduo. A solução é mantida em agitação constante durante 24 horas e submetida à filtração em filtro de 0,45 micron. O extrato lixivador finalmente é submetido a ensaios para a determinação dos teores dos contaminantes, objeto da pesquisa.

No ensaio de solubilização o procedimento deve seguir a norma "Solubilização de Resíduos Sólidos - Procedimento" ABNT-NBR 10.006 (1987), que consiste em colocar 250g do material pulverizado em contato com 1000ml de água deionizada agitando a mistura por 5 min e, posteriormente, deixá-la em repouso por um período de 7 dias. Após este período submeter a solução à filtração em filtro de 0,45 micron. O extrato solubilizado é submetido a ensaios para a determinação dos teores dos contaminantes.

#### 4.4.6 DETERMINAÇÃO DE METAIS LIXIVIADOS E SOLUBILIZADOS DAS ARGAMASSAS

Para determinação da concentração de metais nas soluções lixiviadas e solubilizadas utilizou-se um espectrofotômetro de emissão atômica com plasma de argônio induzido (ICP-AES).

Nesta determinação, a amostra em solução é nebulizada e dessolvatada indo na forma de vapores iônicos, os quais são excitados na forma de átomos-íons. O mecanismo de excitação é colisional, onde a tendência dos eletrons excitados é de voltarem ao estado fundamental e ao fazerem-no, devolvem a energia de emissão. Os comprimentos de onda são característicos de cada elemento e a intensidade da linha do espectro de emissão é proporcional à concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) do elemento em determinação (CHARLES & FREDEEN, 1997).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Visando o aproveitamento do resíduo em estudo, foram realizados diversos ensaios e observações do comportamento dos materiais produzidos pela adição da lama de aciaria em concreto e argamassa. Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nas diversas etapas nas quais o trabalho foi subdividido.

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA**

O conhecimento de algumas características do resíduo são de fundamental importância para definirmos quais as possibilidades de reciclagem do material.

#### **5.1.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X**

A avaliação da composição química da amostra foi realizada utilizando-se a técnica de Fluorescência de Raios X, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Composição da Lama de Aciaria utilizando-se a Técnica de Fluorescência de R-X.

Composição Química	Concentração (%)
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	84,5
$\text{CaO}$	5,51
$\text{SiO}_2$	2,99
$\text{MgO}$	2,66
$\text{MnO}$	1,69
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,78
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,47
$\text{SO}_3$	0,319
$\text{Na}_2\text{O}$	0,112
$\text{Cl}$	0,077
$\text{ZnO}$	0,075
$\text{K}_2\text{O}$	0,074
$\text{TiO}_2$	0,068
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,037
$\text{PbO}$	0,027
$\text{NiO}$	0,014
$\text{CuO}$	0,012
$\text{SrO}$	0,012

Na Figura 9 são apresentados os principais constituintes do resíduo estudado.

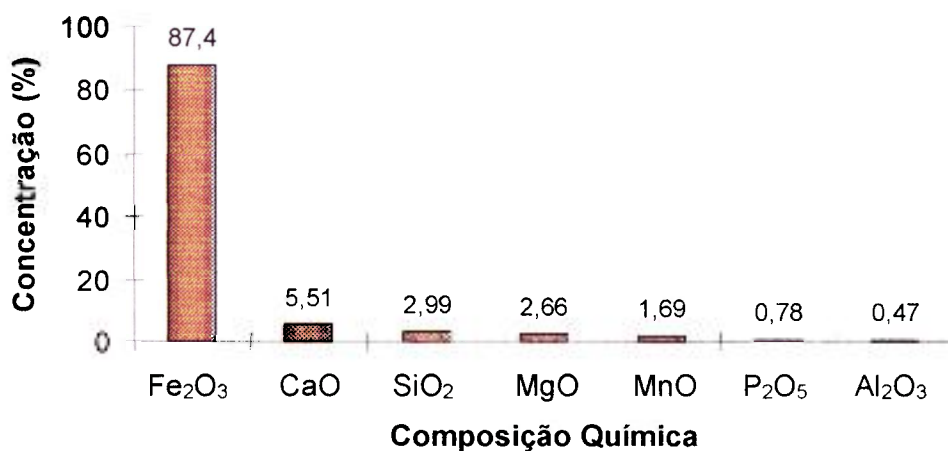


Figura 9: Composição percentual dos principais constituintes da lama de Aciaria.

Podemos observar que o principal constituinte na composição do resíduo é óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sendo que os outros constituintes presentes em menor quantidade são típicos da produção de aço ( CaO; SiO<sub>2</sub>; MgO; MnO).

### 5.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A identificação mineralógica qualitativa do resíduo foi realizada utilizando-se a técnica de Espectrometria de Difração de Raio X, cujo difratograma é apresentado na Figura 10.

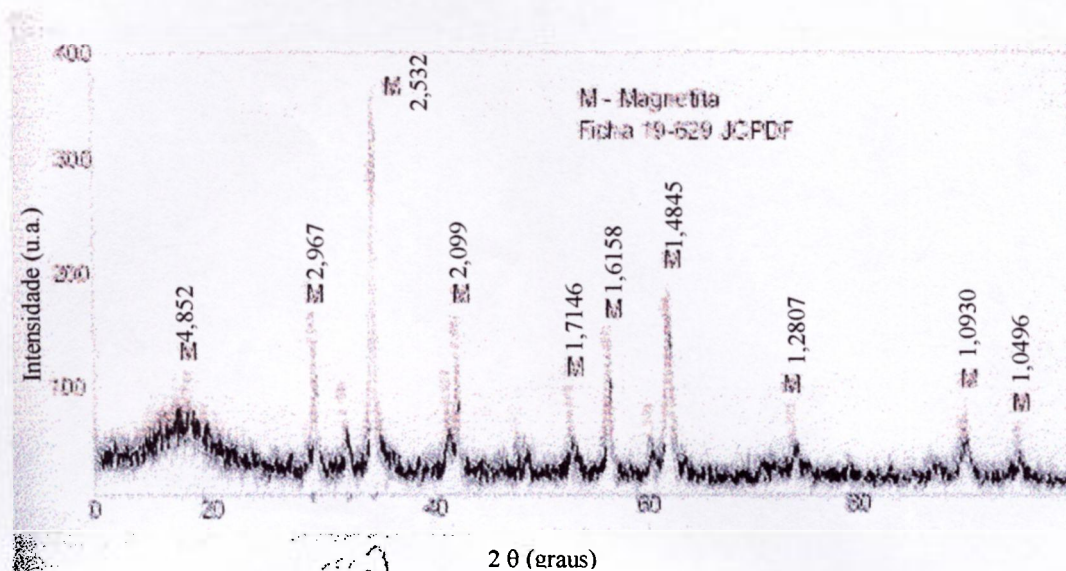


Figura 10: Difratoograma da lama de aciaria.

Os picos de maior intensidade estão de acordo com aqueles tabelados para a Magnetita (M) no catálogo do Joint Committee on Powder Diffraction Standards - JCPDS.

### 5.1.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E ÁREA ESPECÍFICA DO RESÍDUO

A determinação da área específica das partículas pode ser feita indiretamente por meio das medidas de variação de volume de um gás inerte, como o argônio e o nitrogênio, adsorvido em camada monomolecular na superfície da amostra. As medidas de área superficial e densidade do resíduo foram executadas pelo método "Multi Point BET Adsorption" e os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Medidas de área específica e densidade do resíduo.

Parâmetros	Resultados
Área Específica ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	55,01
Densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ )	5,2

#### 5.1.4 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO

O resultado da distribuição granulométrica do resíduo, obtida por peneiramento mecânico, utilizando-se a série de peneiras ABNT é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Distribuição granulométrica do resíduo por peneiramento.

Abertura (mm)	% retida
1,000	17,72
0,840	6,56
0,600	8,98
0,420	8,72
0,300	4,29
0,210	6,05
0,150	4,67
0,105	4,86
0,075	3,73
0,053	3,23
0,044	1,71
0,037	3,18
<0,037	26,28
Total final	100,00

O Figura 11 ilustra a distribuição granulométrica do resíduo onde observa-se que o resíduo, quando desagregado manualmente, possui cerca de 25% passante na peneira 0,037mm, indicando um material de granulometria muito fina.

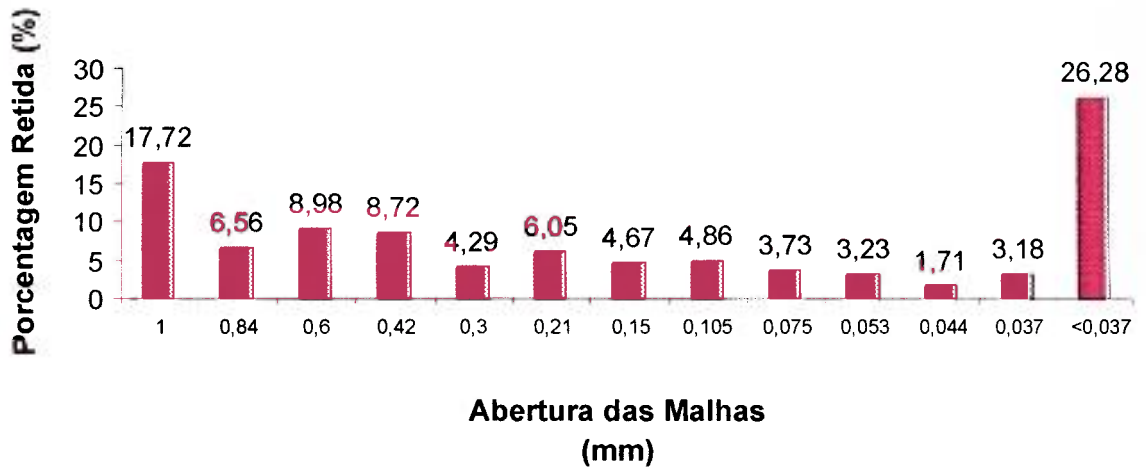


Figura 11: Composição granulométrica obtida por peneiramento.

Os resultados da Granulometria a Laser, para o resíduo moído, na Figura 12, apresentam o diâmetro das partículas como uma distribuição bi-modal, onde observa-se uma faixa extensa de 0,1 a 4  $\mu\text{m}$  e outra menor de 5 a 15  $\mu\text{m}$ , sendo que o diâmetro médio foi obtido da primeira faixa e igual a 0,92  $\mu\text{m}$ .

A diferença observada entre a Figura 11 e a Figura 12 deve-se ao fato de que o resíduo quando recolhido do local de armazenamento da COSIPA encontra-se agregado (em torrões), e quando submetido à desagregação manual possui esta distribuição granulométrica. Já quando o resíduo é submetido ao ensaio em granulômetro a laser este é desagregado em seu tamanho mais fundamental.

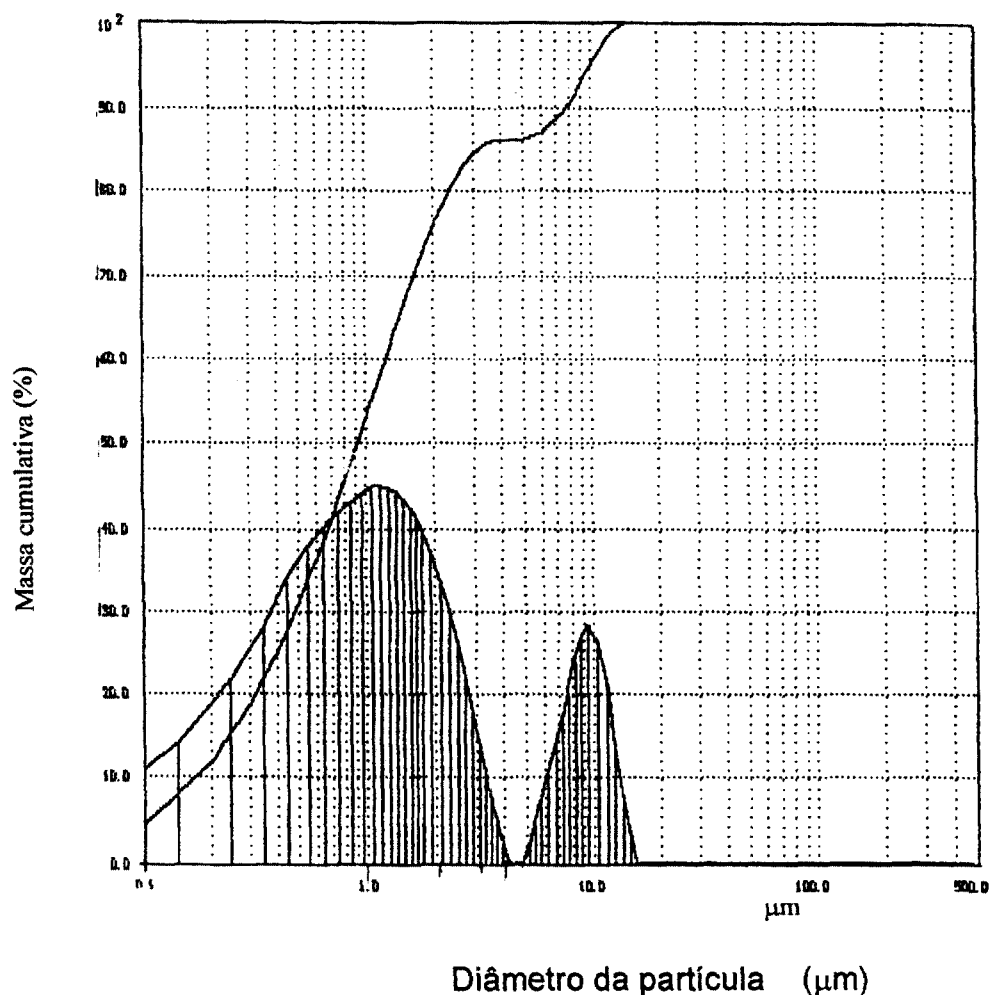


Figura 12: Distribuição granulométrica do resíduo obtida por laser.

## 5.2 FORMULAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS PARA ESTUDOS DE BLINDAGEM DE RADIAÇÃO

Os corpos-de-prova de concreto (produzidos nos laboratórios da Holdercim), foram submetidos à cura úmida por 28 dias e ensaiados quanto à resistência à compressão e atenuação à radiação gama. Esses ensaios tiveram o caráter exploratório para a viabilização da produção de concreto pesado utilizando o máximo de resíduo sem alterar as propriedades mecânicas do concreto, e portanto, repetimos a formulação de concretos com 30% de resíduo (identificados

como A e B), para cada tipo de cimento (CPII-E-32 e CPV-ARI-PLUS), objetivando analisar mais profundamente esse traço.

As substituições, de areia por resíduo, maiores que 30% produziram concretos com baixa consistência e com perda de trabalhabilidade, no estado fresco, e portanto não foram produzidas.

Os corpos-de-prova cilíndricos de concreto estão apresentados na Figura 13.

A Figura 14 apresenta os corpos-de-prova de concreto prismáticos utilizados.

### 5.2.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A média dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 19 e na Figura 15.

Tabela 19: Resistência à compressão dos corpos-de-prova nas diversas proporções de adição de resíduo.

Identificação do corpo-de-prova	Proporção de resíduo (%)	Resistência à compressão (MPa)
0%CPII	0	73,0
0%CPV	0	64,5
10%CPII	10	80,0
10%CPV	10	80,0
20%CPII	20	78,0
20%CPV	20	76,5
30%ACPII	30	72,0
30%ACPV	30	70,5
30%BCPII	30	69,5
30%BCPV	30	70,7



Figura 13: Corpos-de-prova de concreto, cilíndricos.



Figura 14: Corpos-de-prova de concreto, prismáticos, para ensaios de blindagem.

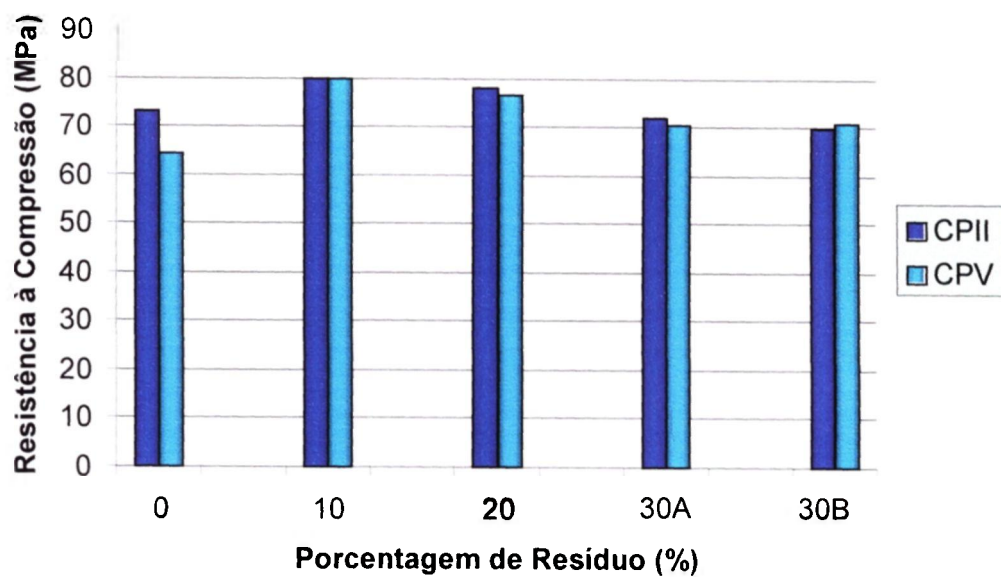


Figura 15: Comparação dos ensaios de resistência à compressão em função do tipo de cimento e da porcentagem de resíduo.

A identificação dos corpos-de-prova visa apresentar o tipo de cimento utilizado (CPII-E-32 ou CPV-ARI-PLUS) e a quantidade de resíduo adicionada em substituição da areia.

Analisando os resultados obtidos neste ensaio observamos que, para as mesmas proporções de adição de resíduo, o comportamento dos corpos-de-prova foi semelhante, independente da utilização do cimento CPII-E-32 ou CPV-ARI-PLUS. Comparado com o corpo-de-prova de referência, a adição de 10% de resíduo melhorou em 10% a resistência à compressão. Para a adição de 20% de resíduo houve uma pequena queda na resistência, em comparação a 10% de adição, embora ainda melhor que o corpo-de-prova de referência. Para a adição de 30% de resíduo houve uma nova queda na resistência, atingindo os valores do concreto de referência. De um modo geral a adição de resíduo pouco influenciou na resistência à compressão dos traços estudados.

#### **5.2.2 ENSAIOS DE ATENUAÇÃO À RADIAÇÃO GAMA**

Os corpos-de-prova prismáticos (20cm de largura, 20cm profundidade e 13cm de altura), produzidos com o mesmo material dos corpos-de-prova cilíndricos, foram enviados ao Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN onde foram determinados o poder de atenuação e a densidade. A Tabela 20 e o Figura 16 apresentam os resultados obtidos da determinação das densidades dos corpos-de-prova.

Tabela 20: Densidade dos corpos-de-prova.

Identificação do corpo-de-prova	Proporção de resíduo (%)	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )
0%CPII	0	2,423
0%CPV	0	2,500
10%CPII	10	2,423
10%CPV	10	2,500
20%CPII	20	2,460
20%CPV	20	2,538
30%ACPII	30	2,529
30%ACPV	30	2,538
30%BCPII	30	2,433
30%BCPV	30	2,538

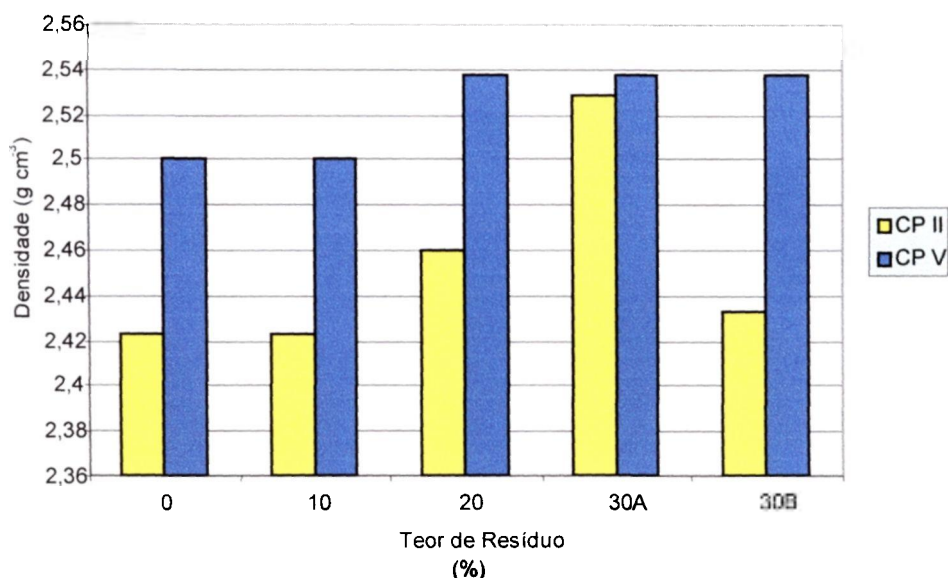


Figura 16: Densidade dos corpos-de-prova.

Os resultados obtidos neste ensaio mostram que, para os concretos produzidos com o cimento CPV-ARI-PLUS a densidade obtida foi um pouco maior do que quando se utiliza o cimento CPII-E-32, embora mesmo com as adições de resíduo a densidade variou menos que 5%, permitindo concluir que as substituições de areia por resíduo não apresentaram uma diferença significativa nessa propriedade dos concretos.

O poder de atenuação foi determinado conforme a Equação 6 e é expresso em termos de coeficiente de atenuação de massa. A Tabela 21 e a Figura 17 apresentam os resultados obtidos na irradiação dos corpos-de-prova com uma fonte de Cobalto-60.

Tabela 21: Coeficiente de atenuação de massa.

Identificação do corpo-de-prova	Proporção de resíduo (%)	Coeficiente de Atenuação de Massa ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )
0%CPII	0	0,0467
0%CPV	0	0,0397
10%CPII	10	0,0482
10%CPV	10	0,0377
20%CPII	20	0,0482
20%CPV	20	0,0463
30%ACPII	30	0,0487
30%ACPV	30	0,0484
30%BCPII	30	0,0460
30%BCPV	30	0,0477

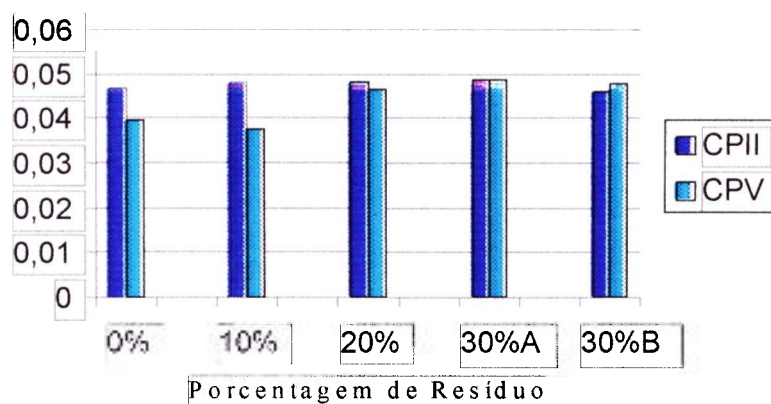


Figura 17: Coeficiente de atenuação de massa.

Os resultados obtidos neste ensaio mostram que embora haja uma grande variação nos coeficientes de atenuação de massa, por volta de 20%, entre o corpo-de-prova 0%CPV e o 30%CPV, não se pode creditar à adição de resíduo

esse fenômeno, pois a variação entre o corpo-de-prova 0%CPII e o 0%CPV foi de 17%. Conclui-se portanto que essa variação tenha como causa provável fatores externos, tais como, adensamento do concreto ou porosidade interna, imperceptíveis a outros ensaios.

Esse efeito mostra a importância da verificação experimental, com fonte de radiação, da eficácia de atenuação de paredes de blindagem quando da utilização de fontes de radiação.

Observa-se também que os concretos produzidos pela adição de resíduo não obtiveram coeficiente de atenuação usualmente utilizados como blindagem radiológica (maiores que  $0,067 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) (LAMARSH, 1966).

### **5.3 ENSAIOS DE PELOTIZAÇÃO DE RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS PESADOS**

Uma vez que o concreto produzido pela adição de resíduo em substituição ao agregado miúdo não obteve os resultados desejados, optou-se por pelotizar o resíduo com cimento Portland (CPV-ARI-PLUS), e produzir agregados graúdos de alta densidade.

Em estudos desenvolvidos por MANTOVANI, 1998, para o reaproveitamento deste tipo de resíduo no próprio processo siderúrgico foi utilizado adições de até 10% de cimento como aglomerante na pelotização. Nesses estudos no entanto as pelotas produzidas eram sinterizadas antes de retornarem ao alto-forno.

Para a reutilização deste resíduo como agregado graúdo optou-se por utilizar as pelotas sem sinterizá-las, o que aumentaria em muito o custo do processo, e compará-las aos agregados graúdos normalmente utilizados, seja em concretos pesados ou em concretos comuns.

A Figura 18 mostra as pelotas de resíduo produzidas pela adição de cimento Portland.

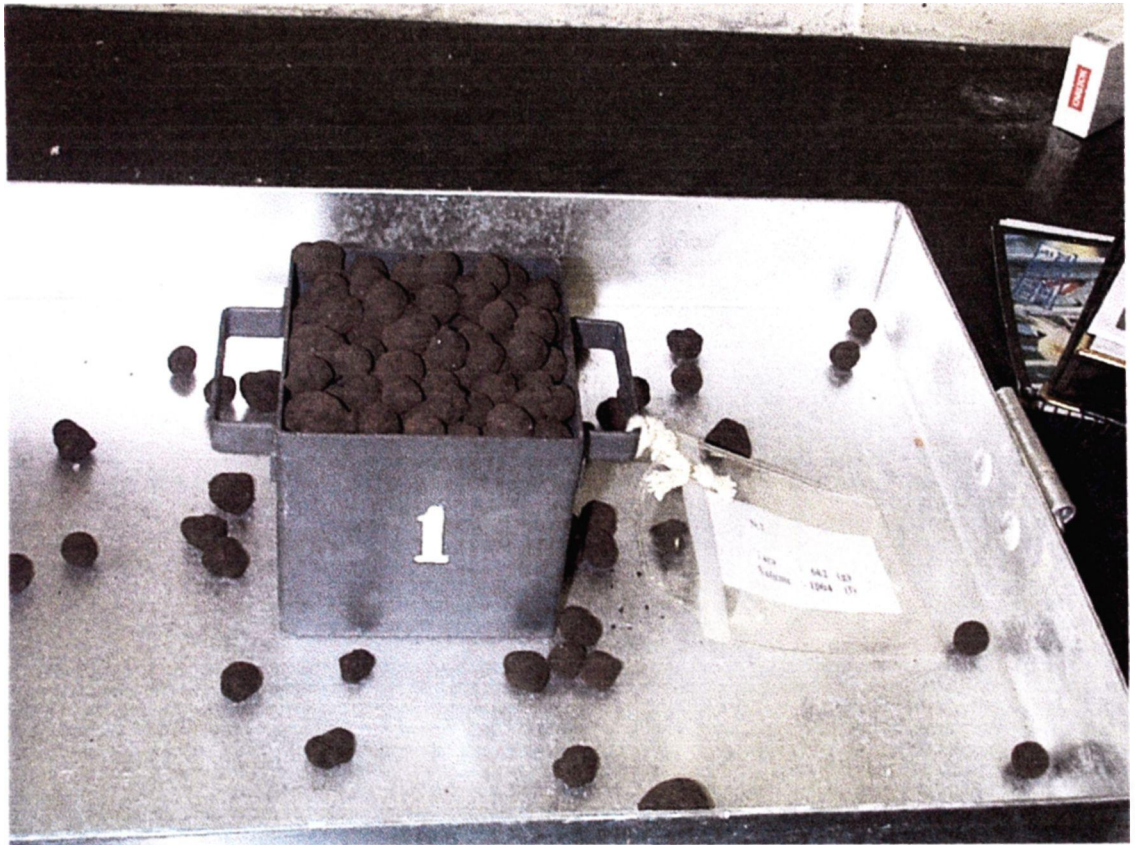


Figura 18: Pelotas de resíduo produzidas com adição de cimento.

### 5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PELOTIZADO

As pelotas foram produzidas com adição de 7% e 10% de cimento Portland CPV-ARI-PLUS e ensaiadas aos 7 e 28 dias de cura à temperatura e umidade ambiente. Como comparação foram realizados ensaios com brita de diâmetros semelhantes (20mm).

A Tabela 22 e a Figura 19 apresentam os resultados médios da massa unitária das pelotas, da brita e da hematita.

Tabela 22: Resultados de massa unitária das pelotas, da brita e da hematita.

Amostra	Cimento (%)	Tempo de cura (dias)	Massa Unitária (g cm <sup>-3</sup> )
Pelotas	07	07	15,7
	07	28	15,8
	10	07	16,1
	10	28	16,1
Brita	-x-	-x-	13,8
Hematita	-x-	-x-	27,2

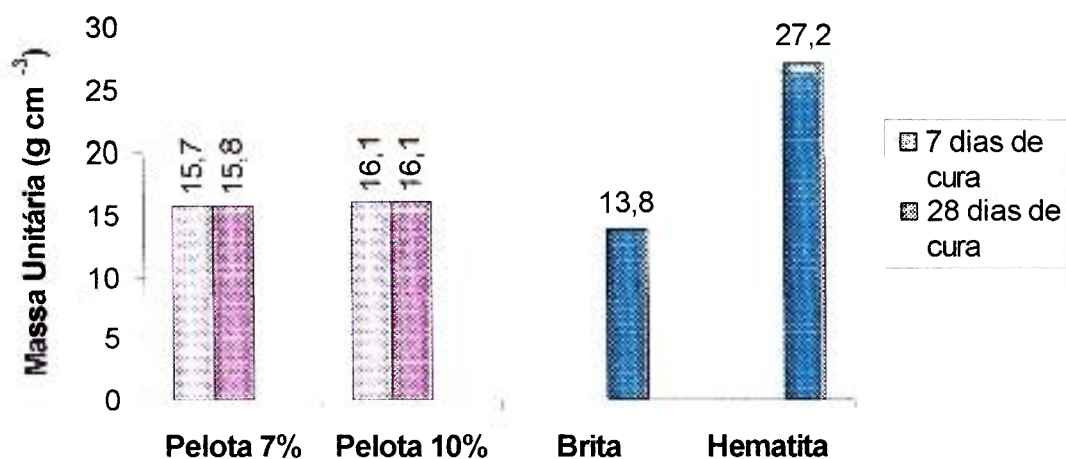


Figura 19: Massa unitária das pelotas, da brita e da hematita.

Podemos observar que o tempo de cura e a quantidade de cimento pouco influenciaram na massa unitária das pelotas. As pelotas ficaram apenas 13% mais densas que a brita, mas ainda 60% da massa unitária da hematita.

A Tabela 23 apresenta a média dos resultados do ensaio de massa específica e absorção de água das pelotas, da brita e da hematita. A Figura 20 ilustra os resultados de absorção de água para as pelotas, brita e hematita.

Tabela 23: Resultados do ensaio de massa específica das pelotas, da brita e da hematita.

Amostra / Identificação	Cimento (%)	Tempo de cura (dias)	Massa Específica na condição seca ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Massa Específica na condição saturada superfície seca ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Absorção de água (%)
Pelotas	07	07	2,76	3,05	10,54
Pelotas	07	28	2,70	3,01	11,24
Pelotas	10	07	2,75	3,04	10,49
Pelotas	10	28	2,75	3,03	10,27
Brita	-x-	-x-	2,55	2,60	2,10
Hematita	-x-	-x-	4,74	4,78	0,86

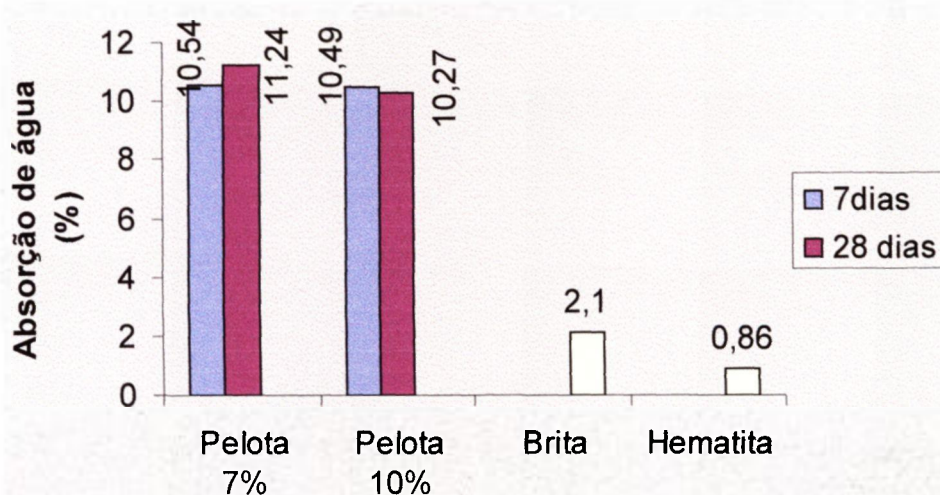


Figura 20: Resultados de absorção de água para as pelotas, brita e hematita.

Podemos observar que o tempo de cura e a quantidade de cimento pouco influenciaram no comportamento das pelotas; a absorção de água é de 11% de água, o que influi na relação água:cimento e, conseqüentemente nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Foram também executados, como referência e comparação, ensaios de carga de ruptura das pelotas, da brita e da hematita, e a média dos resultados está apresentada na Tabela 24 e na Figura 21.

Tabela 24: Carga de ruptura das pelotas, da brita e da hematita.

<b>Amostra</b>	<b>Cimento (%)</b>	<b>Tempo de cura (dias)</b>	<b>Carga de ruptura (KN)</b>
Pelotas	07	07	0,166
	07	28	0,224
	10	07	0,215
	10	28	0,196
Brita	-x-	-x-	4,801
Hematita	-x-	-x-	5,889

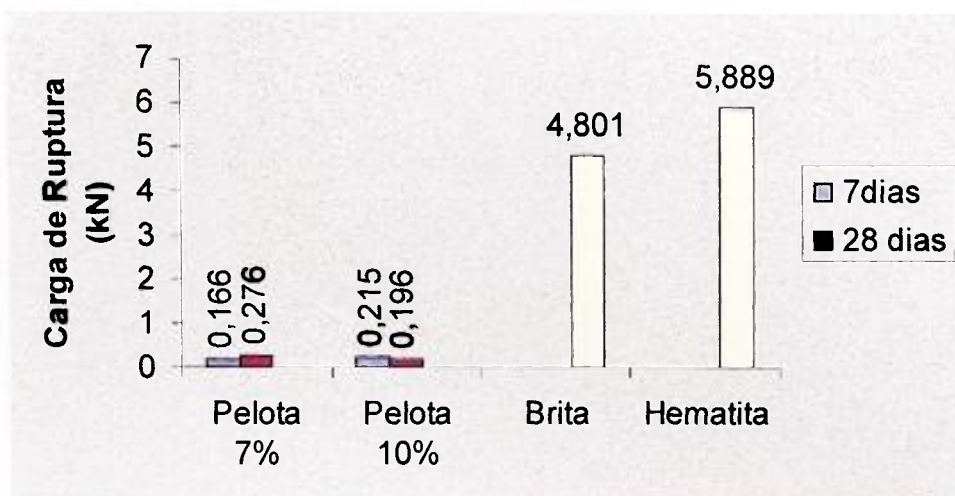


Figura 21: Carga de ruptura das pelotas, da brita e da hematita.

Podemos observar pelos resultados obtidos neste ensaio que as pelotas, seja utilizando 7% ou 10% de cimento como aglomerante, foram cerca de 25 vezes mais frágeis que a brita e a hematita, quando submetidas a uma carga, o que inviabilizaria a sua utilização em qualquer concreto que fosse sujeito a cargas estruturais, típicas das presentes em blindagens radiológicas.

Dessa forma concluímos pela não utilização desta técnica para o objetivo de produzir agregados graúdos pesados para utilização em paredes de blindagem.

#### 5.4 COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS A PARTIR DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Uma vez que o objetivo do reaproveitamento do resíduo em formulações de concreto pesado, seja como obtido na siderurgia em forma de pó, como substituição de areia, seja como agregado graúdo artificial, obtido por pelotização do resíduo não alcançaram os resultados satisfatórios, partiu-se para a

composição de argamassas a partir de uma curva granulométrica teórica e, para o estudo da fixação deste resíduo na argamassa.

Com base nos estudos de CARNEIRO, 1999, utilizando a curva granulométrica apresentada na Tabela 8 preparou-se o agregado substituindo a fração fina da areia por resíduo em proporções predefinidas (100%,75%, 50% e uma argamassa de referência). Foram então executados os ensaios no estado fresco e no estado endurecido. A Tabela 25 apresenta a média dos resultados obtidos.

Tabela 25: Resultados dos ensaios nas argamassas compostas com resíduo.

Quantidade de resíduo adicionado à argamassa	0%	50%	75%	100%
Relação água/cimento	0,53	0,54	0,54	0,60
Densidade no estado fresco (W <sub>a</sub> ) (g cm <sup>-3</sup> )	2,19	2,19	2,22	2,24
Densidade teórica (W <sub>c</sub> ) (g cm <sup>-3</sup> )	2,23	2,30	2,30	2,26
Teor de ar incorporado (%)	2,0	4,8	3,5	0,9
Retenção de água (%)	41	50	75	95
Resistência à compressão axial (28 dias) (MPa)	43,2	44,8	42,5	38,0
Resistência a tração na flexão (28 dias) (MPa)	7,2	7,1	7,1	6,4

A Figura 22 apresenta as argamassas produzidas com e sem resíduo.

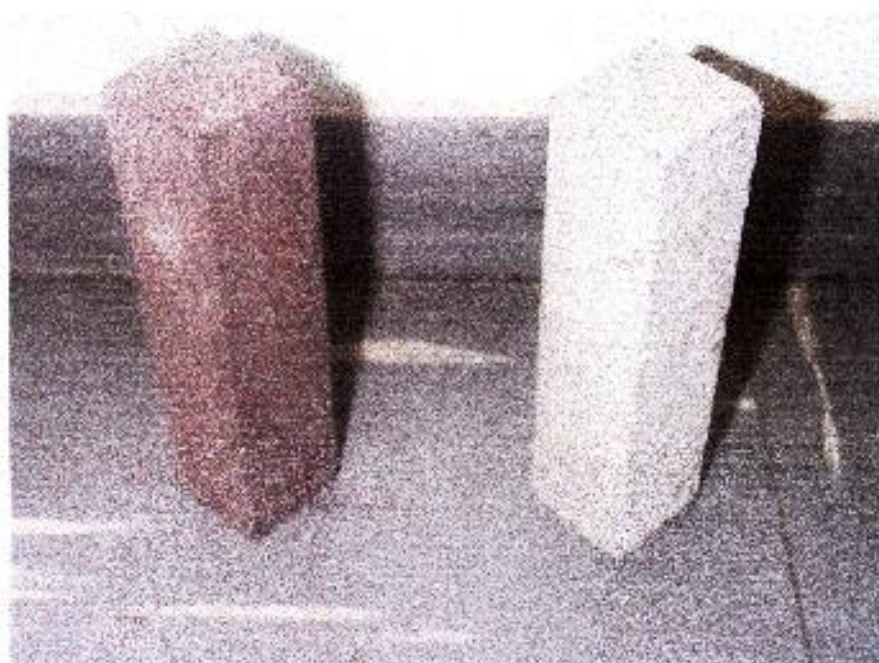


Figura 22: Argamassas produzidas com e sem resíduo.

A Figura 23 apresenta os resultados da relação água:cimento obtido pelas diferentes argamassas para uma consistência definida de  $265 \pm 15$  mm.

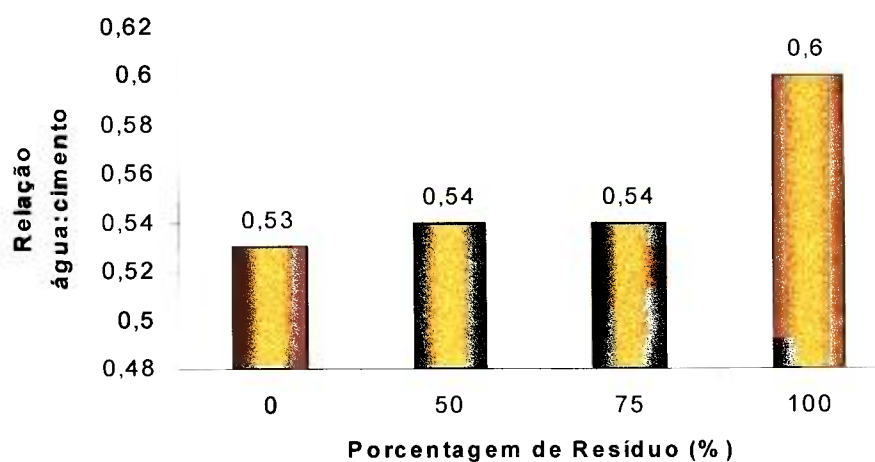


Figura 23: Resultados da relação água:cimento.

Observando os resultados obtidos nestes ensaios constatou-se que houve um acréscimo de 10% na relação água:cimento quando da adição de resíduo (0,6 para 100% e 0,53 para 0%), causado provavelmente pela alteração da granulometria do resíduo quando em contato com a água. Como já observado na distribuição granulométrica por laser o diâmetro médio do resíduo, utilizando dispersantes, é  $0,92\mu\text{m}$ , e a adição de um material fino à argamassa tende em aumentar o consumo de água.

A Figura 24 e a Figura 25 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios de determinação da densidade teórica ( $W_c$ ) e a densidade no estado fresco ( $W_a$ ), das diversas argamassas.

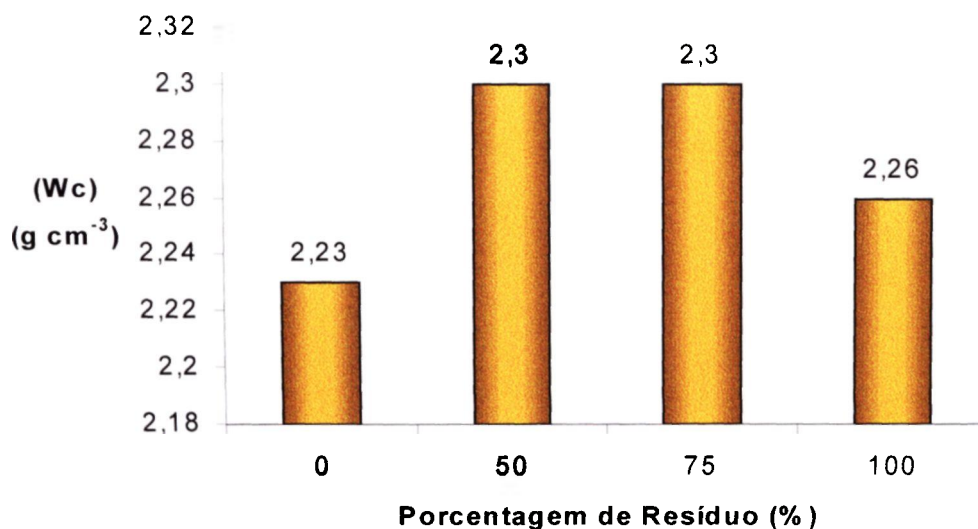


Figura 24: Resultados dos ensaios de determinação da densidade teórica ( $W_c$ ).

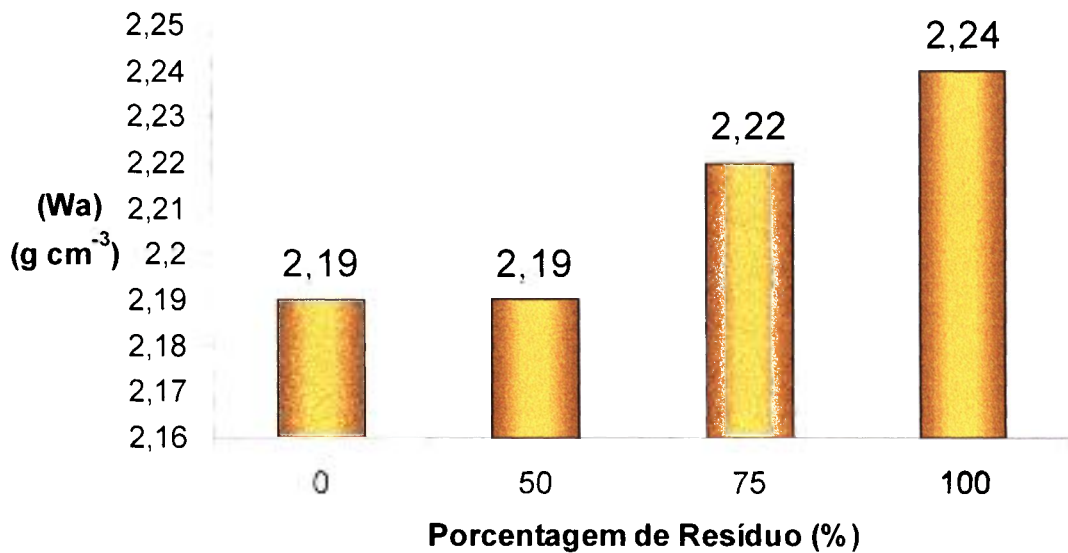


Figura 25: Resultados dos ensaios de determinação da densidade no estado fresco (Wa).

A Figura 26 e a Figura 27 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios de determinação de teor de ar incorporado e retenção de água das diversas argamassas.

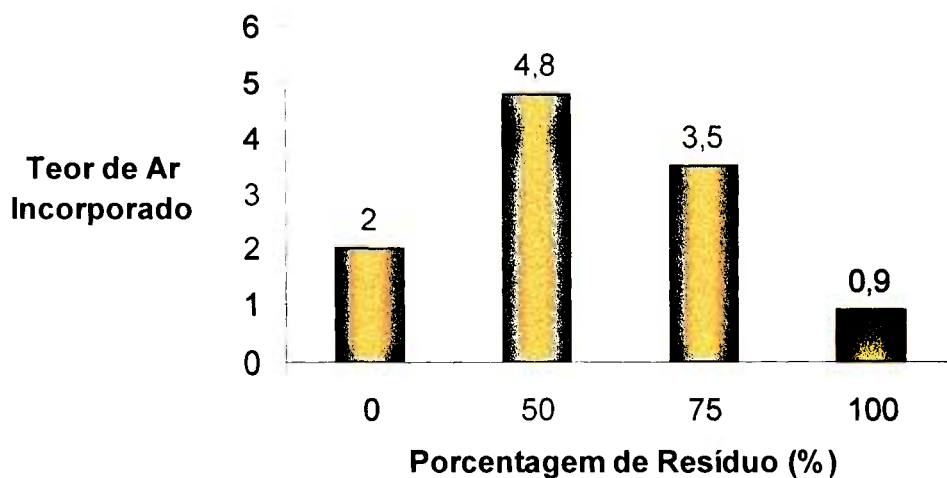


Figura 26: Resultados dos ensaios de determinação de teor de ar incorporado.

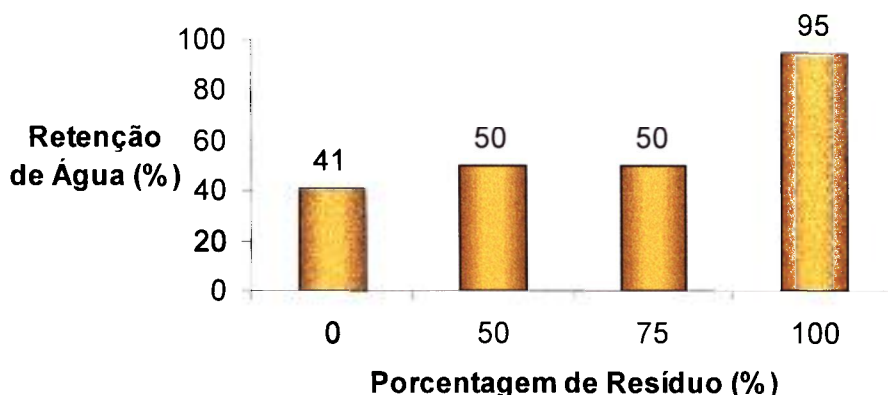


Figura 27: Resultados dos ensaios de determinação de retenção de água.

Analisando os resultados obtidos nestes ensaios, podemos concluir que a densidade no estado fresco e a densidade teórica pouco se alteraram com a substituição da areia por resíduo, já os resultados de ar incorporado não foram conclusivos, pois variaram seja com uma quantidade maior ou menor de resíduo. Devido à maior quantidade de finos, causado pela mudança da dimensão dos grãos do resíduo, houve uma maior retenção de água.

A Figura 28 e a 29 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão das diversas argamassas.

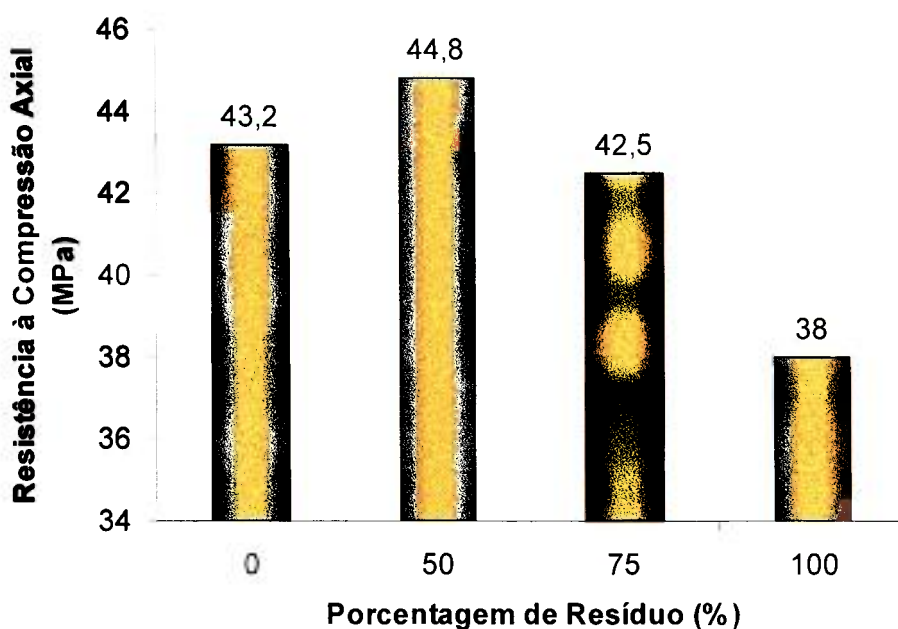


Figura 28: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.

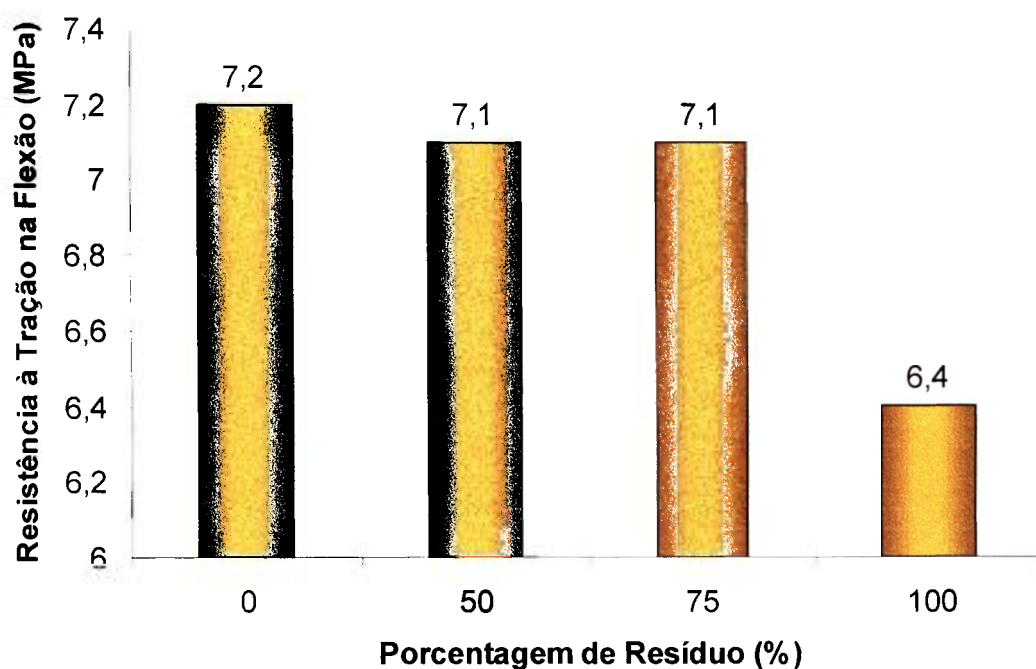


Figura 29: Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

Analisando os resultados podemos concluir que os dados de resistência à compressão foram coerentes com as conclusões anteriores, pois com uma maior

relação água:cimento e uma maior retenção de água as resistências mecânicas tendem a diminuir.

De uma maneira geral podemos concluir que a adição de resíduo como substituição da fração fina de um areia de composição granulométrica contínua não influi de maneira significativa nas propriedades mecânicas, quando comparado a uma argamassa de referência.

Entretanto a adição de resíduo contribuiu para uma maior retenção de água, efeito esse desejável pois, permite um maior contato da água com os grãos de cimento aumentando a hidratação do aglomerante. A pequena queda nas resistências à compressão e tração na flexão pouco influem em uma argamassa de revestimento, onde não há solicitações mecânicas.

## **5.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS POR POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO**

Como ensaio complementar foi executado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras retiradas dos corpos-de-prova das argamassas. A Tabela 26 apresenta um resumo dos dados obtidos.

Tabela 26: Resultado dos ensaios de porosimetria para as diversas argamassas.

Quantidade de resíduo adicionado à argamassa	0%	50%	75%	100%
Volume total de intrusão (ml g <sup>-1</sup> )	0,0961	0,0890	0,1093	0,1017
Área total dos poros (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	20,018	13,126	17,655	22,607
Diâmetro médio do poro $\bar{r}_v$ (Å)	492	509	476	445
Porosidade (%)	19,6925	18,5563	22,5255	21,2573

Figura 30 apresenta o volume de mercúrio introduzido na amostra pelo tamanho do poro da amostra de referência (0%).

A Figura 31 apresenta o volume de mercúrio introduzido na amostra pelo tamanho do poro da amostra com 50% de resíduo (50%).

A Figura 32 apresenta o volume de mercúrio introduzido na amostra pelo tamanho do poro da amostra com 75% de resíduo (75%).

A Figura 33 apresenta o volume de mercúrio introduzido na amostra pelo tamanho do poro da amostra com 100% de resíduo (100%).

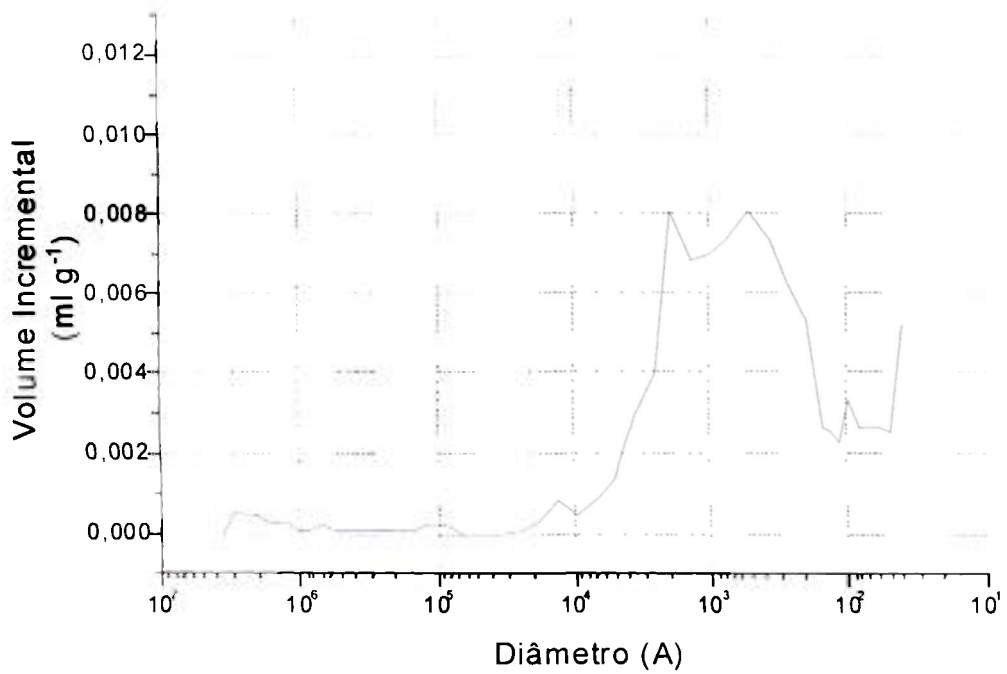


Figura 30: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra de referência (0%).

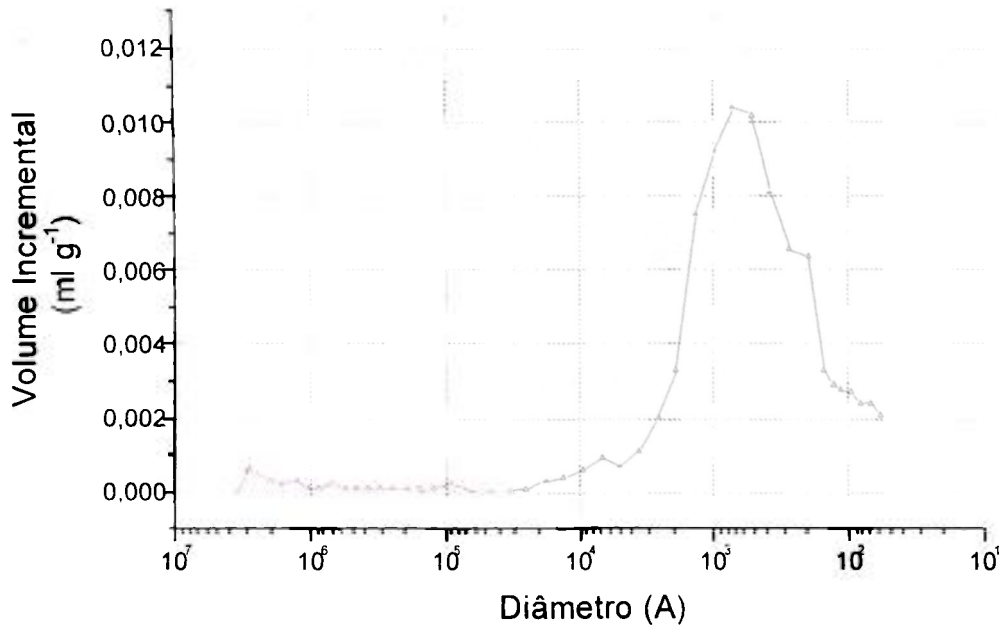


Figura 31: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 50% de resíduo (50%).

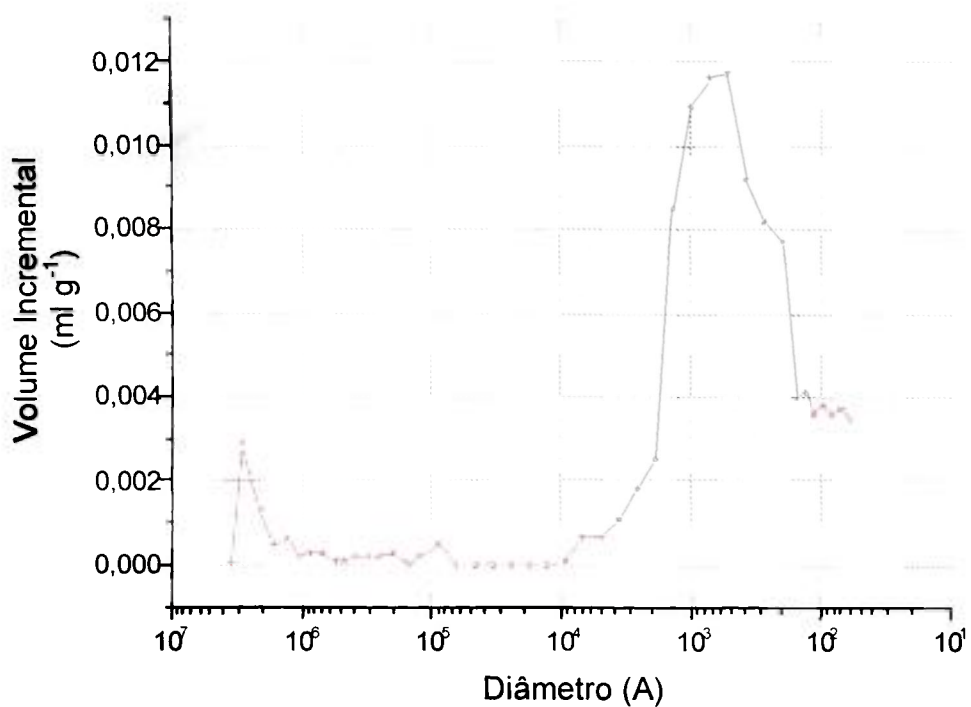


Figura 32: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 75% de resíduo (75%).

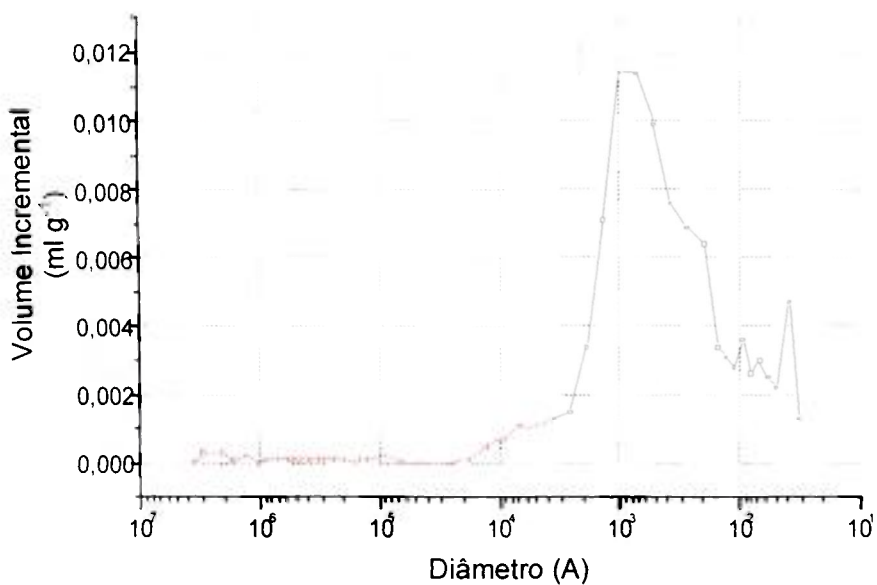


Figura 33: Volume de mercúrio introduzido por tamanho do poro da amostra com 100% de resíduo (100%).

Analisando os resultados de porosimetria podemos concluir que a adição de resíduo alterou muito pouco a porosidade sendo que nas maiores proporções de adição houve um pequeno aumento na porosidade.

Esses resultados estão coerentes com a diminuição da resistência à compressão e tração na flexão causado pelo aumento da relação água:cimento.

## **5.6 OBSERVAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM MICROSCÓPIO ÓTICO DE TRANSMISSÃO**

Observa-se, na Figura 34, a argamassa cuja adição de resíduo foi de 100% que a distribuição dos grãos do resíduo se fez de maneira homogênea, não apresentando aglomerações que poderiam modificar o seu comportamento. Observa-se, também a calcita microcristalina, formada a partir da reação do  $\text{Ca(OH)}_2$  com o  $\text{CO}_2$ , cimentando os grãos finos e grossos da areia e do resíduo na argamassa.

Na Figura 35 observa-se a distribuição da argamassa sem resíduo, não se notando diferença significativa da distribuição dos grãos.

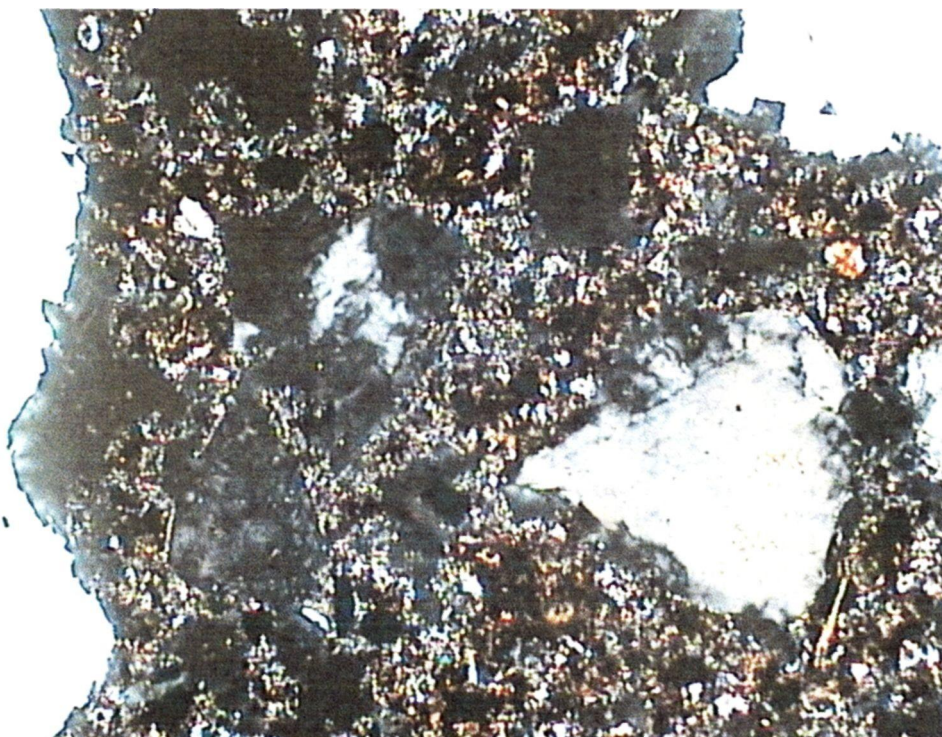


Figura 34: Observação em microscópio ótico da argamassa com 100% de resíduo substituindo a fração fina da areia.

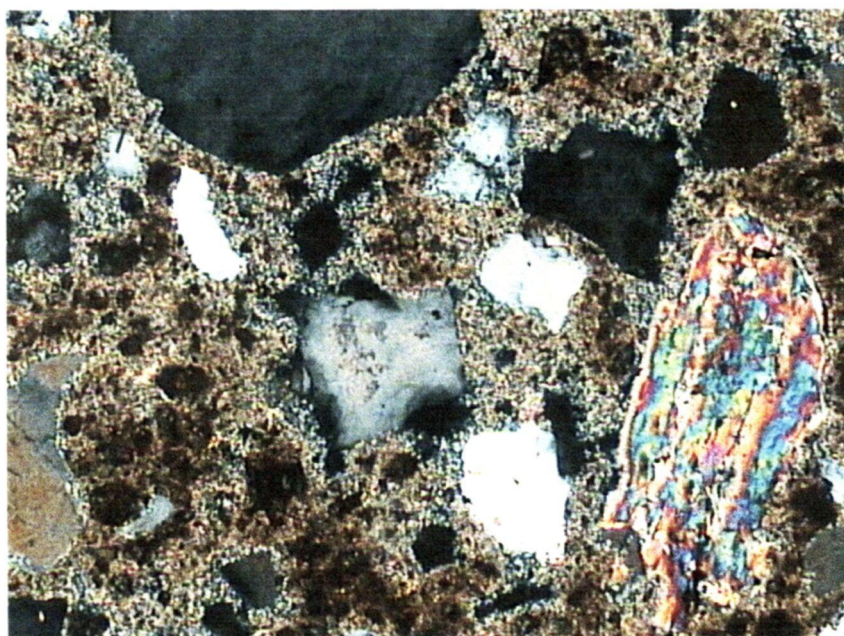


Figura 35: Observação em microscópio ótico da argamassa sem resíduo (0%).

## 5.7 ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Com base na norma que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados, o resíduo e as argamassas produzidas foram submetidos aos ensaios de solubilização e lixiviação. A Tabela 27 e a Tabela 28 apresentam, respectivamente, os resultados desses ensaios nos quais as determinações de metais, nas soluções solubilizadas e lixiviadas, foram realizadas utilizando-se a técnica de espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio induzido.

Os ensaios foram realizados objetivando-se determinar um parâmetro ambiental comparativo da fixação do resíduo à argamassa, uma vez que não existe um ensaio padronizado.

Foram realizadas 3 determinações para cada solução sendo analisados os seguintes elementos: Na, Mg, Al, P, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Ba e Pb. Foi realizada, para cada ensaio, uma prova em branco para verificar a qualidade dos ensaios.

O pH inicial, medido das soluções lixiviada para o resíduo antes da adição do ácido acético foi 8,98, após ser acrescentada a quantidade máxima, permitida no ensaio (4mL de ácido acético por grama de material). O pH final obtido foi 6,15.

Para as argamassas com ou sem resíduo o pH se manteve próximo de 12,00 antes e após a adição de ácido acético.

Após a filtração, o extrato foi acidulado com ácido nítrico, até o pH 2,00, para ser analisado quanto aos constituintes.

Tabela 27: Ensaios de solubilização das diversas argamassas e do resíduo.

Ele men to	Limite Máximo no Extrato* (mg L <sup>-1</sup> )	Identificação do Extrato Solubilizado (mg L <sup>-1</sup> )				
		0%	50%	75%	100%	Resíduo
Na	200	14,66	19,67	21,66	17,04	7,38
Mg	-	0,78	1,09	1,09	1,24	4,11
Al	0,2	0,08	0,13	0,10	0,11	0,06
P	-	1,10	1,40	1,34	1,57	0,50
K	-	>53	>61	>64	48,84	9,61
Ca	-	>1550	>1550	>1550	>1550	293
Cr	0,05	0,06	0,08	0,07	0,09	0,05
Mn	0,1	0,03	0,05	0,05	0,06	0,01
Fe	0,3	0,08	0,14	0,12	0,16	0,09
Co	-	0,37	0,51	0,49	0,58	0,06
Ni	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	1,0	0,06	0,09	0,09	0,10	0,02
Zn	5,0	0,04	0,05	0,05	0,06	0,01
Ag	0,05	0,06	0,09	0,09	0,11	0,01
Cd	0,005	0,03	0,05	0,04	0,07	0,01
Ba	1,0	0,9	0,6	0,7	0,5	0,01
Pb	0,05	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

Observação: O símbolo (>) significa que o valor está próximo do limite superior de detecção do equipamento e o símbolo (<) significa que o valor está próximo do limite inferior do equipamento.

(\*) Recomendação do Ministério da Saúde - Portaria 36/90 Padrão de Potabilidade (ABNT-NBR-10.006, 1987).

Os resultados obtidos após o contato estático por 7 dias com água destilada, à temperatura ambiente, conforme ensaio de solubilização dos resíduos (ABNT-NBR-10.006, 1987), não apresentaram nenhum de seus constituintes com

concentrações superiores aos padrões de potabilidade, conforme listagem número 8, anexo H, da ABNT-NBR-10.004, 1987, exceto para Cr e Cd.

Quanto aos resultados obtidos após contato dinâmico por 24 horas com adição de ácido acético à temperatura ambiente, não foi observado nenhum dos constituintes lixiviados com concentrações superiores aos padrões constantes na listagem número 7, anexo G, da ABNT-NBR-10.004, 1987.

Tabela 28: Ensaio de lixiviação das diversas argamassas e do resíduo.

Ele men to	Limite Máximo no Lixiviado (mg L <sup>-1</sup> )	Identificação do Extrato Lixiviado (mg L <sup>-1</sup> )				
		0%	50%	75%	100%	Resíduo
Na	-	4,37	5,25	5,65	4,72	4,11
Mg	-	0,89	0,66	0,59	1,42	196
Al	-	0,30	0,39	0,34	0,22	0,04
P	-	0,14	0,15	0,14	0,14	0,64
K	-	>13,82	>18,51	>19,33	>14,68	4,59
Ca	-	>1554	>1554	>1554	>1554	1164
Cr	5,0	0,08	0,05	0,05	0,05	0,13
Mn	-	0,013	0,016	0,015	0,020	6,780
Fe	-	0,044	0,011	0,008	0,007	2,39
Co	-	0,107	0,131	0,132	0,123	1,17
Ni	-	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	0,059
Cu	-	0,018	0,025	0,027	0,022	7,72
Zn	-	0,037	0,041	0,039	0,038	1,39
Ag	5,0	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03
Cd	0,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
Ba	100	0,48	0,48	0,55	0,35	0,02
Pb	5,0	<0,0190	<0,0190	<0,0190	<0,0190	<0,0190

Podemos observar, quando comparamos os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, que tanto a argamassa produzida sem resíduo como a argamassa produzida com a maior quantidade de resíduo em massa (14,55% de resíduo), os valores analisados dos diversos constituintes tiveram pouca variação.

Podemos concluir que estes constituintes poderiam estar tanto na composição do cimento como na da areia. Portanto a adição do resíduo, até a proporção estudada, não alterou a liberação de elementos por parte da argamassa.

## 6 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÃO TECNOLÓGICA

O aproveitamento de substâncias descartadas pelos diversos setores industriais representa um dos principais objetos de pesquisa tanto do setor produtivo quanto de instituições de pesquisa. Dessa forma, é de primordial importância desenvolver pesquisas que visem diminuir áreas de disposição destes materiais, minimizando o impacto ambiental associado ao seu manejo e estocagem e, se possível agregar valores nominais a estes resíduos.

A lama de aciaria é um resíduo cuja granulometria é muito fina, o que leva a grandes problemas ambientais para sua deposição, seja pelo volume gerado, seja pela significativa agressividade ao meio ambiente.

Os principais problemas ambientais associados à estocagem desse resíduo dizem respeito à alta concentração de material particulado na atmosfera, ao assoreamento de cursos de água, à poluição visual causada por pilhas de estoque e à inutilização de áreas potencialmente férteis.

A construção civil é um dos setores industriais que mais consome matérias-primas e tem sido uma indústria recicladora por excelência, graças a tolerância quanto aos materiais usados em alguns de seus componentes.

A importância deste estudo está em analisar o comportamento de concretos e argamassas quando da substituição de uma fração da areia por resíduo, desenvolvendo conhecimento tecnológico de novos materiais produzidos com resíduo e desenvolvendo metodologia de reciclagem de pós finos na construção civil.

A substituição da areia pelo resíduo em formulação de concretos, para a blindagem de radiação, não obteve o sucesso desejado quanto ao aumento do poder de atenuação, mas os corpos-de-prova produzidos tiveram suas

características mecânicas preservadas, o que não inviabilizaria seu uso na indústria da construção civil convencional.

A pelotização do resíduo com adição de cimento Portland, produziu agregados graúdos, porém sem resistência mecânica satisfatória e com grande absorção de água, quando comparados aos usualmente utilizados, sendo, no entanto, passíveis de utilização onde essas características não inviabilizassem seu emprego.

A dosagem de uma argamassa, à partir de um perfil ideal de uma curva granulométrica dos seus componentes, permitiu conhecer a fração precisa que o resíduo, substituiria a areia sem prejuízo das características da argamassa.

Os resultados obtidos, avaliando-se as substituições executadas, permitem concluir que, até as substituições executadas, o resíduo não alterou o comportamento das argamassas, apenas conferindo cor e um pequeno campo magnético, da intensidade do campo magnético terrestre.

Os ensaios de lixiviação e solubilização, executados nas argamassas, permitem concluir que a presença do resíduo pouco influenciou na concentração dos elementos analisados nos extratos lixiviados ou solubizados, quando comparados com uma argamassa convencional.

Dessa forma, os estudos permitiram realizar um processo de fixação:

1. Melhorando as características físicas e de manuseio do resíduo;
2. Tornando possível a disposição do resíduo de forma ambientalmente segura;
3. Produzindo um produto com boa estabilidade, resistência mecânica, baixa suscetibilidade ao ataque de soluções levemente ácidas, sendo comparável às argamassas e concretos de referência.

Além dos fatores técnicos favoráveis à utilização deste resíduo, destacam-se os benefícios de ordem econômica e ambiental, fomentando o desenvolvimento da infra-estrutura local e reduzindo o impacto ambiental associado ao seu manuseio. As informações aqui contidas podem contribuir na ampliação das alternativas tecnológicas de utilização de resíduos reciclados como material alternativo para a construção civil.

Como trabalhos futuros sugerimos relizar estudos de durabilidade do material; analisar o comportamento magnético deste novo material e suas aplicações práticas; a utilização da mesma metodologia para reciclagem de outros resíduos, inertes ou não e o estudo de novas formas de reciclagem de pós finos como substituição de uma fração de areia.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, R. M.; NEPOMUCENO, S.; VIEIRA, C. B.; VON KRUGUER, P.; ASSIS, P. S.: Algumas Questões Ligadas ao Controle Ambiental na Siderurgia e suas Soluções. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. maio, 1997, Vitória. *Anais...* Vitória, ES: 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Agregado em Estado solto – Determinação da massa unitária*. 1982 (ABNT NBR 7251)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Agregados – Determinação de absorção e da massa específica de agregado graúdo*. 1987 (ABNT NBR 9937).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Agregados para Concreto*. 1983 (ABNT NBR 7211).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Cal hidratada para argamassas – Determinação da retenção de água*. 1986 (ABNT NBR 9290).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto*. 1994 (ABNT NBR 5739).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Lixiviação de Resíduos – Procedimento*. 1987 (ABNT NBR 10.005).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Peneiras para Ensaio com Telas de Tecido Metálico – Método de ensaio*. 1989 (ABNT NBR 5734).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: *Resíduos Sólidos – Classificação*. 1987 (ABNT NBR 10.004).

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Sistemas de Gestão Ambiental – Especificações e diretrizes para uso**. 1996 (ABNT NBR ISO 14.001).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Solubilização de Resíduos – Procedimento**. 1987 (ABNT NBR 10.004).
- AYHAN, D.; KARSHOGLU, S.; AYAS, A: Utilizations of lignite ash in concrete mixture. **Cement and Concrete**, vol 24, nº 8, pp 1610-1614, 1998.
- BANGUAT, B. K.: Properties of concrete with bagasse ash as fine agregate . In: IBRACON, COMITÊ MEIO AMBIENTE, COLETÂNEA DE TRABALHOS TÉCNICOS, vol. 1, São Paulo, 1997. **Anais...** São Paulo, SP: 1997.
- BARBOSA, M.T.; POLISSENI, A.E.; CARVALHO, E.J.: Viabilidade do Uso do Pó Proveniente do Forno Elétrico na Construção Civil. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO HABITACIONAL. 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG: 1994.
- BERNOIT, M.R. & HAMEL, B.B.: Tratamento e Destruição de Resíduos Perigosos em Fornos de Cimento Portland, **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo, 1993.
- CARNEIRO, A. M. P.: **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, SP: 1999. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CETESB - (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL). **Poluição das Águas no Estuário e Baía de Santos**. São Paulo, SP: 1978. Vols I-II
- CETESB - (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL): **Lixiviação de Resíduos Industriais-Método de Ensaio, Norma Técnica L.5.510**. São Paulo, SP: 1982.
- CHAMIE, S.L.: **Encapsulamento de lamas galvânicas através da solidificação em matrizes de cimento**. São Paulo, SP: 1994. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- CHARLES, B. & FREDEEN, K. J. **Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Optical Emission Spectrometry**. Perkin Elmer Corporation, 1997.
- CHEHEBE, J.R.B.; YUAN, M.C.; CASSELATO, L.M.T.: Gestão Ambiental na Siderurgia Brasileira. **Revista de Metalurgia & Materiais, ABM** vol 50, n<sup>o</sup> 433, 1994.
- CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CASCUDO, H.C.: **Argamassas de Revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio**, Boletim 68, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP: 1995.
- CULLITY, B.D.: **Elements of X ray Diffraction**; Addison-Wesley Pub. Company, Inc., London; 1967.
- DANTAS, F.A.S. & SBRIGHI, C.N.: Aproveitamento de Rejeito de Produção de Alumínio a partir da Bauxita como agregado para concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS. 1<sup>o</sup>, julho, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SP: 1986
- DANTAS, F.A.S.; COSTA, M.M.; TAKASHIMA, S.: Controle tecnológico do concreto pesado para blindagem do setor de radioterapia da casa de saúde Santa Marcelina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40<sup>o</sup>, 1998, Rio de Janeiro. **Anais....** Rio de Janeiro, RJ: 1998.
- EZELDIN, A.S.; MIKHAIL, R.; CHOI, B.J.: Properties of concrete containing benzene-contaminated soils. In: IBRACON, COMITÊ MEIO AMBIENTE, COLETÂNEA DE TRABALHOS TÉCNICOS, vol. 1, São Paulo, 1997. **Anais...** São Paulo, SP: 1997.
- FANCIO, E.: **Aplicação do Método de Rietveld para Análise Quantitativa de Fases dos Polimorfos da Zircônia por Difração de Raios X**, São Paulo, SP: 1999, Dissertação (Mestrado) IPEN/CNEN-SP.
- FRANÇA, Y. V.: **Caracterização de Cerâmicas de Zircônia-Lantânia Processadas pela Técnica dos Citratos**, São Paulo, SP: 1999, Dissertação (Mestrado) IPEN/CNEN-SP.

- FÜLLER, W.B. & THOMPSON, S.E.: The laws of proportioning concrete. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v. 33, nº 3, Março, 1907, p. 223 - 298
- FURNAS, C.C.: Grading aggregates, I – mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 23, nº 9; Sep. 1981, p. 1052 - 1058
- GIRALDELLI, M.A.: *Alguns Aspectos Sobre a Utilização de Cimento Portland como Matriz para Imobilização de Rejeitos Radioativos*. São Paulo, SP: 1990, Dissertação (Mestrado) IPEN/CNEN-SP.
- HOJDA, R.G.: ISO 14001 - Estratégia para o Meio Ambiente. In: *Meio Ambiente Industrial, Edição 29*, Janeiro/Feveiro de 2001, São Paulo, 2001.
- HOLDERCIM: *Relatório Técnico das Propriedades do Cimento*. São Paulo, SP, 1999.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES: *Noções de física nuclear e atômica e interações da radiação com a matéria*. Curso de Credenciamento de Pessoas Físicas para Supervisão de Proteção Radiológica em Aceleradores Lineares de Elétrons para Aplicações Industriais, (apostila). São Paulo, SP: 1986. Cap.1.
- ISAIA, G. C.: *Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: Um Estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão de Armaduras*. São Paulo, SP: 1995. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- JOHN, V. M.: Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais para Uso na Construção Civil no Brasil: O Caso da Escória de Alto Forno. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL 1997, São Paulo, *Anais....* São Paulo SP: 1997.
- JOHN, V. M.: *Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição para Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento*. São Paulo, SP: 2000. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- KNOLL, G. F.: *Radiation Detection and Measurements*. 2<sup>o</sup> edition, 1989; John Wiley & Sons Inc..

- LAMARSH, J. R.: *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, 1966; Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- LENZ, G. F. B.: *Estoques na Área de Disposição de Resíduos em Fevereiro de 2000* (Comunicação Pessoal).
- LENZ, G. F. B.; MALYNOWSKYJ, A.; COSTA, R. M.; MOURÃO, M. B.: *Utilização de QFD (Desdobramento da Função Qualidade) na Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos Sólidos*. In: IX Encontro de Gestão pela Qualidade, *Anais....* São Paulo, SP 2000,
- LERÍPIO, A.; JULIATTO, D. L.; SCHERER, R.; POSSAMAI, O.; SELIG, P. M.: A Emissão Zero- A Busca da Geração de Novas Oportunidades de Negócios a Partir de Resíduos Industriais. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Maio, 1997, Vitória. *Anais....* Vitória, ES:1997.
- LOWELL, S. & SHIELDS, J. E.: *Powder Surface Area and Porosity*. 2ed. London, Chapman and Hall, 1984.
- MANTOVANI, M. S.: *Caracterização de poeiras geradas em fornos elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto redutoras*. São Paulo: SP. Tese (Doutorado). Escola Politécnica USP. São Paulo, 1998.
- MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.M.: *Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais*. Editora PINI, 1994.
- NIXON, P.J. & GUTT, W.: The manufacture of Synthetic Agregates from Colliery Spoil. In: *Building Research Establishment Information Paper*. December, 1981.
- ORTIZ, N; PIRES, M. A. F.;MIRANDA, P.; RELA, P. R.; ABREU, J. V.; MARCIANO, E.: *Primeiro relatório parcial de projeto de cooperação técnico científica. Blindagem Alternativa para Irradiadores Industriais – Estudos de Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto*. Relatório IPEN, 1997.

- ORTIZ, N.: ***Estudo da Utilização da Magnetita como Material Adsorvedor dos Metais Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> e Cd<sup>2+</sup>, em Solução.*** São Paulo, SP: 2000. Tese (Doutorado). IPEN/CNEN-SP.
- PEREIRA, N.: ***Análise de Risco Ambiental de Processo Siderúrgico.*** São Paulo, SP: 1998 (Tese de Doutorado), Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, N.: ***Eutrofização no sistema estuarino e das baías de Santos e São Vicente (SP).*** São Paulo, SP: 1985. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública.
- PIVA, H.L.: ***Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais.*** São Paulo, SP: 2000.
- SALT, B. K; et al.: Recycling contaminated spent blasting abrasives in portland cement mortars using solidifications/stabilization technology. In: IBRACON, COMITÊ MEIO AMBIENTE, COLETÂNEA DE TRABALHOS TÉCNICOS, vol. 3, São Paulo, 1997. ***Anais...*** São Paulo, SP: 1997.
- SANTOS, A. S. R.: Desenvolvimento Sustentável: Considerações. In: ***Meio Ambiente Industrial, Edição 29***, Janeiro/Feveiro de 2001, São Paulo, 2001.
- SEO, E. S. M.; ACEVEDO, M. T. P.; PASCHOAL, J. O. A.: Características das Pelotas de Zirconita e de Óxido de Zircônio Grau Cerâmico e Nuclear Obtidas pela Técnica de Pelotização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 37<sup>o</sup>, maio, 1993, Curitiba. ***Anais....*** Curitiba, PR: 1993.
- SILVA, M. G.; SILVA, V. G.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.: Reciclagem das Escórias Siderúrgicas: A Importância da Parceria Tecnológica. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Maio, 1997. Vitória. ***Anais....*** Vitória, ES: 1997
- TOMMASI, L.R.: ***Considerações ecológicas sobre o sistema estuarino de Santos (SP).*** São Paulo, SP: 1979. Tese (Liver-Docência). Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico.
- TOPÇU, I. B. & GUNÇAN, N.F.: Using waste concrete as aggregate. In ***Cement and concrete.*** vol. 25, nº 7, pp 1385-1390, 1995

- TRIPOLI, R.: **Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais**, São Paulo, SP: 2000.
- TRISTÃO, F. A.: **A Influência da Composição da Areia nas Propriedades das Argamassas de Revestimento**. Florianópolis, SC: 1995. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- VALLE, A.R.: Gerenciamento de Rejeitos na AÇOMINAS. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO HABITACIONAL. 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG: 1994
- VAN VLACK, L.,H.: **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Editora Campos, 2º edição, 1988
- VARGAS, M.: **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, EDUS, São Paulo, SP: 1977.
- VARGAS-BOLDRINI, C. & NAVAS-PEREIRA, D.: Metais pesados na baía de Santos e estuários de Santos e São Vicente – Bioacumulação. **Ambiente, Rev. CETESB de tecnologia** São Paulo, SP: 1987, 1 (3), p. 118 – 127
- VARGAS-BOLDRINI, C. et al.: **Contaminantes na bacia de rio Cubatão e seus reflexos na biota aquática**. São Paulo, SP: 1990. CETESB, Relatório Técnico