

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**Paula Gisele Lamezon de Pádua**

**Belo Horizonte**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**Paula Gisele Lamezon de Pádua**

**Paula Gisele Lamezon de Pádua**

**SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais como parte  
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Construção Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios

ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008

P125s Pádua, Paula Gisele Lamezon de  
Sinterização de finos de resíduos de construção civil: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável / Paula Gisele Lamezon de Pádua – 2008  
xvii, 114 f., enc. : il.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 107-114

1. Materiais de construção - Teses. 2. Sinterização - Teses. 3. Desenvolvimento sustentável - Teses. 4. Resíduos - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

*Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da Biblioteca da EE/UFMG*

PAULA GISELE LAMEZON DE PÁDUA

# **SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 18 de fevereiro de 2008.

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Adriano de Paula e Silva  
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora

---

ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar (DEMC/UFMG)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (CEFET/MG)

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior (DEMC/UFMG)

“Desejo que a vida se torne  
um canteiro de oportunidades  
para você ser feliz...  
Que nas primaveras  
você seja amante da alegria.  
Que nos invernos você  
seja amigo da sabedoria.  
E, quando você errar o caminho,  
recomece tudo de novo.  
Pois assim você será cada  
vez mais apaixonado pela vida.”

*Adaptado de Augusto Cury, em Dez leis para ser feliz*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente em minha vida, guiando os meus passos e me auxiliando em todos os momentos.

A toda minha família que sempre me apoiou, me incentivando a trilhar novos caminhos, em especial ao meu pai, por passar muitos ensinamentos pessoais e profissionais.

A professora Maria Teresa Paulino Aguilár, por ser minha orientadora mais uma vez, pela orientação, tempo dedicado, amizade, confiança, construção do saber e paciência.

Aos amigos e colegas de mestrado, em especial, à Ludmila Tavares e ao Augusto Bezerra, pela amizade, apoio, incentivo e ajuda na elaboração das idéias.

Ao Sílvio, aluno de iniciação científica, pela ajuda.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais pelos conhecimentos transmitidos.

A equipe do Laboratório de concreto - Pedro Leopoldo (Barroso Ciminás) da Holcim S.A., principalmente ao Marcelo A. Singulani e ao Ednaldo, que esteve sempre à disposição.

Ao funcionário, Adimilson, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Ao Roberto do Departamento de Minas, pelas análises de microestrutura.

Enfim, a todos que me ajudaram a alcançar mais essa meta em minha vida.



## RESUMO

A sinterização de minério é um processo metalúrgico, no qual finos de minérios de ferro, minérios não ferrosos e fundentes são aglomerados, por fusão parcial. O produto obtido é um material poroso, com propriedades físico-químicas que possibilitam sua utilização como matéria-prima para produção de ferro gusa e outros metais. Neste trabalho avalia-se a possibilidade de utilizar o mesmo processo para aglomerar finos de resíduo de construção e demolição (RCD). Amostras com finos de argamassa ou de RCD, coque, escoria granulada de alto-forno, calcário e água foram misturadas, pelletizadas e sinterizadas em equipamentos próprios. Os dados obtidos indicam que não é possível sinterizar finos de argamassas. Além disso, no tocante a resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água, é possível substituir na confecção de argamassas para concreto a areia natural por sinter confeccionado de finos de resíduos de construção, escória de alto-forno, coque, calcário e água, nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 litros. Tais resultados sugerem que em situações em que a necessidade de consumir finos de RCD seja prioritária a sinterização pode ser uma solução a ser analisada, pela sociedade que visa o desenvolvimento sustentável já que é viável tecnicamente.

Palavras chaves: finos de resíduo de construção, sinterização, concreto.

## ABSTRACT

The sintering of ore is a metallurgic process, in which iron ore fine, non-iron ore and fusiagent are agglomerates by partial fusion. The product of this process is a porous material that can be used in blast furnace. In this paper, it is assessed the possibility to use the same process to agglomerate demolition and construction waste fine. Samples of fine of mortar or fine demolition and construction waste, coke, blast furnace granulated slag, limestone and water were mixed, pelletized and sintered in appropriated equipments. The dates obtained show not is possible to sinter fine of mortars. Therefore, concerning, the compressive strength, module of elasticity and water absorption, is possible to substitute in the made mortar to concrete the nature sand to sinter made of fine demolition waste, blast furnace slag, coke, limestone and water, in the proportions of 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 l. These results propose in the situations of necessary to expend of fines demolition and construction waste be priority the sintering can be a solution to be analyzed, in the society visa the sustainable development yet is technically viable.

Key Words: demolition and construction waste, sintering, concrete.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>19</b>
1.1.1. Objetivo geral.....	19
1.1.2. Objetivos específicos .....	19
<b>1.2. Métodos .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3. Justificativa e relevância do tema .....</b>	<b>20</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Construção sustentável .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Resíduo de construção e demolição .....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Conceito e classificação de RCD.....	27
2.2.2. Constituição do resíduo de construção e demolição.....	29
2.2.3. Beneficiamento do resíduo .....	30
2.2.4. Agregados reciclados .....	34
2.2.4.1. Características do agregado reciclado.....	34
2.2.4.2. Aplicações do agregado reciclado .....	38
<b>2.3. Processos de aglomeração de minério de ferro .....</b>	<b>49</b>
2.3.1. Constituintes da mistura .....	50
2.3.2. Pelotização .....	57
2.3.2.1. Formação da pelota .....	57

2.3.2.2. Vantagens e desvantagens da utilização da pelletização.....	60
2.3.3. Sinterização .....	60
2.3.3.1. Formação /queima do sínter .....	61
2.3.3.2. Vantagens e desvantagens .....	66
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1. Materiais .....</b>	<b>68</b>
3.1.1. Materiais utilizados na confecção dos sínter .....	68
3.1.2. Materiais utilizados na confecção das argamassas para concreto .....	72
<b>3.2. Métodos .....</b>	<b>74</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
<b>4.1. Sinterizações .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2. Caracterização das argamassas fabricadas .....</b>	<b>90</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>104</b>
<b>6. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS .....</b>	<b>106</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuição da composição média de resíduos de construção coletadas em Maceió-AL (VIEIRA, 2004a). .....	30
Figura 2.2: Central de reciclagem do Aterro (Belo Horizonte-MG).....	32
Figura 2.3: Esquema dos fatores que influenciam a operação de sinterização (PENA, 1997). .....	66
Figura 3.1: Curva granulométrica da areia de mercado. ....	72
Figura 3.2: Areia sinterizada utilizada na confecção das argamassas, nas seguintes granulometrias: 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm.....	73
Figura 3.3: Início da ignição feita através de um maçarico na panela piloto .....	75
Figura 4.1: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 1.....	79
Figura 4.2: Gráfico de depressão x tempo da amostra 1. ....	79
Figura 4.3: Aspecto macrográfico da amostra 1 após a sinterização. ....	80
Figura 4.4: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a mistura. ....	80
Figura 4.5: Gráfico de depressão x tempo da amostra 2 .....	81
Figura 4.6: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a pelotização. ....	81
Figura 4.7: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a sinterização. ....	82
Figura 4.8: Aspecto macrográfico da amostra 3 após a pelotização. ....	82
Figura 4.9: Gráfico de depressão x tempo da amostra 3. ....	83
Figura 4.10: Aspecto macrográfico da amostra 3 após a sinterização. ....	83
Figura 4.11: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 4.....	84
Figura 4.12: Gráfico de depressão x tempo da amostra 4. ....	84

Figura 4.13: Aspecto macrográfico da amostra 4 após a sinterização. ....	85
Figura 4.14: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a mistura. ....	85
Figura 4.15: Gráfico de depressão x tempo da amostra 5 .....	86
Figura 4.16: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a pelotização. ....	86
Figura 4.17: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a sinterização. ....	87
Figura 4.18: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 6 .....	87
Figura 4.19: Gráfico de depressão x tempo da amostra 6. ....	88
Figura 4.20: Aspecto macrográfico da amostra 6 após a sinterização. ....	89
Figura 4.21: Resultados de resistência à compressão após 28 dias de cura em câmara úmida das argamassas .....	91
Figura 4.22: Estimativas do módulo de elasticidade após 28 dias de cura em câmara úmida, das argamassas. ....	92
Figura 4.23: Capacidade de absorção percentual de água em peso após 28 dias de cura em câmara úmida das argamassas. ....	93
Figura 4.24: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 50 vezes)-MEV-IES. ....	95
Figura 4.25: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 150 vezes)-MEV-IES. ....	95
Figura 4.26: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 2000 vezes)-MEV-IES. ....	96
Figura 4.27: Fotomicrografia da amostra com areia comum (aumento de 50 vezes)- MEV-IES. ....	97
Figura 4.28: Fotomicrografia da amostra com areia comum (aumento de 500 vezes)- MEV-IES. ....	98

Figura 4.29: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.....	99
Figura 4.30: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 150 vezes)-MEV-IES.....	100
Figura 4.31: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 500 vezes)-MEV-IES.....	101
Figura 4.32: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.....	101
Figura 4.33: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 150 vezes)-MEV-IES.....	102
Figura 4.34: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 500 vezes)-MEV-IES.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composições médias de RCD em algumas centrais de reciclagem brasileiras (ANGULO, 2002b).....	29
Tabela 2.2: Exigências para uso de agregados graúdos de RCD reciclados em concreto (ANGULO, 2004b) .....	40
Tabela 2.3: Exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado. ....	41
Tabela 2.4: Padrões e recomendações européias para a confecção do concreto com agregado reciclado (MÜLLER, 2006). ....	41
Tabela 2.5: Norma DIN 4226-100. ....	42
Tabela 2.6: Classificação dos RCD segundo RILEM. ....	43
Tabela 2.7: Classificação da granulometria do minério de ferro (USIMINAS).....	51
Tabela 3.1: Composição Química do resíduo de construção e demolição.....	69
Tabela 3.2: Análise granulométrica do resíduo de construção e demolição. ....	69
Tabela 3.3: Composição da escória granulada de alto-forno .....	70
Tabela 3.4: Composição da moinha de coque .....	70
Tabela 3.5: Composição do calcário .....	71
Tabela 3.6: Composições das amostras .....	71
Tabela 3.7: Tipos de agregados utilizados nas argamassas fabricadas .....	74
Tabela 4.1: Composição Química do sinter da mistura 6.....	89
Tabela 4.2: Caracterização do agregado de sinter .....	90
Tabela 4.3: Composição Química da área 1 da Figura 4.26. ....	96
Tabela 4.4: Composição Química da área 2 da Figura 4.26. ....	97



Tabela 4.5 : Composição Química da área 3 da Figura 4.26. ....	97
Tabela 4.6 : Composição Química da área 4 da Figura 4.28. ....	98
Tabela 4.7: Composição Química da área 5 da Figura 4.28. ....	99
Tabela 4.8: Composição Química da área 6 da Figura 4.30. ....	100
Tabela 4.9: Composição Química da área 7 da Figura 4.34. ....	103
Tabela 4.10: Composição Química da área 8 da Figura 4.34. ....	103

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

CMN – Comitê Mercosul de Normalização

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

SLU – Secretária de Limpeza Urbana de Belo Horizonte

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

# 1. INTRODUÇÃO

---

A construção civil é uma geradora contínua de resíduos, independente das atitudes preventivas durante o projeto e a execução, uma vez que a mesma tem uma determinada vida útil. Além disso, os grandes geradores são os pequenos e médios construtores que ainda não se conscientizaram para esta preocupação.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são constituídos basicamente por madeira, plástico, papel, ferro, pedaços de concretos, tijolos, telhas e argamassas. Os quatro primeiros (madeira, plástico, papel e ferro), se separados, tem mercado para reciclagem. Quanto aos resíduos de materiais cimentícios e argilosos, estes são comumente destinados aos aterros. No caso de algumas poucas cidades, como Belo Horizonte, são destinados às centrais de reciclagem, nas quais o material de origem cerâmica é britado em diferentes granulometrias e peneirado. Os produtos são classificados em três faixas granulométricas. Na Usina do Aterro, a mais moderna da capital mineira, o material de granulometria de diâmetro compreendido entre 9,5 mm e 19,05 mm é classificado como brita 1, o entre 4,76 mm e 9,5 mm é classificado como brita 0 e todo material de tamanho inferior a 4,76 mm é classificado como fino. Esse fino, gerado em grande quantidade, tem comumente como destino as células do aterro sanitário. A possibilidade de utilização desse material como agregado miúdo tem sido descartada em muitos países e pouco estudada, pois existem obstáculos devido a sua grande quantidade de material pulverulento (EVANGELISTA, 2007; SOUZA, 2006; MÜLLER, 2004 e ANGULO, 2004b).

A pelletização e a sinterização são processos de aglomeração de finos que surgiram na década de 60 com o objetivo de consumir os finos de minério de ferro gerados pelas usinas de tratamento do mesmo. São processos, a princípio, considerados caros, mas que com o correr dos anos e das

necessidades ambientais se tornam processos altamente viáveis. Hoje esses processos são essenciais para a produção de gusa em alta escala.

Sob a ótica do desenvolvimento sustentável, uma solução técnica que hoje ainda não se justifica se considerados aspectos econômicos e ambientais, pode ser a solução em alguns anos, se o meio ambiente for afetado de forma significativa. Dentro desse contexto, esse trabalho se propõe a avaliar a possibilidade técnica de fabricar agregados de finos de RCD, através de processos de aglomeração.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Visando contribuir para o desenvolvimento sustentável, este trabalho tem o objetivo de verificar a possibilidade de sinterizar os finos de resíduos da construção civil para utilizá-los na confecção de argamassas para concretos estruturais.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Estudar o aproveitamento de finos de resíduos de construção e demolição utilizando o processo de sinterização;
- b) Obter uma mistura adequada para sofrer o processo de sinterização;
- c) Avaliar a possibilidade de utilização do sinter-produto como agregado graúdo e miúdo para o concreto.

## **1.2. Métodos**

O presente trabalho realiza uma pesquisa bibliográfica dividida em três partes. A primeira aborda o desenvolvimento sustentável, no que diz respeito às construções sustentáveis. Em uma segunda etapa são estudados os agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) e na terceira é apresentada a revisão sobre os processos de aglomeração de finos.

Após a obtenção da base teórica, seis misturas de diferentes composições e materiais foram feitas para a obtenção de um sínter-produto adequado. Em seguida, este sínter-produto escolhido passou por britagem e separação em faixas granulométricas, sendo utilizado como agregado miúdo nas argamassas para concretos estruturais. Corpos-de-prova foram confeccionados com argamassas para concretos estruturais com três agregados miúdos diferentes, com composições variadas. Esses corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água e análise microestrutural.

## **1.3. Justificativa e relevância do tema**

O crescente aumento da geração do resíduo de construção preocupa cada vez mais os órgãos ambientais. Os resíduos de construção civil são normalmente, descartados em aterros causando um enorme problema físico e ambiental. A maioria das cidades estão com seus aterros esgotados não possuindo mais áreas disponíveis para este fim. No caso específico da cidade de Belo Horizonte, a vida útil do atual aterro já atingiu seu ápice.

O estudo envolvendo a reutilização/reciclagem do resíduo de construção civil tem grande importância tanto no aspecto sócio-econômico como no ambiental. O uso desse passivo ambiental na construção civil poderá contribuir com a minimização da disposição do mesmo e possibilitar a redução da utilização de

matérias-primas naturais. A utilização de RCD de tamanhos superiores a 4,8mm tem sido uma prática vitoriosa. No entanto, a utilização dos finos de resíduos de construção civil tem encontrado barreiras e há poucos trabalhos sobre a sua aplicação. Este trabalho visa contribuir para que o mesmo tenha maior utilização. Cabe ressaltar, que é um trabalho pioneiro no Brasil, sendo que em termos mundiais, existe apenas na literatura um relato sem detalhes sobre a sinterização de RCD (MÜLLER, 2004).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

Neste capítulo são abordados os temas relevantes do levantamento bibliográfico realizado. São eles: construção sustentável, agregados de resíduos de construção e demolição (RCD), propriedades dos concretos fabricados com agregados de RCD e processos de aglomeração de minério de ferro. A revisão evidencia a escassez de dados encontrados na literatura científica sobre aproveitamento de finos (fração menor que 4,8 mm) de resíduos de construção civil.

### **2.1. Construção sustentável**

Só nas últimas décadas a sociedade mundial começou a se preocupar com questões ambientais, que passaram a ser discutidas em várias conferências. De acordo com FLORIM (2004) foi na Conferência das Nações Unidas, em Estocolmo, em 1972, que oficializou-se o surgimento de uma preocupação internacional sobre problemas ambientais. Em 1987, a ONU estabelece no relatório de Brundtland o conceito de desenvolvimento sustentável: “é o desenvolvimento que vai de encontro às necessidades do presente sem comprometer a habilidade de futuras gerações de satisfazer as suas próprias necessidades” (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000). Este conceito engloba aspectos econômicos, sociais, ambientais e todos os setores da sociedade e surgiu da necessidade de se definir limites ecológicos para o crescimento da vida humana e suas necessidades (FLORIM, 2004 e OTT, 2004). JOHN (2001) acredita que para que uma sociedade seja realmente sustentável são necessárias transformações radicais na maneira de morar, nos padrões de consumo e nos processos de produção, enfim, uma mudança de paradigma que não se baseia em uma sociedade industrial. Essa mudança consiste em um processo gradual à longo prazo, que resulta em

melhoria de qualidade de vida para a população. OTT (2004) afirma que para que haja o desenvolvimento sustentável, além das mudanças individuais de paradigmas, é fundamental que a gestão pública se adapte às mudanças impostas pelos problemas atuais, mude padrões e reinvente.

As diretrizes para o desenvolvimento sustentável foram delineadas na ECO-92 (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento) e estão expressas na Agenda 21 GLOBAL. Segundo OTT (2004) a conferência teve como principais objetivos: conciliar a justiça social, a eficiência econômica e o equilíbrio ambiental, mudando assim, o padrão de desenvolvimento do século XXI.

A conscientização do setor de construção civil só se inicia em 1995 quando foi criada a Agenda Habitat II (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000) que enfatiza a importância socioeconômica do segmento da construção civil para o país. No entanto a preocupação do setor com o desenvolvimento sustentável só se consolida em 1999 com a publicação do relatório do CIB (The International Council for Research and Innovation in Building and Construction) “Agenda 21 on Sustainable Construction “(PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000). Neste documento são detalhados conceitos, aspectos e desafios para tornar a indústria da construção mais sustentável em países desenvolvidos, pois países em desenvolvimento apresentam outras realidades, e conseqüentemente outras necessidades. Na conferência Sustainable Building 2000, realizada na Holanda, houve o início da integração dos países em desenvolvimento e o comprometimento de acompanhar pró-ativamente as orientações do CIB, estimulando intervenções e iniciativas para a construção sustentável. Cerca de um mês depois dessa conferência foi realizada o CIB Symposium on Construction and the Environment, em São Paulo, onde o Programme Committee declarou apoio ao desenvolvimento de uma Agenda 21 para os países em desenvolvimento. Ainda em 2002, o Brasil formalizou a sua integração ao Projeto Green Building Challenge (consórcio internacional desvinculado de certificações ambientais), cujo objetivo é o desenvolvimento



de uma metodologia genérica de avaliação das modificações para a adaptação as necessidades locais.

A construção sustentável aborda o desenvolvimento sustentável no âmbito da indústria da construção civil. Ela particulariza um conceito global de forma interdisciplinar, envolvendo aspectos ambientais, econômicos e sociais (FLORIM, 2004). A adoção da construção sustentável é de interesse prioritário uma vez que o setor é responsável em 2004 por 5,1% do PIB (IBGE, 2007), ao mesmo tempo que, consome grandes quantidades de recursos naturais e energia, libera poluentes e gera resíduos.

Na União Européia as construções são responsáveis por mais de 40% do consumo de energia total (BOURDEAU, 2000). Além disso, a fabricação do cimento Portland contribui para o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, pois na fabricação de uma tonelada de clínker de cimento Portland é liberada uma tonelada de CO<sub>2</sub>, o que equivale a aproximadamente 7% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (MEHTA, 2005). Tal fato tem sido balanceado pela produção de um cimento misturado com escória granulada de alto forno e cinzas volantes (JOHN, 2000). Além disso, mesmo que se adote um conjunto articulado de ações para gerenciamento do processo, a construção leva à geração de resíduos, comumente devido a deficiências nos processos construtivos, perdas no transporte e na estocagem inadequada de materiais e mesmo, devido à utilização de materiais de má qualidade. De acordo com ZORDAN (1997), o desperdício na obra corresponde a cerca de 30% dos materiais utilizados. Há discordância sobre esse valor, outros autores falam em aproximadamente 20%. Considerando todos os resíduos gerados durante a produção de materiais de construção, é possível afirmar que a indústria da construção é o maior gerador de resíduos em muitos países: ele chega a contribuir em até 40% do total de resíduo gerado (CIB, 1999). Os resíduos de construção também são gerados por demolições, reformas e reconstruções.

O resíduo de construção e demolição é um dos mais importantes resíduos sólidos municipais. Seu gerenciamento é difícil e oneroso, sendo proporcional ao volume produzido, quanto maior o volume, maior a dificuldade de gerenciamento e o custo (FREIRE, 2003 e ZORDAN, 1997).

Em todo o mundo supõe-se que são gerados de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano (VIEIRA, 2004b). Na Europa, mais de 200 milhões de toneladas de resíduo de construção e demolição mineral heterogêneo são produzidos todos os anos. Há uma grande variação desses números, devido aos critérios de classificação, ao controle da geração dos resíduos, as tecnologias e aos materiais empregados em cada país. Por exemplo, na Europa, entre os seus estados, a quantidade de reciclagem de resíduo de construção e demolição mineral varia de: 5% até 90% (MÜLLER, 2004). O Brasil não possui números precisos em relação à quantidade gerada de resíduos de construção e demolição (RCD), mas estima-se que só a cidade de São Paulo gera 4.000 toneladas de RCD por dia (ANGULO, 2004b). Em Belo Horizonte, 51% dos resíduos coletados na cidade são de construção e demolição (VIEIRA, 2004b).

Os resíduos gerados, em maior ou menor quantidade, têm de ter destino adequado. Normalmente, segundo FACHIN (2004), os resíduos são retirados das obras e jogados em aterros sanitários, depósitos clandestinos, margens de rios ou na periferia das cidades. De acordo com a legislação vigente (Resolução do CONAMA 307 de 2002) que estabelece diretrizes, critérios e procedimento para a gestão dos resíduos de construção civil, os grandes geradores têm de fazer a coleta seletiva e dar destinos pré-estabelecidos para cada classe de resíduo. Para todos os tipos de resíduos seria de grande importância que os mesmos fossem reaproveitados, pois isto reduziria o volume em aterros e deposições clandestinas. JACOMINO (2002) ressalta que eles podem ser reciclados, recuperados ou reutilizados. A reciclagem é a ação de coletar, reprocessar e utilizar materiais antes considerados lixo, de fácil purificação. A reciclagem não envolve processos químicos e físicos de tratamento que recuperam os materiais, que muda a constituição do resíduo,

isto é denominado tratamento de resíduo. O ato de reciclar faz com que o material que não se degrada facilmente volte a sua origem, na forma de matéria-prima, sendo reprocessado, mantendo suas características básicas. Já a recuperação envolve algum tipo de tratamento para a separação de fases ou frações de materiais e a reutilização é designada quando o reaproveitamento é direto, sob a forma de um produto.

No setor da Construção Civil a prática de reutilização não é usual. Na Conferência *Rethinking Sustainable Construction 2006-Next Generations Green Buildings* (2006), fica claro que a reciclagem envolve processos que demandam um alto gasto de energia e podem produzir subprodutos que poderiam causar danos ao meio ambiente. Essa prática deve ser priorizada e considerada na fase de projeto. Nos grandes centros, a reciclagem de resíduos de construção contribui para a diminuição de gastos dos municípios e para o aumento da vida útil dos aterros. No caso de resíduos cerâmicos, que é o maior volume gerado pelo setor, a reciclagem é feita através de britagem e peneiramento, levando à produção de agregados. Ou seja, a reciclagem além de contribuir para o meio ambiente, ao transformar o resíduo em matéria-prima, introduz no mercado um novo material, com grande potencialidade de uso. Uma outra possibilidade para a utilização de resíduos de demolição é o emprego, nos moldes investigados em países como Holanda, Japão e Espanha, como matéria-prima para cerâmica de revestimento, vidro e cimento. Tais potenciais de utilização são devidos à alta porcentagem de sílica presente na parcela mineral do resíduo da construção. Segundo ANGULO *et al* (2002), a substituição de até 30% da matéria-prima para a fabricação de cerâmica vermelha, de cerâmica de revestimento e de cimento poderia empregar algo em torno de 60% de todo o RDC produzido no Brasil.

## 2.2. Resíduo de construção e demolição

### 2.2.1. Conceito e classificação de RCD

LEITE (2001) define como resíduo de construção aquele que é proveniente de construções, reparos, reformas e demolições de estruturas e estradas. Em 1999, Lima (LEITE, 2001) propôs a classificação abaixo, considerando os seguintes fatores: tipos diferentes de resíduos disponíveis para a reciclagem, as especificações para os agregados reciclados em usos atuais e potenciais; sistemas de classificação já disponíveis no Brasil e no exterior; condições de operação das centrais de reciclagem; experiências estrangeiras onde a reciclagem já está implantada há mais tempo e necessidade de consumir quantidades significativas de resíduo.

- Classe 1: Resíduo de concreto sem impurezas: material composto de concreto estrutural, simples ou armado, com teores limitados de alvenaria, argamassa e impurezas;
- Classe 2: Resíduo de alvenaria sem impurezas: material composto de argamassa, alvenaria e concreto, com presença de outros inertes como areias, pedras britadas, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- Classe 3: Resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas: material composto de argamassa, concreto e alvenaria com baixo teor de materiais cerâmicos, podendo conter outros materiais inertes como areia e pedra britada, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- Classe 4: Resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação: material composto basicamente pelos mesmos materiais do resíduo classe 2, porém admite a presença de determinada porcentagem em volume de terra ou terra misturada à vegetação. Admite maior teor de impurezas.

- Classe 5: Resíduo composto por terra e vegetação: material composto basicamente por terra e vegetação, com teores acima do admitido no resíduo de classe 4. Admite presença de argamassa, alvenarias e concretos, e outros materiais inertes, além de maior teor de impurezas que os anteriores.
- Classe 6: Resíduo com predominância de material asfáltico: material composto basicamente de material asfáltico, limitando-se a presença de impurezas como argamassas, alvenarias, terra, vegetação, gesso, vidros e outros.

A Resolução nº 307/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece que os resíduos de construção civil são aqueles resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Os resíduos de construção são classificados como:

- Classe A: São resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de demolição, de construção, reformas e reparos de edificações (componentes cerâmicos-tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento); de processo de fabricação e/ ou demolição de peças pré-moldadas em concretos (blocos, tubos, meios-fios), produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B: São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papelão/papel, metais, vidros, madeira e outros.
- Classe C: São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
- Classe D: São os resíduos perigosos oriundos do processo de

construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

## 2.2.2. Constituição do resíduo de construção e demolição

De acordo com Pinto (1986) apud Vieira (2004a) esta mistura é basicamente constituída de 60% de argamassa, 30% de tijolos e cacos cerâmicos, 9% de outros materiais (pedra, areia, concreto, metais e plásticos) e 1% de material orgânico.

Vale lembrar que os resíduos não são constituídos somente de minerais não metálicos, adequados à produção de agregados, mas possuem outras frações: metais ferrosos e não ferrosos, plásticos, madeira e até mesmo gesso de construção (ANGULO, 2004b).

As composições médias de RCD em algumas centrais de reciclagem brasileiras são mostradas na Tabela 2.1. A distribuição da composição média de resíduos de construção em Maceió (Alagoas) é mostrada na Figura 2.1.

Tabela 2.1: Composições médias de RCD em algumas centrais de reciclagem brasileiras (ANGULO, 2002b).

Composição (%)	São Paulo	Salvador	Ribeirão Preto		
	BRITO (1999)	CARNEIRO et Al. (2001)	ZORDAN (1997)		
			mínima	média	máxima
Concretos	8	53	20	21	22
Argamassas	24		35	37	39
Materiais cerâmicos	33	15	16	23	30
Solos	30	21			
Materiais orgânicos	1	4			
Outros	4	7	10	19	28

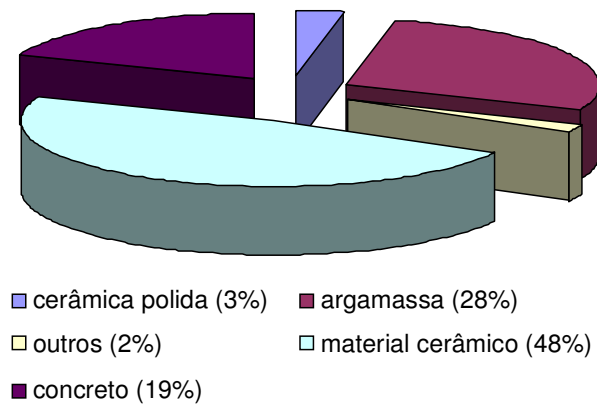


Figura 2.1: Distribuição da composição média de resíduos de construção coletadas em Maceió-AL (VIEIRA, 2004a).

A qualidade do resíduo obtido depende de alguns fatores, entre eles: tipo de obra, técnicas construtivas, fase em que se encontra a obra, características sócio-econômicas da região considerada (VIEIRA, 2004b). A origem do resíduo é muito importante, pois determina os tipos de impurezas e contaminantes que podem fazer parte da composição do resíduo. A avaliação de características físico-químicas dos RCD é que determinam as possíveis aplicações dos mesmos, ao mesmo tempo, que indicam seu impacto ao meio ambiente (JOHN, ?). As impurezas devem ser retiradas logo que detectadas a sua presença. Entretanto, isso não é um processo fácil e muito menos financeiramente econômico, principalmente quando sua retirada é feita manualmente (LEITE, 2001).

### 2.2.3. Beneficiamento do resíduo

O beneficiamento do resíduo de construção e demolição envolve a coleta, o transporte, sua separação, britagem, peneiramento e estocagem para posterior utilização. Normalmente, este beneficiamento é feito em centrais de reciclagem.

As centrais de reciclagem RCDs vêm ganhando espaço no Brasil e, quando inseridas em políticas públicas adequadas, têm contribuído decisivamente para

a solução dos impactos urbanos e redução de custos gerados pela deposição irregular desses resíduos. Embora seja um passo importante do ponto de vista tecnológico e ambiental, a introdução de centrais de reciclagem não soluciona o problema de forma global (ANGULO, 2004b).

De acordo com BRITO FILHO (1999) apud LEITE (2001) é necessário que haja três pré-requisitos básicos a serem seguidos:

- O volume de geração de resíduos de construção e demolição possível de ser reciclado;
- O tipo de material e a aplicação que se pretende dar para o mesmo;
- O local de instalação da unidade recicladora.

Seu local de instalação é muito importante para o sucesso da mesma. Ele deve ser próximo aos locais das fontes geradoras e dos locais de uso, isto implica estar localizado na área urbana, mas não em locais centrais, pois sobrecarregaria o trânsito acarretando um problema de fluxo viário. Dessa forma, o ideal é que as centrais de reciclagem estejam próximas aos aterros, pois já existe uma infra-estrutura adequada, reduzindo custos (LEITE, 2001).

Algumas medidas devem ser tomadas para que haja um menor impacto ambiental devido a sua instalação. Uma delas é a plantação de cerca viva no entorno da central, para que haja retenção da poeira e do ruído, além de melhorar o seu aspecto estético. Outra medida é revestir o britador com manta anti-acústica e os locais de impacto com manta de borracha para reduzir o ruído. Para que haja uma redução na geração de pó é adequado instalar aspersores nas saídas e entradas de material (LEITE, 2001).

O Brasil possui em torno de 12 centrais de reciclagem (ANGULO, 2004a), a grande maioria, situadas no estado de São Paulo. A cidade de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais, possui 3 centrais de reciclagem de resíduo: Estoril, Pampulha e do Aterro (Figura 2.2). A Usina do Estoril tem capacidade de



produzir 15 toneladas/hora e a Usina da Pampulha, 30 t/h (SLU, 2006). A cidade conta com um programa de reciclagem de resíduos desde o final da década de 90. As três usinas operam abaixo do limite devido à falta de RCD adequado.



Figura 2.2: Central de reciclagem do Aterro (Belo Horizonte-MG).

As centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição brasileira são simples comparadas com as do exterior possuem apenas alimentador, britador, transportador de correia e eletroímã. Os procedimentos e equipamentos empregados nas centrais são muito importantes porque afetam as características dos agregados reciclados como: a sua composição, o teor de impurezas, a granulometria, a forma e a resistência dos grãos (ANGULO, 2004b). No exterior há o uso de usinas móveis, montadas em carretas.

Um dos grandes problemas enfrentados pelas centrais de reciclagem é heterogeneidade do material. De acordo com ANGULO (2004b) não há no Brasil uma preocupação com a demolição seletiva, sendo assim, o produto reciclado é normalmente misto, composto de mistura de concretos, cerâmicas, rochas naturais, entre outros. Segundo ANGULO (2001c), esta grande variabilidade do material afeta principalmente as propriedades dos materiais gerados com estes resíduos. Estudos mostram que para haver uma diminuição na variabilidade é necessário que pilhas de homogeneização de três a quatro semanas sejam realizadas. De acordo com VIEIRA (2004b), esta variabilidade

é uma das maiores dificuldades enfrentadas para o aproveitamento deste material pela indústria.

Estudos mostram que vários aspectos influenciam o sucesso da implementação de programas de reciclagem. Os aspectos mais significativos são: socioeconômicos e administrativos. De posse dessas variáveis, fica mais fácil contribuir para um melhor planejamento de estratégias que facilitam a implantação desses programas (COSTA, 2004). Para que a reciclagem de RCD seja um sucesso é necessário uma prática educativa que sensibilize e dê informação aos grandes e pequenos geradores, para que sejam apoios importantes para a implementação de um programa que enfoque a prevenção e redução dos desperdícios na obra (AZEVEDO, 2006).

Os resíduos reciclados são comumente usados como materiais para base e sub-base (quando o RCD é submetido apenas a limpeza e a peneiramento), e como agregados para concretos e argamassas (após limpeza e sucessivas britagens/ peneiramentos). A incorporação de valor ao RCD poderia incentivar o uso desse material.

O consumo anual de agregados naturais na Europa é de aproximadamente 2 milhões de toneladas. No entanto, somente 3% desse consumo de agregados poderia ser substituídos pelos agregados reciclados, devido a falta de tecnologias aplicáveis e eficientes. Dominando tais tecnologias, este número poderia aumentar, chegando até 8 a 10% (MÜLLER, 2004).

Em alguns municípios brasileiros, o consumo médio de agregados representa tipicamente cerca de 63% da massa de RCD gerada. Para que todo esse resíduo seja reciclado e tenha mercado, é necessário que o seu uso não se restrinja apenas a pavimentação e que o setor privado se disponha a utilizá-lo (ANGULO, 2004b).

A reciclagem de resíduos cerâmicos apresenta outros três grandes problemas. De um lado a reciclagem gera resíduos, o que pode significar risco ambiental, técnico, financeiro e de saúde dos trabalhadores e usuários (JOHN, ?). Além

disso, envolve altos gastos energéticos durante o processo. Por outro lado a britagem gera um volume muito elevado de finos (menores que 4,8 mm) que comumente não podem ser utilizados como agregados. EVANGELISTA e BRITO (2007) afirmam que a substituição em até 30% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado (0,074 a 1,19 mm) resultou em boa resistência à compressão, módulo de elasticidade aceitável e parece aumentar a resistência à abrasão. Segundo SOUZA (2006), a substituição de 25% da areia comum por agregado reciclado não altera de forma significativa a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos concretos.

Algumas técnicas têm sido pesquisadas com o objetivo de recuperar o RCD, e não apenas reciclá-lo. Uma delas consiste em submeter o RCD de concreto a vibrações ultrasônicas, o que promoveria a separação dos agregados graúdo da mistura que assim poderia ser reutilizado na sua forma natural e descartado a argamassa do concreto (MÜLLER, 2006). Uma segunda técnica estudada é a de separação por líquidos densos. ANGULO (2004a) mostra que o produto flutuado em líquido com  $1,9 \text{ kg/dm}^3$  concentrou madeiras, papel e materiais betuminosos, que são considerados contaminantes. Dessa forma foi possível separar agregados de RCD com densidade acima de  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , que são predominantemente de rochas naturais, envolvidas por uma camada de pasta de baixo teor de cimento endurecida. Cabe lembrar que agregados de RCD com densidade variando entre  $1,9$  e  $2,5 \text{ g/cm}^3$  são compostos predominantemente por cerâmicas (vermelha e branca) e partículas cimentícias, de teor de pasta superior ao de partículas mais densas.

## **2.2.4. Agregados reciclados**

### **2.2.4.1. Características do agregado reciclado**

O agregado reciclado oriundo de um RCD rico em concreto apresenta grande potencial de aplicações devido as suas propriedades e seu menor grau de contaminação por outros materiais quando comparado com os outros resíduos

de construção (BUTTLER, 2005).

Segundo estudo de ANGULO (2004b) durante o beneficiamento do RCD há uma grande geração de agregados miúdos, que chega a ser duas a três vezes maior do que a geração de agregados graúdos. Estes elevados teores de agregado miúdo podem estar relacionados com a natureza do resíduo (de demolição), regulagem e tipo de equipamento de britagem. O grande problema é que não é comum a utilização para esta fração e futuramente, esta fração de resíduo tende a aumentar devido a expansão do uso de materiais de construção leve. Segundo MÜLLER (2004), uma solução inovadora consistiria na produção de grãos expandidos termicamente, que poderiam ser utilizados como agregado leve para o concreto. A matéria-prima para este produto seria uma mistura heterogênea de entulho de alvenaria. Seria um processo semelhante ao utilizado para produção de agregados leves a partir de sedimentos finos (MENG e CHAO, 2007). Apesar dessas possíveis soluções, WAHLSTROM e SCHULTMANN (ANGULO, 2004b) consideram que a grande porcentagem de finos pode dificultar a reciclagem do RCD, uma vez que a utilização dos agregados miúdos de RCD reciclados ainda não ganhou aceitação para uso no meio técnico nacional e internacional em razão de poder conter os maiores índices de contaminação (compostos orgânicos voláteis, metais pesados, etc).

Depois de britados, os agregados reciclados tendem a formas mais angulares, com maior relação área superficial/volume do que os agregados naturais (mais arredondado). Isto resulta em maior fricção interna dos agregados reciclados, requerendo mais argamassa para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido (LEITE, 2001).

Sua textura é geralmente mais rugosa e porosa do que os agregados naturais. Segundo LEITE (2001), a classificação das superfícies dos agregados reciclados vai de áspero a muito áspero, já os agregados naturais são considerados de superfície polida.

A textura mais rugosa do agregado reciclado promove maior absorção da pasta de cimento pelos seus poros superficiais quando comparado ao agregado natural. Isto poderia proporcionar uma maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, permitindo um maior fechamento da zona de transição do concreto, tornando a matriz e o agregado um material único, podendo melhorar o desempenho final do concreto (LEITE, 2001). Outros fatores que também influenciam a aderência são apontados por SAGOE-CRENTSIL (1998) *et al* apud LEITE (2001) como sendo: o tamanho da partícula e a forma do agregado.

A massa específica e a massa unitária dos agregados reciclados geralmente são um pouco inferiores do que a dos agregados naturais. O conhecimento destes valores é importante para que haja uma dosagem correta do concreto, evitando assim, uma distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos com o mesmo traço (LEITE, 2001).

Os agregados reciclados possuem índice de absorção de água muito mais alto do que os agregados naturais, devido a sua grande porosidade e a quantidade de finos presentes resultantes da britagem (ZORDAN, 1997). Segundo LEVY (1997) apud LEITE (2001), quanto maior a quantidade de material cerâmico no agregado reciclado, maior será a absorção de água. A alta absorção de água dos agregados reciclados é muito importante porque influencia diretamente na relação água/cimento final das misturas. Isto quer dizer que é necessário à adição de mais água quando se utiliza agregado reciclado comparando com um mesmo traço feito de agregado natural. Assim, para manter a resistência é necessário um consumo maior de cimento, o que acarreta um custo maior do concreto produzido (LEITE, 2001). Segundo SALES (2004) argamassas e concretos com agregados reciclados absorvem mais água que os convencionais, porém utilizando-se agregados reciclados de concreto a absorção tende a ser menor do que utilizando agregados reciclados de alvenaria. Atualmente é comum a prática da compensação de água quando se trabalha com agregado graúdo reciclado (NUNES, 2007).

Os agregados reciclados apresentam menor resistência ao impacto e menor resistência ao desgaste por abrasão que os agregados naturais. Pesquisas nacionais têm chegado a conclusões similares sobre a utilização de agregados reciclados em concretos. Concretos com esses agregados tem alcançado bons resultados em relação à resistência mecânica dependendo da porcentagem utilizada, apesar do aumento da porosidade e da diminuição da condutividade de íons cloreto em determinados níveis de substituição (VIEIRA, 2004b).

Estudos mostram que antes da utilização dos agregados graúdos na mistura é necessário a lavagem dos mesmos. Esta prática é recomendada para que não haja uma absorção de água pelos finos aderidos ao agregado graúdo, facilitando a trabalhabilidade do concreto (VIEIRA, 2004b e JUAN e GUTIÉRREZ, 2004b). Além disso, concretos reciclados com agregados graúdos lavados obtiveram valores de 90% da resistência à compressão e flexão em relação às referências. Se a lavagem não é realizada, sugere-se que haja uma compensação de água de 50% da taxa de absorção dos agregados (VIEIRA, 2004b).

Recomenda-se que a composição dos resíduos utilizados para a produção de agregados reciclados, não contenham gesso, pois provoca reações de expansão, podendo causar fissuras no concreto (VIEIRA, 2004b).

De acordo com ANGULO (2001), a massa específica e absorção de água para identificar teores de concreto e argamassa devem estar entre as técnicas de caracterização de agregados graúdos. Os métodos convencionais de caracterização física utilizados para agregados naturais podem e devem ser aplicados em centrais de controle de qualidade. Fatores como granulometria, índice de forma, absorção e massa específica são simples e fornecem padrões de comportamento desta matéria-prima. Além disso, o método de análise de imagem mostrou-se eficiente.

Somente uma caracterização adequada dos agregados produzidos a partir dos resíduos de construção e demolição permitirá melhor difusão do seu uso em

concretos. É necessário que haja um grande conhecimento sobre o comportamento do material reciclado dentro das misturas de concreto, havendo assim um produto com melhor qualidade e com maior aceitação no mercado (LEITE, 2001).

#### **2.2.4.2. Aplicações do agregado reciclado**

Os agregados de resíduo são utilizados para confecções de argamassas, concretos asfálticos e de cimento Portland.

A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor do que a do concreto convencional, devido à própria massa específica do agregado reciclado. Vale lembrar que a composição dos resíduos também influencia no valor da massa específica. A massa específica do concreto será maior, quanto mais denso forem os materiais que constituem o resíduo (LEITE, 2001).

Os concretos com agregados reciclados apresentam menor trabalhabilidade, devido a grande porosidade causada pelo agregado reciclado, fato que aumenta a absorção de água, diminuindo a quantidade de água livre da mistura. De acordo com HANSEN (1992) apud LEITE (2001) a utilização de agregados miúdos reciclados parece reduzir ainda mais essa trabalhabilidade.

A alta taxa de absorção dos agregados reciclados é um fator preponderante para a heterogeneidade dos valores de índice de abatimento medidos nos concretos reciclados. Para solucionar este problema, aconselham pré-umedecer os agregados reciclados, antes da mistura para a preparação do concreto. Outra maneira de solucionar este problema é usar aditivos plastificantes, porém acarreta um elevado aumento de custo de produção. O uso de agentes redutores de água aumentam as resistências dos concretos com agregados reciclados. A utilização de agentes incorporadores de ar e de cinzas volantes podem melhorar a durabilidade e a trabalhabilidade dos mesmos (LEITE 2001).

Quanto maior a quantidade de areia reciclada maior é a permeabilidade do concreto, sendo também maior a sua permeabilidade superficial (LEITE, 2001).

Vários autores citados por HANSEN (1992) apud LEITE (2001) afirmam que houve uma diminuição de 5 a 20% da resistência dos concretos fabricados com agregados graúdos reciclados em relação ao concreto referência. WAINWRIGHT *et al* (1993) apud LEITE (2001) afirma que a utilização de agregado miúdo reciclado parece afetar mais ainda esta redução de resistência à compressão.

Concretos com agregados reciclados de concreto apresentam menor resistência ao gelo-degelo e maior retração por secagem quando comparados aos concretos confeccionados com agregados naturais, porém quando há uma adição de aditivos incorporadores de ar, a resistência ao gelo-degelo do concreto com agregado reciclado se torna a mesma do concreto convencional (KASAI e FUJII, 1989 apud LEITE, 2001).

Em relação à resistência a carbonatação de acordo com estudos realizados por LEITE (2001), os concretos com agregados reciclados apresentaram menor frente de carbonatação do que os concretos convencionais. Já os concretos com agregados miúdos reciclados apresentaram maior frente de carbonatação do que os concretos com agregados graúdos reciclados.

É importante lembrar que o grande problema a ser enfrentado na fabricação de concretos com agregados de RCD é a variabilidade dos agregados reciclados produzidos, que afetam diretamente as propriedades dos componentes de concreto (ANGULO, 2004b). Dessa forma, os países que utilizam esses agregados colocam restrições ao uso dos mesmos.

A Tabela 2.2 apresenta algumas recomendações quanto ao uso desses agregados para confecção de concretos no Japão (ANGULO, 2004b).



Tabela 2.2: Exigências para uso de agregados graúdos de RCD reciclados em concreto  
(ANGULO, 2004b)

Exigências	Japão
Natureza do resíduo	concreto <sup>(2)</sup>
Max RC <sup>(4)</sup> (MPa)	18
Condições de exposição	nd <sup>(5)</sup>
Aplicação	fundações edifícios comerciais térreos
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	>2.200
Absorção (% em massa)	<7
Passante # 0,075mm (% em massa)	<1
Teores de fases < (em massa)	10 kg/m <sup>3</sup> ou 0,77% argamassa e revestimento <sup>(3)</sup> (d< 1,95 kg/dm <sup>3</sup> )
Máximo de contaminantes <sup>(1)</sup> em massa	2 kg/m <sup>3</sup> ou 1% <sup>(3)</sup>
Teor de sulfatos	nd
Expansão por reação álcali-agregado	nd
Outros	nd

<sup>(1)</sup> Contaminantes são materiais betuminosos, madeira, vidro e outros que não fases como concretos, argamassas e cerâmicas.

<sup>(2)</sup> Resíduo proveniente da demolição de concretos ou alvenarias. É possível que a alvenaria demolida seja com blocos de concreto e não com blocos de cerâmica.

<sup>(3)</sup> Cálculo realizado considerando-se a massa unitária dos agregados graúdos de RCD reciclados como 1.300 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>(4)</sup> RC significa resistência à compressão aos 28 dias.

<sup>(5)</sup> nd significa indefinido.

Nas Tabelas seguintes (2.3 e 2.4) são descritas as exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado e os padrões e recomendações européias.

Tabela 2.3: Exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Porção de agregado > 4 mm		Acima de 100%	
Uso de areia reciclada < 4 mm		Não recomendado	
Resistência mecânica máxima	C16/20	C50/60	Sem limite superior
Condições de exposição	Nenhum teste adicional para concreto usado sob condições secas ou em não-agressivos solos e/ou água, não exposição de gelo-degelo. Testes adicionais para concretos usados sob outras condições de exposição.		

Tabela 2.4: Padrões e recomendações européias para a confecção do concreto com agregado reciclado (MÜLLER, 2006).

	Classificação		Substituição	
	Densidade	Composição	Agregados Miúdos	Agregados Graúdos
Bélgica	+	+	Permitido com restrições	Acima de 100%
Dinamarca	+	+	Limitado (20%)	Acima de 100%
Alemanha	+	+	Não permitido	Acima de 45%
Holanda	+	+	Limitado (20%)	Acima de 20%
Suíça	-	+	Permitido	Dependência da aplicação
Inglaterra	-	+	Não permitido	Acima de 20%

Os dados acima indicam que não existe uma concordância quanto ao controle e substituição do agregado. Cabe destacar que apesar da recomendação da RILEM alguns países aceitam o uso de finos.

Na Alemanha as restrições são ainda mais específicas e descritas na norma do *Deutsches Institut für Normung* - DIN 4226-100 (Tabela 2.5). Essa norma também exige que a fração fina menor que 0.063 mm seja abaixo de 4% em massa. É interessante observar que esta classificação não segue os parâmetros de classificação dos RCD's segundo a RILEM (Tabela 2.6).

Tabela 2.5: Norma DIN 4226-100.

Constituintes [% em massa]	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
DIN 4225-100: Agregados reciclados	Resíduo de concreto + areia britada	Resíduo de construção + areia britada	Resíduo de alvenaria + areia britada	Resíduo misto + areia britada
Concreto e agregados naturais. DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Clínker, tijolo	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Tijolo cal-areia			≤ 5	
Outros materiais minerais (Ex: tijolos quebrados, concretos de peso leve, gesso, argamassas)	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Substâncias externas	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1
Densidade/após forno [kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500
Absorção máxima de água/ 10 min [%]	10	15	20	sem limite

MÜLLER (2006) em trabalho recente destaca a utilização dos RCD's como agregados graúdos em substituição total ou parcial aos naturais para concretos usados em elementos interiores (pilares, paredes e placas cimentícias), e como placas decorativas em várias obras na Alemanha e Suíça.

Na Europa o uso de RCD como agregado para concreto, segue as recomendações da *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM RECOMENDATION, 1994) que os classifica em função da massa específica (Tabela 2.6).

Tabela 2.6: Classificação dos RCD segundo RILEM.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Densidade (após secagem em forno)	$\geq 1500 \text{ kg/m}^3$	$\geq 2000 \text{ kg/m}^3$	$\geq 2400 \text{ kg/m}^3$
Composição	Agregados provenientes de resíduo de alvenaria	Agregados provenientes de resíduo de concreto	Mistura de agregados naturais e agregados reciclados

MÜLLER (2006) justifica tais recomendações em função dos efeitos provocados pelos agregados reciclados no concreto: redução da densidade, aumento da capacidade de absorção de água, maior teor de cimento no concreto (soma do cimento antigo com o novo), aumento da amplitude de variação das propriedades. Como consequência desses efeitos há um aumento da porosidade devido ao agregado mais poroso que leva a uma perda de trabalhabilidade que deve ser compensada pelo uso de plastificante, mais baixa resistência à compressão e menor módulo de elasticidade. Além disso, deve-se dar atenção especial a características do concreto no tocante à retração por secagem, fluência e durabilidade.

Observa-se que normalmente, nos trabalhos, não é especificado (com exceção do Japão) se o concreto é estrutural. Em muitos trabalhos analisam-se resíduos como agregados para concretos sem fins estruturais e em outros para concretos. Raramente são citados resíduos para concreto estrutural. Para efeito dessa revisão, foram considerados neste tópico os trabalhos que tratam especificamente de concretos estruturais ou de concretos duráveis.

YANNAS (1977) sugere que o comportamento mecânico do concreto confeccionado com agregado de resíduo rico em argamassa se iguala ao comportamento mecânico do concreto de referência. Fato esse confirmado alguns anos depois por HANSEN e HEDEGARD (1984) que observaram que as misturas no concreto que compõem o resíduo tem pequeno ou nenhum efeito sobre as propriedades do concreto fresco confeccionado com esses resíduos.

SHAYAN e XU (2003) estudaram o concreto estrutural confeccionado com agregado reciclado com e sem adições de silicato de sódio, adições de cal e fumo de sílica. Eles concluíram que nenhuma vantagem particular foi encontrada com uso de silicato de sódio. Entretanto, o fumo de sílica promoveu uma alta da resistência mecânica. Eles encontram valores de resistência de 50% a 60% maiores. A conclusão que eles chegaram foi que o uso combinado de agregado reciclado e fumo de sílica é uma boa opção para a produção do concreto de alta resistência. Seus dados indicam ser adequada à utilização dos agregados reciclados finos em substituição a até 50% da fração de agregado miúdo. Os RCA passaram satisfatoriamente nos testes de durabilidade - retração por secagem, reação álcali-agregado, carbonatação, resistência a sulfato, permeabilidade rápida a cloretos e proteção a corrosão - quando comparados ao concreto sem RCD.

GUTIÉRREZ e JUAN (2004a) estudaram a utilização de agregado reciclado de concreto para concreto estrutural. Após as análises concluíram que algumas características do agregado reciclado se apresentaram abaixo do que é requerido para o agregado natural destinado ao concreto estrutural. A sugestão

dos autores para contornar essa limitação do uso do agregado reciclado é misturar uma porcentagem de agregado reciclado ao agregado natural, dessa forma melhorando as características do agregado reciclado. A porcentagem indicada pelos autores é substituir 20% de agregado natural pelo agregado reciclado graúdo. Entretanto os autores frisam que aos agregados reciclados a serem substituídos não podem absorver mais do que 7% de água e a densidade devem ser menores do que  $2.251 \text{ kg/m}^3$ . Tanto o limite de absorção quanto o limite da densidade estão de acordo com as normas japonesas. Um controle dos resíduos que chegam à usina e se destinam ao uso em concreto estrutural pode ser feito através de um teste de resistência mecânica no concreto original. Em estudos já efetuados anteriormente é sugerido utilizar um concreto como agregado para concreto estrutural quando o mesmo apresentar uma resistência à compressão maior que 25 MPa.

MÜLLER (2006) cita que na Alemanha as diretrizes para a confecção do concreto armado seguem a filosofia de que o concreto confeccionado com agregado reciclado não pode apresentar alterações quando comparado ao concreto comum. Além disso, essas diretrizes aceitam para uso na produção do concreto estrutural com resistência na faixa de 30-37 MPa somente agregados reciclados maiores que 2 mm do tipo 1 e tipo 2 (Tabela 2.3), agregado fino proveniente dos britadores são excluídos para o uso como agregado. Os concretos produzidos não podem ser leves ou protendidos. Devem ser utilizados em ambientes secos ou de baixa umidade. O aumento do teor de RCD em substituição aos agregados naturais potencializa o ataque do meio ao concreto.

No Brasil a quase totalidade dos agregados de RCD é utilizada como base de pavimentação e para a fabricação de blocos de concreto pra vedação e pavimentação. O Brasil é um dos países pioneiros na elaboração de normas para utilização de agregados reciclados em pavimentos e concretos simples. Algumas delas são: NBR 15112/04; NBR 15113/04; NBR 15114/04; NBR 15115/04; NBR15116/04 (NASCIMENTO, ?).

A utilização desses resíduos como agregados para concreto em substituição aos naturais tem se limitado à fração graúda e praticamente apenas para concreto sem fins estruturais. HAMASSAKI, SBRIGHI e FLORINDO (1996) concluíram em seu trabalho que é viável o uso do resíduo de demolição como agregado miúdo para a confecção de argamassas. Além disso, os autores sugerem que o agregado de resíduo seja utilizado em argamassas de assentamento ou de revestimento interno, dessa forma as variações climáticas seriam evitadas. LEVY e HELENE (1997) chegaram às mesmas conclusões.

ZORDAN (1997) encontrou resultados dos ensaios de compressão, abrasão e permeabilidade, realizados com o concreto confeccionado com entulho, que permitiu concluir que este tipo de concreto atende perfeitamente as exigências de fabricação de peças de concreto utilizadas em drenagem superficial de estradas - como, por exemplo, sarjetas, elementos utilizados na construção de passeios públicos como guias e blocos para calçamento e blocos de concreto para alvenaria sem função estrutural.

Em um de seus estudos, ANGULO *et al.*, (2003) cita que a fração do resíduo reciclado que pode ser utilizado como agregado graúdo corresponde a 50% do total analisado. Dessa forma, somente 50% da produção nas instalações de reciclagem que o material foi colhido poderiam ser utilizados como agregados para a produção de concretos.

Uma outra possibilidade para utilização de resíduos de demolição é o emprego, nos moldes investigados em países como Holanda, Japão e Espanha, como matéria-prima para cerâmica de revestimento, vidro e cimento. Tais potenciais de utilização são devidos à alta porcentagem de sílica presente na parcela mineral do resíduo da construção. Segundo a literatura, a substituição de até 30% da matéria-prima para a fabricação de cerâmica vermelha, de cerâmica de revestimento e de cimento poderia empregar algo em torno de 60% de todo o RCD produzido no Brasil (ANGULO *et al.*, 2002).

Em 1997, ZORDAN realizou um estudo da utilização do entulho como agregado de concreto efetuando uma análise granulométrica e qualitativa para a classificação do mesmo como agregado. O que se notou após a execução dos testes foi que a diminuição do consumo de cimento auxiliou no aumento da resistência. Além disso, a resistência à abrasão mostrou-se ótima, em todos os casos. Em sua conclusão ZORDAN indica a utilização do concreto com agregados de entulho para a infra-estrutura urbana, não indicando o mesmo para a confecção de concreto estrutural.

LEVY e HELENE (2001) confeccionaram, em sua pesquisa, concretos com substituições de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados graúdos e miúdos de alvenaria ou de concreto. Os resultados de sua pesquisa indicam que concretos com substituições de até 50% de agregado reciclado graúdo ou miúdo não apresentam problema em relação à penetração de cloretos. Dessa forma a durabilidade não é afetada.

No seu estudo de 2002, ANGULO E JOHN após algumas análises não indicam a utilização de RCD em concretos com função estrutural. No entanto, em 2003 ANGULO *et al* cita que agregados com pesos específicos superiores a  $2,2 \text{ kg/dm}^3$  são potencialmente adequados para usos como agregados graúdos em concretos estruturais comuns. No entanto, nenhuma das amostras analisadas nesse estudo atendeu a normalização internacional para o emprego destes agregados para concretos estruturais e apenas 50% das amostras estavam em conformidade com as exigências físicas da normalização do uso destes agregados para concretos não-estruturais (ANGULO e JOHN, 2004).

Em trabalho recente, VIEIRA, DAL MOLIN e LIMA (2004) avaliaram o desempenho de concretos sob a ação de cloretos. Seus resultados indicam que o uso do agregado graúdo reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a resistência à compressão e nem a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras.



SILVA e PELISSER (2005) mostram em seu estudo que o módulo de elasticidade para substituição de até 30% do agregado natural graúdo pelo agregado reciclado graúdo apresentou valores equivalentes ao que seria previsto de acordo com a norma ABNT NBR 6118 a partir dos valores da resistência à compressão. Acima desses valores o módulo de elasticidade apresenta valores abaixo dos valores estimados pela mesma norma. Segundo os autores a resistência à compressão diminuiu de forma significativa com o aumento do fator água/cimento (a/c). Nesse caso os autores não associaram a perda da resistência devido à substituição de agregados naturais pelos agregados artificiais. Entretanto é possível concluir com essa pesquisa que o concreto confeccionado com a menor porcentagem de substituição de agregado (30%) apresenta os melhores resultados.

Não há um consenso sobre o uso de agregados miúdos reciclados. Algumas investigações em que a areia natural foi substituída por finos de concreto moído obtidas por tratamento a seco, não obtiveram bons resultados, já as tratadas por via úmida, com substituição de até 50%, ocasionaram pequenos efeitos na resistência à compressão (WEIMANN e MÜLLER, 2004). EVANGELISTA (2007), afirma que é seguro substituir areia natural por agregado miúdo reciclado até uma taxa de 30%. Já JUAN e GUTIÉRREZ (2004a), não recomendam o uso do mesmo para fabricação de novos concretos, devido a alta contaminação do agregado miúdo por argamassa, dessa forma resulta em um agregado de baixa qualidade. Em outro trabalho, JUAN e GUTIÉRREZ (2004b) reafirmam que o uso de agregado miúdo reciclado piora as propriedades do concreto reciclado e apenas recomenda o uso de agregado graúdo reciclado. No Brasil, SOUZA (2006) recomenda o uso de agregado miúdo reciclado.

Estudos apresentam a composição para a melhor atuação de agregados reciclados em relação à resistência a compressão e ao potencial de corrosão, sendo de 100% de substituição por agregado miúdo reciclado e 0% de agregado graúdo reciclado. Os piores resultados obtidos foram com 100% de substituição por ambos os agregados reciclados. Quanto maior o teor de

substituição de agregado graúdo reciclado, menor a resistência à compressão e quanto maior o teor de substituição de agregado miúdo reciclado maior a resistência (VIEIRA, 2004b). Nos estudos de JUAN e GUTIÉRREZ (2004b), uma substituição de até 50% de agregado graúdo ocasionou resultados de resistência à compressão, resistência à tensão e retração similares ao concreto com agregado graúdo natural.

Estudos de ZORDAN (1997) comprovam a possibilidade dos agregados reciclados serem usados em concretos para fins não estruturais.

Os teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD estão sendo determinados por estudos. Em um primeiro momento, há a separação manual por inspeção visual e a pesagem individual das fases. Uma metodologia de sistema de equações é empregada, utilizando-se valores médios de absorção de água e massa específica definidos por levantamento bibliográfico e laboratorial (ANGULO, 2001a).

De acordo com MEHTA, argamassas com resistências superiores a 15 MPa são chamadas de concretos.

### **2.3. Processos de aglomeração de minério de ferro**

Os processos de aglomeração com aplicação em larga escala são utilizados para o minério de ferro e têm como finalidade aglutinar os finos. Para que isso ocorra, uma mistura constituída por diferentes materiais pode ser submetida a uma aglomeração a frio, chamada de pelotização, processo que se baseia na capacidade que os materiais finos possuem de formar nódulos (pelotas) se providos de certo teor de umidade. Esta característica é bastante desejável porque aumenta a produção e melhora a qualidade do produto. A resistência mecânica desses materiais aglomerados a frio pode ser maximizada se submetidos a sinterização, processo no qual partículas finas pelotizadas ou não são submetidas sob condições especiais à alta temperatura tendo como

produto o sinter. Para a produção de ferro gusas podem ser utilizados, além do minério granulado, pelotas sem tratamento térmico, pelotas aquecidas e pelotas sinterizadas ou sinter.

### **2.3.1. Constituintes da mistura**

A mistura total para pelotização/ sinterização de minérios ricos em ferro compõe-se grosseiramente de: 75 a 85% de carga metálica (minério), 7 a 15% de fundentes, 3 a 7% de combustível sólido e 5 a 10% de umidade (água) (PENA, 1997).

#### Minério de ferro

O minério de ferro para que seja utilizado como material constituinte da mistura na sinterização necessita ter características físicas principais como: a granulometria adequada e o poder de aglomeração a frio. Existem outras, densidade, porosidade, presença de água combinada, forma de grão, etc., sobre as quais se tem poucas informações devido a falta de métodos eficazes de avaliação (USIMINAS,?).

Evoluções técnicas na área de preparação de mistura para sinterização, aliadas aos testes de escalas piloto e industrial, permitem a obtenção de uma faixa granulométrica tecnicamente aceitável e, principalmente, compatível com a realidade da mineração. Assim, a distribuição granulométrica ideal estabelecida é (USIMINAS,?):

- 0% acima de 9,5 mm
- 5% máximo acima de 6,35 mm
- 45 a 60% entre 1 e 6,35 mm
- 10 a 25% máximo abaixo de 0,105 mm.

Partículas ultrafinas diminuem a permeabilidade da mistura, aumentando a resistência do leito à passagem dos gases, isto acarreta diminuição na velocidade de deslocamento das frentes de combustão e prejuízo na produção.

Já as partículas muito grossas, devido à sua baixa superfície específica, ligam-se apenas fracamente, diminuindo a resistência do sinter, requerendo maior consumo de combustível (USIMINAS,?).

A classificação da granulometria do minério de ferro é mostrada na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Classificação da granulometria do minério de ferro (USIMINAS)

> 0,7 mm	Partículas Nucleantes	Servem de núcleo para aglomeração a frio das partículas mais finas. A faixa mais adequada é de 1 a 3 mm.
0,7 a 0,2 mm	Partículas Nucleantes	Não servem para núcleo nem como aglomerantes.
< 0,2 mm	Partículas Aderentes	Servem para formação de camada de aderência em torno dos núcleos

Em relação à proporção de partículas, quanto maior a proporção de partículas aderentes, mais eficientes serão as reações de sinterização. Porém, em excesso pode dificultar a condutividade térmica para os núcleos, comprometendo a resistência do sinter. Sob o aspecto de produtividade é preferível uma menor participação das partículas aderentes na mistura. As partículas que atuam como núcleos são de fundamental importância, pois estão ligadas à resistência quando submetidas a temperaturas elevadas. Como no processo de sinterização não ocorrem somente reações de fusão total, parte dos grãos de minério permanece no estado sólido. Se esses grãos não possuísem alta resistência, o rendimento do produto seria menor em função da diminuição da resistência do sinter. Isto ocorre devido ao fenômeno de fragilização, que por sua vez está ligado à água de cristalização e à natureza do minério (USIMINAS,?).

A definição da composição química do minério irá depender do balanço de carga feito para o alto-forno, tendo-se em vista o nível de participação do sinter na carga metálica, a natureza e o volume de escória produzida na fabricação da gusa e, principalmente, da qualidade do sinter. Entretanto, especificada a composição química para um dado minério, a sua constância é primordial para

o controle efetivo da qualidade do sinter. A diversificação das fontes de minério de ferro para sinterização, a utilização de um eficiente sistema de homogeneização, bem como áreas suficientes para a estocagem, garantem maior flexibilidade para controle da composição química e até mesmo, absorvem pequenas variações das suas características físicas e químicas (USIMINAS,?).

Outros aspectos importantes como a mineralogia e textura devem ser considerados e analisados. Minérios de grãos pequenos e maior rugosidade superficial (hidratados) apresentam melhores características aglomerantes que os minérios de grãos médios ou grandes e lisos. Com uma melhor aglomeração, há um aumento da permeabilidade e em conseqüência um ganho de produtividade na sinterização. Porém a utilização de proporções crescentes de minérios hidratados na mistura deve ser limitada até o ponto onde começa a ocorrer perdas de produtividade e qualidade do sinter. Isto significa que a otimização do processo deve-se à interação das propriedades aglomerantes dos minérios hidratados com as propriedades dos grãos médios, que evitam a ocorrência de trincas (USIMINAS,?).

### Fundentes

Os fundentes têm como função básica formar uma matriz de escória capaz de promover a coesão dos grãos dos minérios, de modo a proporcionar ao sinter uma resistência adequada à sua utilização no alto-forno (USIMINAS,?).

Os fundentes são classificados em básicos e ácidos, sendo (USIMINAS, ? e PENA, 1997):

- Básicos: portadores de CaO (calcário, cal virgem, cal hidratada) e/ ou MgO.
- Ácidos: portadores de SiO<sub>2</sub> e/ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Devido às limitações de reatividade, normalmente a granulometria dos fundentes é especificada de modo a reduzir a incidência de partículas graúdas.

Assim, o limite granulométrico superior tem sido apontado como sendo 2,8 mm e o inferior geralmente acompanha a especificação dos minérios (USIMINAS,?).

O calcário, fundente largamente utilizado, é uma rocha constituída, em sua maior parte, de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Origina-se da precipitação do carbonato de cálcio dissolvido nas águas de chuva ou rios e/ou do acúmulo de conchas ou restos de microrganismos marinhos. O carbonato de cálcio apresenta-se sob a forma de calcita e aragonita. Normalmente é encontrado em Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (ARAÚJO, 1967).

O calcário é a matéria-prima da fabricação de cal. Aquecendo-se o carbonato de cálcio acima de  $725^\circ\text{C}$ , obtêm-se  $\text{CaO}$  e  $\text{CO}_2$ . Para a fabricação do cimento Portland, o calcário deve ter baixo teor de magnésia (menos de 4% de  $\text{MgO}$ ), de modo a evitar, ao máximo, a existência da magnésia livre de aglomerante. A presença freqüente de magnésia, nas rochas calcárias, torna difícil encontrarem-se grandes massas de calcita pura, sendo geralmente os calcários contaminados com dolomito (ARAÚJO, 1967).

Aconselha-se substituir uma parte do calcário por cal, pois a cal é um eficiente aglomerante a frio, favorecendo a formação de micro-pelotas na mistura a sinterizar, aumentando a sua permeabilidade. Além disso, a cal consome bem menos calor do que o calcário, isto acarreta uma sobra de calor que aquece a mistura e conseqüentemente reduz o consumo de coque. Por outro lado, o seu custo e a sua disponibilidade são alguns dos fatores que limitam o seu uso (PENA, 1997).

### Combustíveis

Combustível é um material que se queima sob condições próprias, em contato com o ar em temperatura apropriada e gera calor (PENA, 1997 e USIMINAS,?).

Na sinterização, usualmente, três combustíveis são usados com finalidades distintas (PENA, 1997 e USIMINAS,?): combustível gasoso (gás de coqueria ou

alto-forno) ou líquido (óleo) e combustível sólido (finos de coque, carvão vegetal, coque de petróleo). O gasoso tem como função fornecer calor necessário para o combustível sólido da mistura para que ele entre em combustão e desencadeie o processo de aglomeração. O combustível gasoso é queimado no forno de ignição. Já o combustível sólido faz parte do leito de sinterização, queima-se em presença de ar, fornecendo o calor necessário ao processo, sendo o responsável pelo andamento deste processo. Sua finalidade é promover uma permeabilidade controlada na mistura, em estado de semi-fusão, deixando vários poros à medida que se queima.

Independente do tipo de combustível utilizado, algumas características são exigidas: elevado poder calorífico, reatividade média, granulometria e composição química adequada (USIMINAS,?).

Em relação à composição química, o combustível tem como principal fator de controle o teor de carbono, que deve ser máximo. No caso específico do coque, o teor de enxofre (altamente prejudicial aos equipamentos de exaustão e tóxico ao homem) também deve ser analisado, embora varie muito pouco e no caso da sinterização, represente papel secundário, por ser quase eliminado totalmente pelos gases de exaustão (USIMINAS,?). Embora, exija a necessidade do tratamento das emissões gasosas, como o SO<sub>x</sub> (gás proveniente da queima do enxofre presente no coque) e NO<sub>x</sub> (nitrogênio oriundo das composições das misturas) (PÁDUA, 2007).

### Coque

O coque é um resíduo sólido, poroso e carbonoso obtido de um processo de aquecimento do carvão, usado como combustível sólido (ARAÚJO, 1967). Em sinterização, é o combustível mais utilizado, devido as suas características físicas e químicas adequadas e, ao fato de que em sua presença, os finos de coque que não se encontram na especificação granulométrica para os altos-fornos podem ser aproveitados (USIMINAS,?).

O coque exerce três funções principais no alto forno (ARAÚJO, 1967): é combustível; é gerador de gás redutor ou age diretamente na redução; e assegura elevada permeabilidade à coluna de carga.

A qualidade do coque pode ser avaliada através da sua forma e cor. Quando os pedaços são muito compridos, pode-se concluir que a mistura de carvão é rica em matérias voláteis e foi aquecida muito rapidamente. As extremidades do material que estavam em contato com as paredes aquecidas da câmara de coqueificação possuem poros menores, com aspecto de couve-flor e sua cor é prateada, já a extremidade perto do centro do forno é quase preta, com poros grandes e irregulares e às vezes, com aspecto esponjoso, esta diferenciação é devido à curta exposição à temperatura elevada, não permitindo o escape dos gases (ARAÚJO, 1967).

Em relação à granulometria, estudos realizados mostram a sua importância nas propriedades, na produção e no consumo específico do sinter. Estas pesquisas definem como granulometria ideal para o coque a faixa de 0,5 a 3,36 mm. Normalmente, as frações mais grossas necessitam de um maior tempo de queima, aumentando assim, a duração do processo. Isto faz com que haja uma redução na velocidade de sinterização, conseqüentemente a produtividade deste processo também diminui. Fenômenos como: a má distribuição da mistura, alargamento da frente de combustão e agarramento de sinter nas grelhas afetam a permeabilidade da mistura, aumentam a geração de retorno e o consumo específico de coque. Quanto às frações finas, o coque é coberto por camadas espessas de pós-aderentes, prejudicando sua combustão (embora a permeabilidade da mistura possa ser melhorada), devido a sua maior reatividade, verifica-se uma redução na temperatura de sinterização, resultando num menor rendimento do processo e maior consumo específico de coque (USIMINAS,?). A mistura fica mais homogênea, mas aumentando muito a reatividade, os grãos podem se queimar muito rapidamente sem fornecer o calor necessário para uma boa sinterização (PENA, 1997).



Em termos de consumo específico de coque, o uso de cal é benéfico ao processo de sinterização, principalmente devido a dois fatores (USIMINAS,?): substituição de um carbonato (calcário) por um material calcinado (cal fina) e a hidratação da cal libera calor, aumentando a temperatura da mistura (em menor escala). Portanto, como combustível e como redutor, seu poder calorífico e teor de carbono devem ser elevados e para resistir ao peso da coluna de carga, deve apresentar grande resistência ao esmagamento. Os ensaios de abrasão, de queda e de tambor rotativo, normalmente são realizados (ARAÚJO, 1967).

### Adições

Os materiais de adição são os materiais necessários para o processo de redução, tendo a finalidade de melhorar as características físicas e químicas da mistura. Estes materiais podem ser resíduos, desde que possuam compostos químicos desejáveis ao processo (PENA, 1997). São eles: carepa de laminação, lixo industrial, pó de alto-forno, escória de alto-forno, minério de manganês e outros (USIMINAS,?).

Segundo DAL MOLIN *et al* (1994), a escória granulada é obtida por resfriamento brusco (rápido), sendo, previamente fragmentada por jato d'água e posteriormente resfriada em tanque com água, onde ocorre a granulação. Dessa forma, se obtém uma escória vítrea, de granulometria similar à da areia de rio e com massa unitária em torno de  $1000 \text{ kg/ m}^3$ . Sua estrutura é porosa e com textura áspera, podendo ser encontrada nas cores esbranquiçada, amarela, cinzenta e acastanhada. Apesar de sua vitrificação, seus componentes não perdem as características hidráulicas. Este produto não cristalizado (leve e poroso) é moído à finura adequada e também pode ser usado como adição ao cimento Portland, formando o Cimento Portland Composto com Escória. Para MEHTA (1994) a maior parte da cal, magnésia, sílica, e alumina são mantidas em estado não cristalino ou vítreo.

## **2.3.2. Pelotização**

A pelotização é um processo de aglomeração do minério de ferro onde são fabricadas pelotas cruas, feitas a partir de uma mistura úmida de minérios e aditivos, em discos ou tambores pelotizadores, havendo em seguida, um tratamento térmico, possibilitando a aplicação direta nos fornos siderúrgicos. Este processo foi introduzido para aproveitar finos que não se adaptavam a sinterização (ARAÚJO, 1967 e PENA, 1997). A pelotização teve início em 1911 na Suécia (PENA, 1997). Os constituintes da pelotização são formados pela mistura anteriormente citada.

### **2.3.2.1. Formação da pelota**

A pelota é formada através da união de partículas pelas tensões superficiais, onde grãos grossos (nucleantes) servem como base para aderência de grãos finos (aderentes) (USIMINAS, ?).

As pelotas são fabricadas em três etapas (ARAÚJO, 1967):

- moagem fina (obtenção da granulometria necessária);
- formação das pelotas cruas;
- consolidação das pelotas (temperaturas próximas à do início do amolecimento da superfície dos grãos), para obter um material resistente ao manuseio e à pressão da coluna de carga (quando utilizado no alto forno).

A formação das pelotas cruas é influenciada por vários fatores, entre eles estão: a forma das partículas, a distribuição granulométrica, a superfície específica, a molhabilidade dos grãos, a umidade, o tipo de minério e o tipo de aglomerante (PENA, 1997).

De acordo com ARAUJO (1967), a coesão dos aglomerados é explicada pelos seguintes mecanismos de ligação entre as partículas: recristalização e

crescimento dos grãos; reações químicas; fusão do material nos pontos de contato entre as partículas; cimentação através de ligantes inorgânicos previamente adicionados e cristalização de materiais dissolvidos. As pelotas são obtidas através da ação de rolamento sobre uma superfície em movimento e da ação de um ligante intergranular líquido. Para que haja a sua formação, 80% do minério devem estar numa granulometria abaixo de 0,325 mm e ter uma adição de água em torno de 10%. A resistência mecânica das pelotas cruas é devida à tensão superficial nela, que funciona como vários vasos capilares embaraçados. Segundo a USIMINAS (?), além da ação do rolamento a formação da pelota depende do tempo de retenção no equipamento.

O equipamento utilizado para a formação das pelotas é o misturador e/ou pelletizador, equipamento responsável também pela homogeneização da mistura, além disso, promove a adição de água para controle da umidade deste material (USIMINAS,?). Após a formação das pelotas, há um tratamento térmico com o intuito de enrijecê-las e para serem levadas diretamente aos fornos siderúrgicos (PENA, 1997). As pelotas formadas são de vários tamanhos, devido a isso, é necessário o peneiramento para a separação em granulometrias adequadas. Isto é necessário para a obtenção de pelotas cruas menores, sendo assim, aglomerantes (amido, bentonita, soda, etc) são adicionadas as pelotas, com a finalidade de aumentar a resistência mecânica da mesma. Depois de peneirado, o material fino resultante é recirculado. Os tambores, discos ou cones rotativos são utilizados para a formação destas pelotas cruas, em geral as pelotas possuem entre 10 a 15 mm de diâmetro. Já nos Estados Unidos, utilizam-se as pelotas acima de 18 mm e na Suécia, as peneiras são de 30 mm. (ARAÚJO, 1967). A granulometria da pelota vai depender da velocidade do disco e de sua inclinação, quanto maior a inclinação, menores serão as pelotas (PENA, 1997).

A umidade da mistura está relacionada com a granulometria da mesma, pois quando a mistura a sinterizar apresenta maiores concentrações granulométricas na faixa inferior a 150 mesh (0,15 mm), o acréscimo de água permite maior formação de micro-pelotas, melhorando com isto, a

permeabilidade da mistura; por outro lado, a mistura excessivamente granulada necessita, às vezes, para controle de permeabilidade, da diminuição da água adicionada. Por outro lado, a elevação da umidade além de certo nível, promove o encharcamento da matéria-prima tendo como conseqüência a destruição das micro-pelotas e o alargamento da zona de condensação no processo de formação do sinter, refletindo negativamente na produtividade (USIMINAS,?). A granulometria do material é uma característica muito importante, 99% do minério devem ser inferiores a 0,15 mm. Para que haja melhores condições de formação das pelotas, nas instalações comerciais em funcionamento, o material é moído à granulometrias ainda menores, 75 a 90% do minério ficam abaixo de 0,044 mm. A utilização de minérios muito finos na máquina de sinterizar reduziria muito a sua produtividade (ARAÚJO, 1967).

A resistência à compressão de uma pelota crua é de aproximadamente 1 kg por unidade, este valor é muito baixo para ser utilizado no alto forno e para resistir ao transporte e manuseio. Para que haja um aumento da resistência (cerca de 250 vezes mais) as pelotas cruas são aquecidas à temperatura de 1340°C (ARAÚJO, 1967).

Agentes aglomerantes são utilizados na mistura visando acelerar a união das partículas no misturador e ao mesmo tempo, aumenta a capacidade de retenção do aglomerado evitando assim, a desintegração dos grânulos no ato de compactação e secagem do material na esteira. A quantidade de partículas aderidas é diretamente proporcional ao percentual usado do agente aglomerante. Entre todos os materiais utilizados na micro-pelotização, o que melhor se comporta em termos de índice de granulação é a cal fina (USIMINAS,?).

Alguns testes são geralmente realizados no produto do processo de pelotização, entre eles estão: granulometria, resistência à compressão, resistência à abrasão, análises químicas, teste de inchamento, teste de redutibilidade e teste de degradação à baixa temperatura (PENA, 1997).

### **2.3.2.2. Vantagens e desvantagens da utilização da pelletização**

A grande vantagem da utilização das pelotas para produção de ferro gusa é o aumento da produção diária, havendo uma redução do consumo de coque por tonelada; diminuição da temperatura dos gases; maior teor em CO<sub>2</sub> (indicativo de melhores condições de redução) e, finalmente, marcha mais uniforme do forno. Como desvantagem pode observar o desgaste mais rápido do refratário (ARAÚJO, 1967).

### **2.3.3. Sinterização**

A sinterização é um processo metalúrgico onde os finos de minério de ferro e fundentes ou pelotas são aglomerados por fusão incipiente (atingindo temperatura no leito até cerca de 1250°C-1350 °C) com umidade controlada, um produto granulado, poroso, com propriedades físico-químicas e metalúrgicas ideais para o alto-forno. Este produto é chamado de sinter (Pádua, 1996 e PEREZ,?). O processo se completa com a quebra e classificação do material sinterizado. A sinterização é feita por meio descontínuo- Greenwald usando painéis com basculação rotatória- ou por processo contínuo, chamado de Dwight-Lloyd usando grelhas móveis. Por razões de permeabilidade e produtividade, se aplica apenas aos finos abaixo de 10 mm (PENA, 1997). Hoje, já existe o processo intermediário, sendo semi-contínuo, desenvolvido no Brasil, chamado processo SKP (Sistema Korf/Pimenta ou Sistema Carrossel) (PÁDUA, 2007).

Para produzir aglomerados geralmente são utilizados fundentes básicos (calcário, dolomita, escórias e outros). Estas adições visam transferir a calcinação do alto-forno para a sinterização, já que no alto-forno o combustível utilizado é extremamente caro. O produto hiper-básico se destina a compensar os eventuais componentes ácidos da carga (PENA, 1997).

### **2.3.3.1. Formação /queima do sinter**

Geralmente a constituição do sinter é dada pela basicidade e pela quantidade de combustível presente na mistura. Normalmente, os constituintes ferrosos são os principais constituintes do aglomerado e os não-ferrosos são os materiais ligantes (PENA, 1997).

A sinterização se desenvolve em várias etapas e acontece devido ao desenvolvimento de dois fenômenos distintos (USIMINAS,?):

- O fenômeno físico de transferência de calor da camada superior para a inferior do leito de sinterização, proporcionada pela sucção forçada do ar, criando uma fonte térmica cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar;
- O fenômeno químico de combustão do coque contido na mistura a sinterizar que, produzindo calor, gera uma frente de reações químicas, cuja evolução é função da reatividade, da quantidade de combustível e da umidade e composição química e granulométrica da mistura.

Ambos os fenômenos são inteiramente dependentes entre si, pois o combustível só entra em combustão, desencadeando o processo, após a mistura atingir certa temperatura, determinada pela reatividade do próprio combustível. Além disso, a existência destes dois fenômenos, transferência de calor e reações químicas, resulta na formação de uma zona de reações termoquímicas no leito da mistura a sinterizar, gerando outras zonas com características diversas, cujos desenvolvimentos formam o mecanismo de aglomeração a quente (USIMINAS,?).

A panela ou esteira (unidade de produção) é carregada com a mistura a sinterizar, intermitente ou continuamente. Esta mistura é constituída de minério de ferro, fundentes, adições metálicas, combustível sólido e umidade. A combustão inicia-se pela ignição do combustível sólido presente na mistura. Esta ignição é gerada pelas chamas e pelo calor do forno de ignição (aproximadamente 1100°C-1200°C), atuando na superfície da mistura,

formando uma frente de chama (zona de alta temperatura). A combustão é continuada através do ar que é succionado de cima para baixo através da mistura e das grelhas do fundo da panela/esteira, por um sistema de exaustores/condutores de ar, sendo assim a camada superficial em combustão é transportada até o fundo da panela.

Em cada camada, quando se atinge temperaturas próximas de 100°C, inicia-se a evaporação da umidade da mistura. Este vapor é carregado para regiões mais frias nas camadas inferiores, sendo condensado novamente ao passar por 60/70°C (ponto de orvalho). Entre 60 a 100°C aproximadamente, forma-se então uma região em que a umidade da mistura é superior à media. Inicia-se a zona de secagem acima de 100°C. Entre 150 a 200°C, em um curto intervalo de tempo, toda a umidade já foi vaporizada, iniciando-se a desidratação dos hidróxidos (150 a 500°C), feito através do consumo de calor do processo. Quando a mistura atinge a faixa de 500 a 700°C, inicia-se a combustão do coque com violento desprendimento de calor, elevando o nível térmico do ambiente para 1200/1400°C. A decomposição dos carbonatos inicia-se em torno de 700°C, com consumo de calor. Na faixa de 900 a 1400°C, que define a zona de combustão, também chamada de zona de sinterização ou de escorificação, ocorrem as reações no estado sólido ou semi-líquido, formando-se o magma do sinter, ou seja, o conjunto de silicatos, cálcio-ferritas e outros, que após cristalização, juntamente com os óxidos de ferro, primários ou secundários, constituem o sinter. A reação de combustão do coque na mistura, além de produzir grande quantidade de calor, torna o ambiente ligeiramente redutor, o suficiente para uma redução parcial da hematita e magnetita (USIMINAS,?).

Assim, no processo de sinterização ocorrem diversas zonas distintas de reações físico-químicas, ditadas pelo gradiente de temperatura na camada, que promove a ligação de cristais dos óxidos metálicos e a formação de certo volume de escória obtido nas reações químicas. Durante a sinterização de minérios de ferro, tem-se inicialmente uma redução dos óxidos metálicos e posteriormente, uma reoxidação parcial do mesmo (PÁDUA, 1996).

Quando a frente de combustão atinge as grelhas, o coque presente na mistura deve ter sido todo consumido, gerando calor, vaporizando a água e calcinando os carbonatos, provocando uma semi-fusão e aglomerando todo o material da panela. O aglomerado formado é então, britado e peneirado. O sínter de alto-forno possui granulometria superior a 5 mm, abaixo dessa granulometria, o material é chamado de “fino de retorno”. Material que pode ser utilizado novamente na mistura a ser sinterizada (PÁDUA, 1996 e PENA, 1997 ).

Na aglomeração de muitos minérios o papel mais importante na formação dos constituintes principais da sinterização é consideravelmente representado pela reação sólido-gás (PENA, 97).

O sínter deve apresentar as seguintes características (PEREZ,?):

- granulometria e composição química controladas;
- elevada redutibilidade e baixa degradação sob redução;
- limitação de elementos químicos indesejáveis nos altos-fornos;
- elevada resistência mecânica a queda e abrasão;
- boas propriedades de amolecimento e fusão;
- baixo custo de fabricação.

A umidade deve ser rigorosamente controlada para que não ocorra risco de perda de produção, consumo elevado de combustível e má qualidade do sínter (USIMINAS,?). A qualidade do sínter está diretamente relacionada à especificação definida entre sinterização e alto-forno. Portanto, esta qualidade é avaliada para cada usina, sendo que os itens normalmente avaliados são: a composição química, a distribuição granulométrica, o RDI (índice de degradação sob redução- mede o que acontece com o material dentro do alto-forno), o shatter (ensaio de queda do material- 4 quedas a 2 m de altura), a redutibilidade e mesmo à nível de pesquisa, o amolecimento e fusão e a microestrutura do sínter (PEREZ, ?).

Os sínteres são definidos genericamente como (USIMINAS):



- não auto-fundentes: quando são provenientes de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não se acrescenta nenhuma base (CaO) ou (MgO).
- auto-fundentes: o minério pode ser o mesmo anterior, mas são acrescentadas algumas bases para correção da composição química. Podem ser ácidos, quando a relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  é inferior a 1, ou básico, quando esta relação for superior a 1.

A aglomeração a quente da mistura depende basicamente da passagem do fluxo gasoso até às camadas inferiores, transferindo o calor necessário ao desenvolvimento das reações de sinterização. A permeabilidade é o fator que indica uma melhor ou pior passagem de fluxo gasoso e a sua grande importância está na influência direta ou mesmo indireta que exerce nos principais parâmetros de avaliação do sinter, ou seja, produtividade, custo e qualidade do produto da sinterização (USIMINAS,?). E esta permeabilidade está diretamente ligada principalmente a umidade, a granulometria e homogeneização da mistura a sinterizar. Quando a permeabilidade é muito alta ou o volume da mistura é muito pequeno, os gases passarão com grande velocidade, isto faz com que haja rápidas trocas de calor, não havendo tempo para que as reações do processo se desenvolvam totalmente. Já se a reatividade for muito baixa ou o volume da mistura muito grande, o tempo de reação será mais longo, desse modo a frente térmica ficará defasada da frente química, tendo uma diminuição na temperatura e conseqüentemente, na eficiência do processo (PENA, 1997).

Durante a sinterização, uma onda térmica passa através do leito, sendo a responsável pela transformação desta mistura em sinter. Esta onda ocorre por causa de dois fenômenos térmicos: a ignição e a combustão. O coque é o material que determina o tempo da reação de ignição e de todas as reações químicas. A reatividade do coque depende de sua granulometria, do teor de carbono e das características de produção do mesmo. Quanto maior a quantidade e menor o tamanho do seu grão, maior será a relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$ , isto é, mais reductores serão os gases de aquecimento e conseqüentemente, mais

reduzida ficará a carga de sinterização (PENA, 1997). Para medir a facilidade com a qual o oxigênio do minério de ferro natural ou processado pode ser removido sob ação de um agente redutor é feito o teste de redutibilidade (USIMINAS,?).

Admite-se que a resistência do sinter está ligada a sua basicidade ( $\text{CaO/SiO}_2$ ). Na prática, a basicidade do sinter é um indicador de qualidade química do sinter (indica a regularidade ou irregularidade da composição química do sinter) e é determinada pela necessidade de composição da carga para o alto-forno, sendo assim, nem sempre é possível trabalhar com as melhores condições de operação de sinterização. Porém, aconselha-se não utilizar a basicidade na faixa de 0,8 a 1,4, pois corresponde aos piores níveis de resistência e produtividade (PENA, 1997).

Os finos de retorno correspondem ao material fino recuperado do processo de sinterização. Quando o processo de sinterização gera muito fino de retorno, isso significa que houve uma queda de resistência, que pode ser devido a falta de coque na mistura; queima irregular; compactação inadequada da camada ou variações de umidade da mistura, conseqüentemente há uma queda de produção (PENA, 1997).

Os fatores que influenciam a operação de sinterização são mostrados em forma de fluxograma na Figura 2.3.

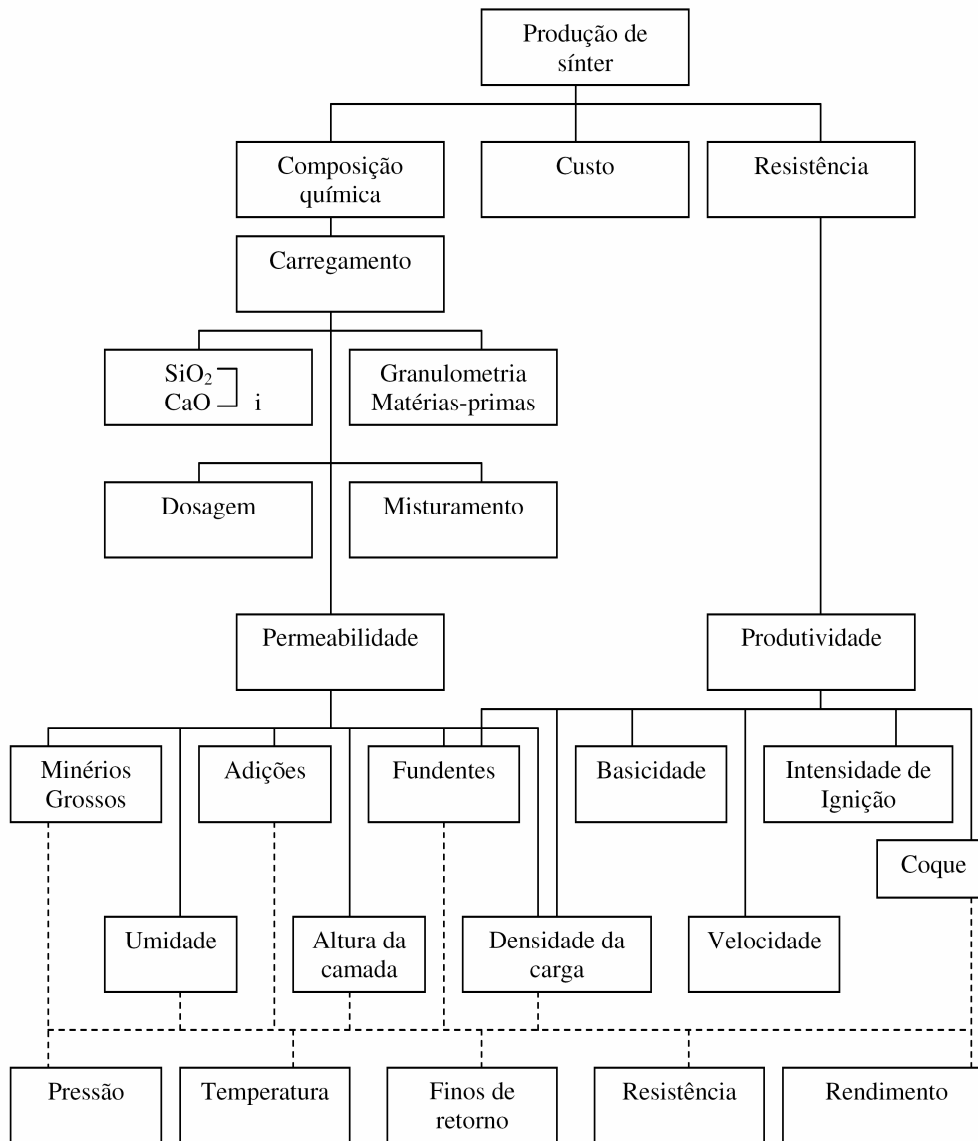


Figura 2.3: Esquema dos fatores que influenciam a operação de sinterização (PENA, 1997).

### 2.3.3.2. Vantagens e desvantagens

As principais limitações de uso na sinterização estão na quantidade de superfinos (fração menores de 0,15 mm) e na sua composição química. A presença de superfinos diminui a permeabilidade das misturas, provocando perda de produção e aumento no consumo de combustível (CAMILO *et al*, 1997).

A grande vantagem da sinterização é o aumento da produtividade e redução do uso de termo-redutor (carvão). Isto ocorre porque o sínter tem elevada porosidade, possuindo uma superfície de contato gás/sólido mais elevada (área superficial), aumentando assim, a velocidade do consumo de minério, e isto acarreta o aumento da produtividade do alto-forno (PÁDUA, 2007).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

---

Neste trabalho são estudadas argamassas para concretos fabricadas com agregados miúdos obtidos de finos de resíduo de construção sinterizados através de ensaios de resistência mecânica à compressão, ensaios de frequência ressonante, testes de absorção de água e da análise macro e microscópica. Esse estudo foi realizado em cinco etapas: obtenção e caracterização do sínter-produto adequado, britagem do sínter-produto, separação granulométrica, confecção/cura dos concretos e determinação de propriedades físicas e mecânicas.

#### **3.1. Materiais**

Primeiro foram fabricados sínteres de diferentes composições. Escolhida a mistura mais adequada, produziu-se a argamassa para concreto, utilizando misturas convencionais e misturas contendo diferentes teores de sínter.

##### **3.1.1. Materiais utilizados na confecção dos sínter**

Os diferentes sínteres foram fabricados utilizando resíduos de RCD ou resíduos de argamassas. A escória de alto-forno e o calcário foram usados como aglomerantes, e a moinha de coque como combustível. A água foi utilizada na mistura primeiramente para promover a aglomeração à frio. Segundo, ao ser evaporada no processo de sinterização, na zona de secagem, produz canais capilares, que são responsáveis pelo aumento da permeabilidade do leito a ser sinterizado. A permeabilidade é responsável pela velocidade do avanço da frente de combustão.

Os finos de argamassa foram obtidos através da moagem em laboratório de corpos-de-prova de argamassas. Utilizou-se as partículas passantes na peneira 0,15 mm. Essa granulometria foi escolhida em função da disponibilidade de granulometria gerada pelo equipamento de moagem utilizado. Optou-se pelo estudo com esse tipo de resíduo de modo a se avaliar a influência da contaminação dos resíduos nos processos de aglomeração.

Os finos de resíduo de construção e demolição são oriundos da Central de Reciclagem da BR 040 (também chamada de Central de Reciclagem do Aterro), localizada na cidade de Belo Horizonte (MG). Os finos são constituídos de concreto, argamassa, materiais cerâmicos (tijolos, telhas). Para avaliar o lote utilizado nos experimentos foi realizada a análise química do mesmo, mostrada na Tabela 3.1. O RCD é constituído em sua grande parte por sílica. Deve ser ressaltado que é grande a variabilidade da proporção dos materiais que compõem os lotes que chegam a Central de Reciclagem.

Tabela 3.1: Composição Química do resíduo de construção e demolição

Composição	%
Resíduo Insolúvel	67,93
SiO <sub>2</sub>	65,16
CaO	9,96
P.F. 1000 °C	8,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,9
MgO	0,46

A granulometria a laser do lote utilizado é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Análise granulométrica do resíduo de construção e demolição.

Granulometria	(%)
# 2,21 mm	0
# 1,41 mm	30,4
# 0,59 mm	27,3
Fundo	42,3

Observa-se que são considerados finos as partículas iguais ou menores que 1,41mm. Este valor pode ser generalizado para toda a produção da usina, pois o processo de moagem e peneiramento é sempre o mesmo.

A escória granulada de alto-forno utilizada, proveniente da região metropolitana de Belo Horizonte, possui a composição dada na Tabela 3.3. Verifica-se que seu maior constituinte é o cálcio.

Tabela 3.3: Composição da escória granulada de alto-forno

Componentes	%
CaO	38.69
SiO <sub>2</sub>	34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12
MgO	4.53
MnO	0.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.79
K <sub>2</sub> O	0.7
Na <sub>2</sub> O	0.12
Sulfetos	0.48
RI	2
PF	30.5

A moinha de coque utilizada foi importada da China. Sua composição química é mostrada na Tabela 3.4, sendo basicamente composta por carbono fixo.

Tabela 3.4: Composição da moinha de coque

Componentes	%
Carbono fixo	80
Material volátil	4
Cinzas	16

O calcário usado é proveniente da região centro-oeste de Minas, contendo a seguinte composição química (Tabela 3.5):

Tabela 3.5: Composição do calcário

Componentes	%
CaCO <sub>3</sub>	51
MgO	3
SiO <sub>2</sub>	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5

Com esses materiais foram produzidas 6 misturas para obtenção de sínter, cujas proporções são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Composições das amostras

Amostras	Composição da Mistura	%	Peso (kg)
Amostra 1	Resíduo cimentício	45,50	12,30
	Calcário	22,75	6,15
	Coque	9,00	2,43
	Escória de alto-forno	22,75	6,15
	Água	-	1,25 (litros)
Amostra 2	Resíduo (RCD)	46,25	18,5
	Calcário	46,25	18,5
	Coque	7,5	3
	Água	-	2 (litros)
Amostra 3	Resíduo (RCD)	45,75	18,3
	Calcário	45,75	18,3
	Coque	8,5	3,4
	Água	-	2 (litros)
Amostra 4	Resíduo (RCD)	45,5	18,2
	Calcário	45,5	18,2
	Coque	9	3,5
	Água	-	2 (litros)
Amostra 5	Resíduo (RCD)	47	18,8
	Calcário	47	18,8
	Coque	6	2,4
	Água	-	2.8 (litros)
Amostra 6	Resíduo (RCD)	45,5	18,2
	Calcário	22,75	9,1
	Coque	9	3,6
	Escória de alto-forno	22,75	9,1
	Água	-	2 (litros)



### 3.1.2. Materiais utilizados na confecção das argamassas para concreto

O sínter obtido a partir da mistura 6 foi empregado para a fabricação de agregados miúdos. A escolha dessa mistura se deu em função da análise macroscópica dos diferentes sínteres obtidos.

As argamassas estudadas foram fabricadas utilizando diferentes tipos de agregados miúdos, cimento CP II-E32 e água. As proporções utilizadas são as recomendadas para a determinação da resistência do cimento: relação água/cimento de 0,55 e cimento/agregado miúdo de 0,33, em quantidades iguais das granulometrias 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm.

Como agregados miúdos foram usados três materiais: areia padrão fabricada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológica (IPT), areia quartzosa disponibilizada na região de Belo Horizonte (Figura 3.1) e sínter britado (Figura 3.2). Observa-se através do gráfico que a maior parte da areia ficou retida na peneira 1,2 mm, o que dificultou a obtenção das granulometrias utilizadas.

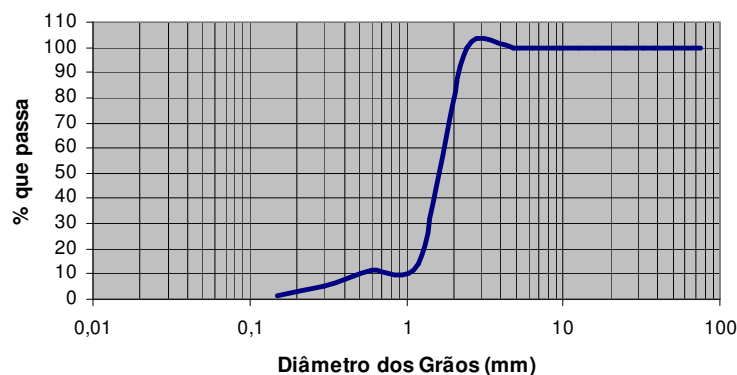


Figura 3.1: Curva granulométrica da areia de mercado.



Figura 3.2: Areia sinterizada utilizada na confecção das argamassas, nas seguintes granulometrias: 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm.

Com estes agregados foram confeccionados seis tipos distintos de concreto, seguindo os procedimentos usuais da Norma NBR 5738 de 1980, conforme a Tabela 3.7. O primeiro grupo foi fabricado com 100% de areia do IPT. O segundo com substituição de 100% da areia do IPT por areia sinterizada. O terceiro grupo de amostras foi confeccionado com areia lavada convencional, comercializada no mercado. E o quarto grupo foi confeccionado com uma mistura de areia do IPT e areia sinterizada nas seguintes proporções e granulometrias: grãos de 1,2 mm e 0,6 mm de areia sinterizada, metade dos grãos na faixa de 0,3 mm foram de areia sinterizada e 18% dos grãos de areia sinterizada (0,15 mm) e com uma mistura de areia lavada convencional, todas misturadas manualmente. O quinto grupo foi fabricado com 100% de areia sinterizada, como foi feito com o segundo grupo, porém a moldagem foi feita com um diferencial, utilizou-se argamassadeira. O sexto grupo foi confeccionado com 100% areia do IPT, servindo como referência do quinto grupo.

Tabela 3.7: Tipos de agregados utilizados nas argamassas fabricadas

Tipos de agregado utilizados nas argamassas	granulometrias	agregado IPT	agregado sínter	agregado lavado
Agregado IPT + mistura manual	1,2 mm	100%	-	-
	0,6 mm	100%	-	-
	0,3 mm	100%	-	-
	0,15 mm	100%	-	-
Agregado sínter + mistura manual	1,2 mm	-	100%	-
	0,6 mm	-	100%	-
	0,3 mm	-	100%	-
	0,15 mm	-	100%	-
Agregado sínter + IPT+ mistura manual	1,2 mm	0%	100%	-
	0,6 mm	0%	100%	-
	0,3 mm	50%	50%	-
	0,15 mm	82%	18%	-
Agregado lavado convencional + mistura manual	1,2 mm	-	-	100%
	0,6 mm	-	-	100%
	0,3 mm	-	-	100%
	0,15 mm	-	-	100%
Agregado IPT + argamassadeira	1,2 mm	100%	-	-
	0,6 mm	100%	-	-
	0,3 mm	100%	-	-
	0,15 mm	100%	-	-
Agregado sínter+ argamassadeira	1,2 mm	-	100%	-
	0,6 mm	-	100%	-
	0,3 mm	-	100%	-
	0,15 mm	-	100%	-

### 3.2. Métodos

Esse estudo foi realizado em cinco etapas: obtenção e caracterização do sínter-produto adequado, britagem do sínter-produto, separação granulométrica, confecção/cura dos concretos e determinação de propriedades físicas e mecânicas.

O procedimento consistiu em misturar, pelotizar e sinterizar os resíduos de argamassa ou do aterro, a escória, o calcário, o coque e água. Os materiais secos foram colocados em um misturador tipo betoneira durante 25 segundos. Após este tempo, adicionou-se a água e a mistura se prolongou por mais 90 segundos.

O material misturado foi pelletizado em um equipamento especialmente construído para essa finalidade, a uma rotação de 800 rpm durante 2 minutos. Depois de pelletizada, cada mistura foi colocada na panela piloto própria para a sinterização, previamente preparada. Esta preparação consiste na adição de escória ácida britada (“bedding”), cuja função é proteger a grelha da panela. Após a colocação do “bedding” e da mistura, uma camada de carvão foi adicionada e com o maçarico, foi feita a ignição da carga na panela piloto, mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3: Início da ignição feita através de um maçarico na panela piloto

Durante o processo de sinterização é forçada a passagem de ar através da carga. Esse ar é o responsável pela continuidade da queima através da mistura. Durante o processo faz-se o controle da vazão desse ar, chamada de depressão. O controle dessa variável, medida em coluna d'água (mmca), permite avaliar a permeabilidade da mistura: quanto maior a depressão, mais dificuldade o ar tem em passar pelo material, isto é, menos permeável é a mistura. A temperatura dos gases que saem da panela foi medida apenas em alguns casos, devido a problemas com o equipamento de medição.

Após submeter as misturas aos procedimentos descritos acima, avaliou-se os produtos obtidos com a finalidade de verificar a ocorrência ou não da sinterização. Tal avaliação se deu por análise macroscópica e por avaliação qualitativa da resistência mecânica. O sinter produto foi escolhido como adequado após ser avaliado quimicamente foi britado e separado em granulometrias de 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15 mm. A fração mais facilmente obtida foi a

de 1,2 mm. Para a obtenção da fração menores que este valor foi necessário empregar muito mais energia. Optou-se por estes valores, pois são as faixas de referência para a determinação da resistência do cimento. O agregado miúdo proveniente desse síter foi caracterizado de acordo com normas existentes.

Quatro tipos de argamassas foram produzidas manualmente (argamassas com agregado do IPT; com agregado de síter; com agregado de síter+ agregado do IPT e agregado lavado convencional) e dois tipos em argamassadeira (argamassas com agregado do IPT e argamassas com agregado de síter) segundo procedimentos correntes, adicionando-se cimento, água e agregado miúdo (síter, areia lavada convencional e do IPT) , areia lavada convencional e areia do IPT (Tabela 3.7). A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 10 mm de comprimento por 5 mm de diâmetro se deu com compactação manual segundo a normalização vigente. A diferença de mistura e moldagem dos corpos-de-prova permite que se avalie a influência dessas variáveis nos resultados. Após 24 horas de fabricação os corpos-de-prova desmoldados foram locados na câmara úmida.

Após a cura por 28 dias, em câmara úmida (temperatura de 23°C e umidade relativa em torno de 95%), foi avaliada a resistência mecânica à compressão, o percentual de absorção de água, e estimado o módulo de Young das argamassas fabricadas.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma prensa hidráulica informatizada (marca EMIC) com capacidade máxima de 2.000 KN e controle manual de velocidade de aplicação de carga, tendo curso útil do pistão de 25 mm. O controle de velocidade do equipamento funciona através de uma válvula de fluxo de óleo. Em função do carregamento do material ensaiado e do tempo de ensaio foi possível estimar a velocidade de aplicação de carregamento do ensaio para cada posição do controle do equipamento. Para estimar o módulo de elasticidade dinâmico foi utilizado o equipamento Erudite MKII, que realiza um sistema de teste de frequência ressonante, no modo

longitudinal. A estes corpos-de-prova foram aplicadas vibrações com frequência na faixa de 14.000 – 23.000 Hz. A utilização deste método para materiais não homogêneos não é usual, mas permite uma estimativa mais adequada do que os usualmente empregados para concreto. A permeabilidade foi avaliada pelo índice de absorção de água. Esse índice é calculado comparando-se a massa de dos corpos-de-prova secos (em estufa por 12 horas) como a massa dos mesmos após imersão em banho de água à temperatura de 25°C por 24 horas (ABNT, 1986).

O MEV (microscópio eletrônica de varredura) foi utilizado para analisar a microestrutura das argamassas produzidas. Utilizou-se o MEV com o EDS (para realização de análise química semi-quantitativa) em quatro amostras. Elas foram retiradas de corpos-de-prova e preparadas para análise (metalizadas), pois não são condutoras. A primeira amostra foi de concreto com agregado sinterizado; a segunda de concreto com areia lavada convencional, a terceira de concreto com agregado sinterizado e areia do IPT, e a quarta amostra foi de concreto com areia do IPT, todas misturadas manualmente.

## 4. RESULTADOS

---

Os resultados são apresentados em quatro blocos. No primeiro são apresentados os dados obtidos para as sinterizações das diferentes misturas. Em seguida é apresentada a caracterização do síter escolhido como adequado. Os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água são apresentados no bloco três. E a microscopia dos mesmos no bloco quatro.

### 4.1. Sinterizações

Nas Figuras 4.1 até a 4.20 são apresentados seguidamente para cada mistura analisada (Tabela 3.6) o aspecto da amostra após a etapa de mistura, o gráfico de depressão ou temperatura x tempo, e a macroestrutura da mistura após ser submetida à sinterização. Os gráficos permitem que se avalie a ocorrência do processo. No gráfico de depressão, ela deve ser máxima no início do processo, quando a resistência a passagem do ar através do bolo a ser sinterizado é maior, a medida que a frente de combustão avança, a permeabilidade aumenta e a depressão diminui. A depressão é estabelecida para cada tipo de mistura dependendo de fatores como: granulometria, tipo de grão, ou seja, permeabilidade. A temperatura dos efluentes gasosos (gás) permanece baixa durante todo o processo, isto significa que o mesmo não ocorreu, pois é necessário que a temperatura dos gases para o minério de ferro esteja em torno de 350 °C.

Após a mistura mecânica, a amostra 1 (45,5% RCD, 22,75% calcário, 9% coque, 22,75% escória de alto-forno e 1,25 litros de água) apresentou-se homogênea, isto é, os materiais constituintes foram bem misturados, estando

em conformidade para o processo seguinte, a pelotização. Em seguida, iniciou-se a sinterização.

Verificou-se no gráfico de temperatura x tempo (Figura 4.1), que a sinterização se iniciou aos 20°C, chegando aos 30°C aos 24 minutos. Não houve um aumento da temperatura dos gases, o que indica que não ocorreu a sinterização da mistura.

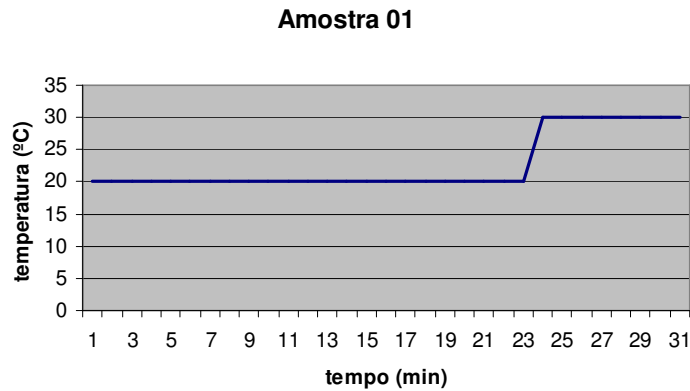


Figura 4.1: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 1.

No gráfico de depressão x tempo da amostra 1 (Figura 4.2), verifica-se que a depressão iniciou-se aproximadamente em 1500 mmca, ficando estável até os 16 minutos. Em seguida, ocorrem várias quedas.

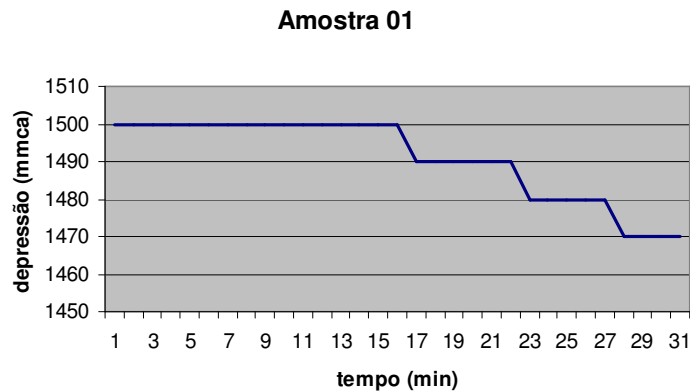


Figura 4.2: Gráfico de depressão x tempo da amostra 1.



A mistura 1 passou pelos processos de mistura, pelotização e sinterização. A análise macroscópica (Figura 4.3) mostra que a amostra não sinterizou, o que indicaria que utilizações de finos de resíduo de cimento, nas proporções utilizadas não são adequadas.



Figura 4.3: Aspecto macrográfico da amostra 1 após a sinterização.

A amostra 2 (46,25% RCD, 46,25% calcário, 7,5% coque e 2 litros de água) após ser misturada apresentou o aspecto homogêneo mostrado na Figura 4.4.



Figura 4.4: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a mistura.

Verificou-se no controle da vazão de ar x tempo (Figura 4.5), que a depressão iniciou-se aproximadamente de 1550 mmca, ficando estável a 1600 mmca por alguns minutos, sofrendo uma queda gradativa aos 13 minutos. A queda da depressão indica o aumento da vazão de ar através da mistura. Ocorreu a sinterização.

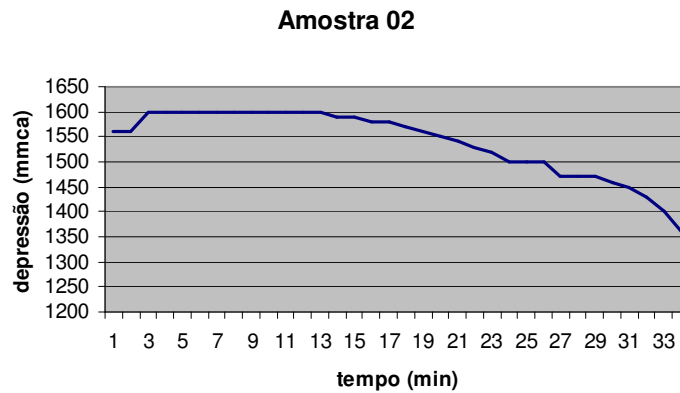


Figura 4.5: Gráfico de depressão x tempo da amostra 2

A eficiência da pelotização sobre a amostra 2 pode ser visualizada na Figura 4.6.



Figura 4.6: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a pelotização.

O bloco sinterizado da mistura 2 (Figura 4.7) mostra que as pelotas se fundiram pelo processo de sinterização. A fotografia foi obtida após o basculamento da panela piloto que leva à queda do sínter. Observa-se que a massa de sínter se apresenta como um único volume. A manutenção da integridade da massa aglomerada após a queda é comumente utilizada como um indicativo da boa resistência mecânica do sínter-produto. Ocorreu a sinterização.



Figura 4.7: Aspecto macrográfico da amostra 2 após a sinterização.

A amostra 3 (45,75% RCD, 45,75% calcário, 8,5% coque e 2 litros de água) foi misturada e pelletizada (Figura 4.8).



Figura 4.8: Aspecto macrográfico da amostra 3 após a pelletização.

No gráfico de depressão x tempo (Figura 4.9) verifica-se que a depressão iniciou-se aproximadamente em 1525 mmca, sofreu um aumento até 1550 mmca estabilizando-se por alguns minutos (4-13 minutos). Em seguida várias quedas foram constatadas. Não ocorreu uma curva delineada como a da mistura 2. Isto indica problemas de homogenização da mistura.

### Amostra 03

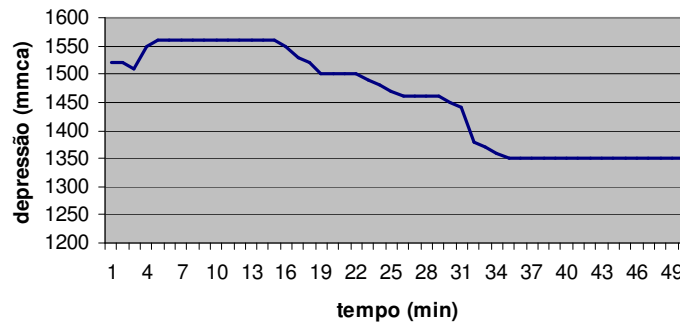


Figura 4.9: Gráfico de depressão x tempo da amostra 3.

Após ser misturada, a amostra 3 foi pelotizada e sinterizada, como mostra a Figura 4.10. Verifica-se a união das pelotas após a sinterização, sendo assim, ocorreu a sinterização.



Figura 4.10: Aspecto macrográfico da amostra 3 após a sinterização.

A mistura 4 (45,5% RCD, 45,5% calcário, 9% coque e 2 litros de água) foi misturada e pelotizada. Após a pelotização, no processo de sinterização, o gráfico de temperatura x tempo (Figura 4.11) mostra que a sinterização iniciou-se aos 30°C, chegando aos 200°C aos 33 minutos. Lembrando que esta temperatura é a temperatura dos gases que saem da panela piloto. Este gráfico indica que o aumento da quantidade de coque (9%) foi oportuno, tendo em vista que a curva de temperatura dos gases comportou-se perfeitamente dentro dos padrões de um processo adequado. A frente de combustão aproxima-se do “bedding”, isto faz com que inicie o rápido aumento da temperatura, atingindo o

seu pico, em seguida, acontece o resfriamento dos gases tendo em vista que ocorreu toda a queima de combustível.

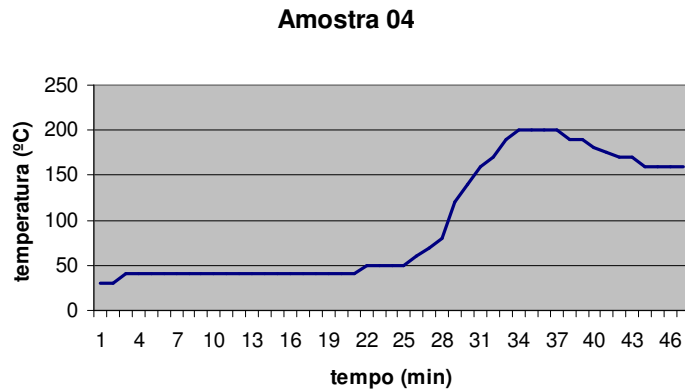


Figura 4.11: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 4.

No gráfico de depressão x tempo da amostra 4 (Figura 4.12), observa-se que a depressão iniciou-se aproximadamente em 1600 mmca, sofreu um aumento até 1640 mmca estabilizando-se por alguns minutos (4-11 minutos). Depois disso, várias quedas foram constatadas. A mistura ficou bem homogênea, pois a queda de depressão teve um comportamento adequado.

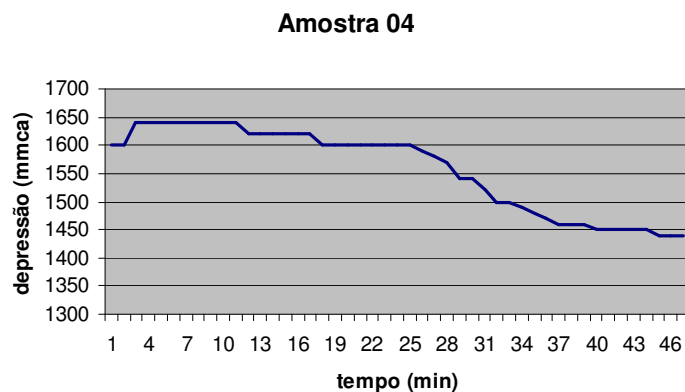


Figura 4.12: Gráfico de depressão x tempo da amostra 4.

Na amostra 4 (misturada, pelletizada e sinterizada) é observada a grande porosidade do sinter-produto, como mostra a Figura 4.13. Ocorreu a sinterização.



Figura 4.13: Aspecto macrográfico da amostra 4 após a sinterização.

A análise da Figura 4.14 indica que após a mistura mecânica, a amostra 5 (45,5% RCD, 22,75% calcário, 9% coque, 22,75% escória de alto-forno granulada e 2 litros de água) apresentou-se homogênea, isto é, os materiais constituintes foram bem misturados, estando em conformidade para o processo seguinte, a pelotização.



Figura 4.14: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a mistura.

Os dados da Figura 4.15 mostram que na sinterização da amostra 5, a depressão inicia-se um pouco acima de 1400 mmca, sofrendo um pequeno aumento aos 7 minutos e uma queda a partir dos 11 minutos. A descontinuidade observada em torno de 5 minutos de processo estaria relacionada à maior facilidade em que o ar passa pela mistura, devido provavelmente a formação de um canal preferencial que se fechou em seguida.

Com isso, a depressão voltou a aumentar. A mistura ficou homogênea, pois ela estava impermeável, isto quer dizer que ocorreu a sinterização.

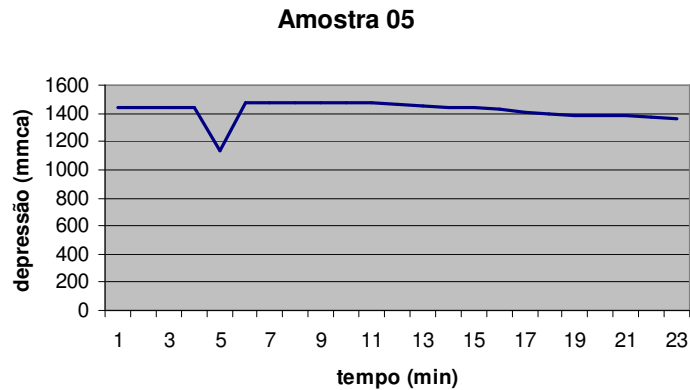


Figura 4.15: Gráfico de depressão x tempo da amostra 5

O aspecto macrográfico da amostra 5 após a pelotização é mostrado na Figura 4.16. Observa-se que houve a formação de grãos (pelotas), conseqüentemente, houve a aglutinação dos materiais através do processo de pelotização.



Figura 4.16: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a pelotização.

A amostra 5 foi misturada, pelotizada e sinterizada, observa-se o sinter-produto, como mostra a Figura 4.17. Ocorreu a sinterização.



Figura 4.17: Aspecto macrográfico da amostra 5 após a sinterização.

A mistura 6 (45,5% RCD, 22,75% calcário, 9% coque, 22,75% escória de alto-forno granulada e 2 litros de água) foi misturada, pelletizada. Após a pelletização, ocorreu a sinterização. No processo de sinterização, verificou-se no gráfico de temperatura x tempo (Figura 4.18), que a sinterização iniciou-se aos 40 °C, chegando aos 250°C aos 18 minutos. A mistura ficou mais permeável devido a redução da quantidade de calcário na mistura, pois o calcário necessita de maior gradiente térmico para calcinar ou seja, é necessário mais combustível (coque). Já com a adição de escória, que tem o poder de aglomeração maior do que o calcário acelerou a velocidade da frente de combustão, fazendo com que ocorresse a redução do tempo de sinterização, aumentando o pico de temperatura. Isto representa a “otimização” do processo.

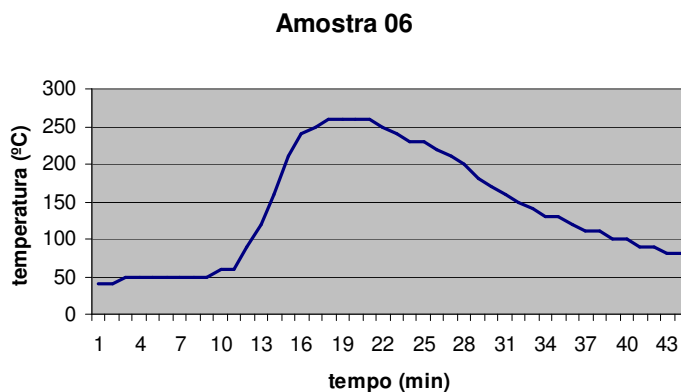


Figura 4.18: Gráfico de temperatura x tempo da amostra 6



No gráfico de depressão x tempo da amostra 6 (Figura 4.19), observa-se que a depressão iniciou-se aproximadamente em 1490 mmca, estabilizando-se por alguns minutos (9-12 minutos) em 1550 mmca, após esse tempo, constatou-se uma queda, e em seguida o aumento da coluna d'água aos 31 minutos. O gráfico demonstrou homogeneidade da mistura e a elevação representa a menor temperatura dos gases.

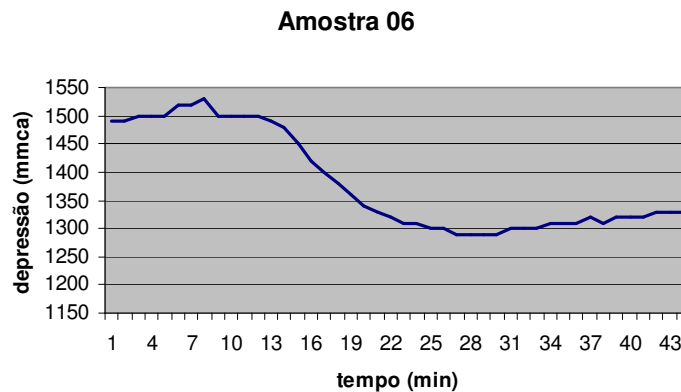


Figura 4.19: Gráfico de depressão x tempo da amostra 6.

A Figura 4.20 mostra a amostra 6 após sofrer o processo de mistura, pelletização e sinterização. Observa-se uma coloração marrom na porção da amostra localizada no meio do bloco. Isto é devido à presença de escória de alto-forno que se fundiu localmente. Constata-se que o bloco tem resistência adequada, pois mesmo após a queda da panela não se observou a desagregação, por isso foi escolhido, conseqüentemente, ocorreu a sinterização. A composição da amostra 1 e 6 são idênticas, o que as difere é que a primeira é feita com finos de argamassas e a segunda com finos de RCD. Como a amostra 1 não sinterizou, poder-se-ia afirmar que a presença de cerâmica vermelha é essencial para que ocorra a sinterização.



Figura 4.20: Aspecto macrográfico da amostra 6 após a sinterização.

### Caracterização do sínter

A Tabela 4.1 apresenta a análise química do sínter resultante da mistura 6. Constata-se ser o sínter constituído basicamente de  $\text{SiO}_2$  e resíduos insolúveis. Considerando a quantidade de coque utilizado (9%), e que os constituintes do sínter são similares aos da escória, do calcário e do cimento/cerâmica que deu origem ao RCD é de esperar que os resíduos insolúveis sejam impurezas incorporadas ao RCD fisicamente ou quimicamente durante o processamento das cerâmicas presentes no RCD.

Tabela 4.1: Composição Química do sínter da mistura 6

Composição	%
$\text{SiO}_2$	50,95
Resíduo Insolúvel	36,04
CaO	15,94
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,43
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,54
MgO	3,64
P.F. 1000°C	-0,34

A caracterização do agregado fabricado a partir da moagem do sínter resultante da mistura 6 (45,5% RCD, 22,75% calcário, 9% coque, 22,75% escória de alto-forno granulada e 2 litros de água) é apresentada na Tabela 4.2. Dos outros tipos de sínter não foi feita tal caracterização, pois a análise macroscópica descartou seu potencial de uso como agregado. De acordo com

a Norma NBR 7219 de 1987 o agregado de sínter está dentro dos padrões recomendados, pois apresenta menos do que 1% de material pulverulento. A densidade real do material foi de 2,76 g/ml. Na Norma NBR 9976 de 1987, o ensaio de determinação de matéria orgânica apresentou coloração clara, concluindo-se a ausência deste material. De acordo com a Norma NBR 15116: 2004, para agregado reciclado de resíduo misto, que é o caso estudado, a norma recomenda absorção de água menor ou igual a 17%, isto significa que o agregado estudado estaria fora dos padrões recomendados.

Tabela 4.2: Caracterização do agregado de sínter

Ensaio	Resultados
Material Pulverulento	0,3 %
Densidade Real	2,76 g/ml
Determinação matéria orgânica	isento
Absorção de água	18,82 %

O ensaio de abrasão Los Angeles não foi realizado, pois o sínter não apresentou resistência suficiente para o ensaio. Isto fez com que se optasse em utilizar o sínter apenas como agregado miúdo.

## 4.2. Caracterização das argamassas fabricadas

Na Figura 4.21 são apresentados de forma comparativa, os valores médios de resistência à compressão, após 28 dias de cura em câmara úmida, das argamassas para concretos fabricadas com as composições especificadas na Tabela 3.7.

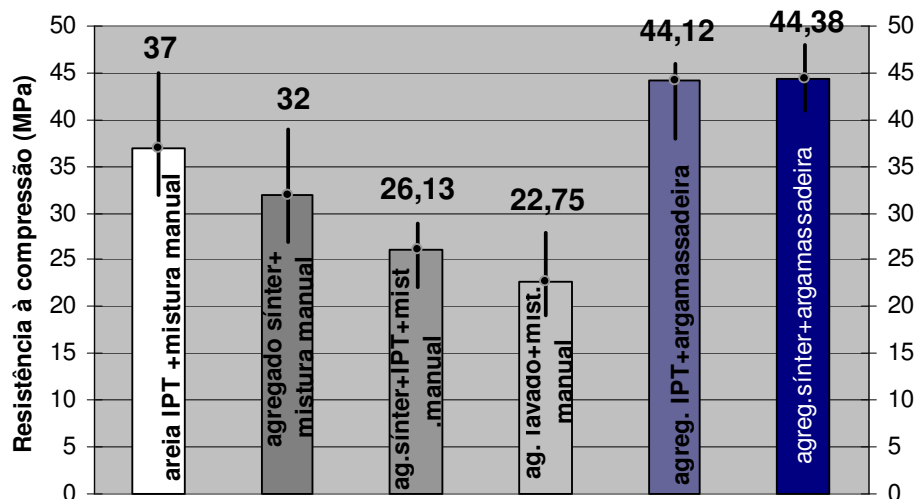


Figura 4.21: Resultados de resistência à compressão após 28 dias de cura em câmara úmida das argamassas

Comparando-se os dois grupos, verifica-se que há uma grande diferenciação entre os dois tipos de mistura utilizada, sendo a mistura mecânica mais eficiente, pois as argamassas ficam mais homogêneas. Verifica-se que a dispersão dos resultados de modo geral foi significativa. Isto poderia estar relacionado à calibração da máquina de teste, e não à técnica de confecção dos corpos-de-prova, uma vez que: 1) grandes dispersões ocorreram para a mistura manual e com argamassadeira; 2) os dados de módulo de elasticidade dinâmico obtidos em equipamento muito sensível e os do ensaio de absorção apresentaram dispersões bem menores (Figuras 4.22 e 4.23). A dispersão dos dados de resistência fez com que análise da influencia da substituição fosse feita considerando a faixa de variação obtida e não a média. Analisando-se os dados dos compostos obtidos por mistura manual, verifica-se que as argamassas para concretos com 100% de areia sinterizada obtiveram resistências sempre superiores às argamassas confeccionadas com areia lavada convencional. Quanto à areia do IPT as resistências são próximas. Estes resultados são confirmados quando se compara os obtidos com argamassadeira. Ou seja, os dados indicam que é possível substituir a areia natural por finos de resíduo sinterizado (45,5% RCD, 22,75% calcário, 9% coque, 22,75% escória de alto-forno granulada e 2 litros de água), no tocante à

resistência mecânica à compressão. E que em relação à areia lavada convencional o desempenho seria ligeiramente superior. Estranhamente, já que individualmente os dados são relativamente próximos, os resultados da mistura IPT-sínter promoveram níveis mais baixos de resistência. Isto poderia ser devido a homogeneização da mistura, uma vez que a mistura manual levou a maiores diferenças entre ao composto com areia do IPT e com agregado de sínter.

Os valores estimados para o módulo de Young dos compostos foram obtidos através das médias dos valores medidos nos corpos-de-prova de cada tipo de argamassa para concreto estrutural, sendo que para cada amostra foram determinadas pelo menos 15 medidas. Estes dados são apresentados na Figura 4.22.

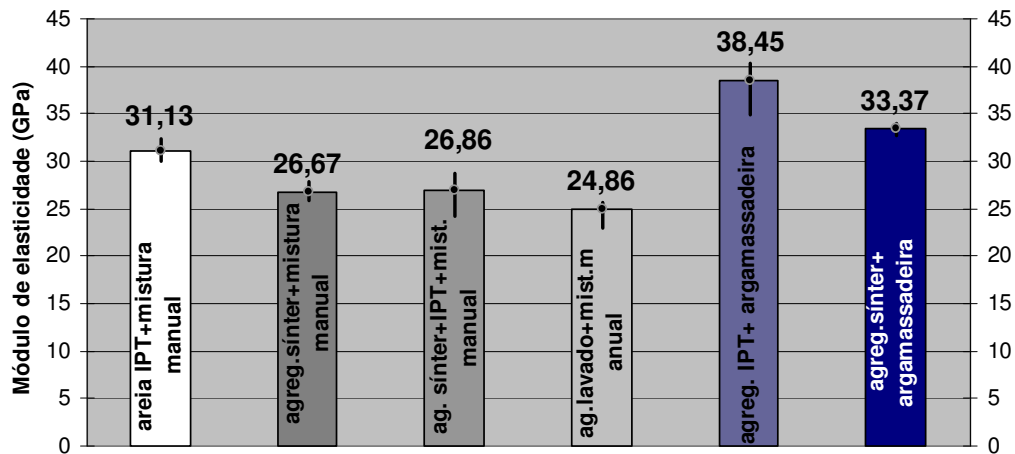


Figura 4.22: Estimativas do módulo de elasticidade após 28 dias de cura em câmara úmida, das argamassas.

Observa-se que a maior homogeneização promovida pela mistura mecânica afeta os valores do módulo de elasticidade. Não há variação significativa no valor do módulo de elasticidade das argamassas confeccionadas com areia sinterizada em relação a argamassa com areia comum ou com a mistura sínter-IPT, mesmo se consideradas as dispersões de resultados obtidas. Todos os

tipos de argamassas fabricadas apresentam módulos de elasticidade menores do que os módulos das argamassas 100% areia do IPT. Comparando os dois grupos, os módulos das argamassas misturadas manualmente são menores do que os de mistura mecânica. A substituição da areia lavada convencional por sínter parece não afetar o módulo de Young, já a substituição da areia do IPT leva a uma diminuição em torno de 13%.

A influência da presença de areia sinterizada na permeabilidade dos compostos pode ser avaliada pelos resultados obtidos e apresentados na Figura 4.23, onde está locada a capacidade de absorção de água em porcentagem de variação em peso do corpo-de-prova totalmente seco e após saturação em água por 24 horas.

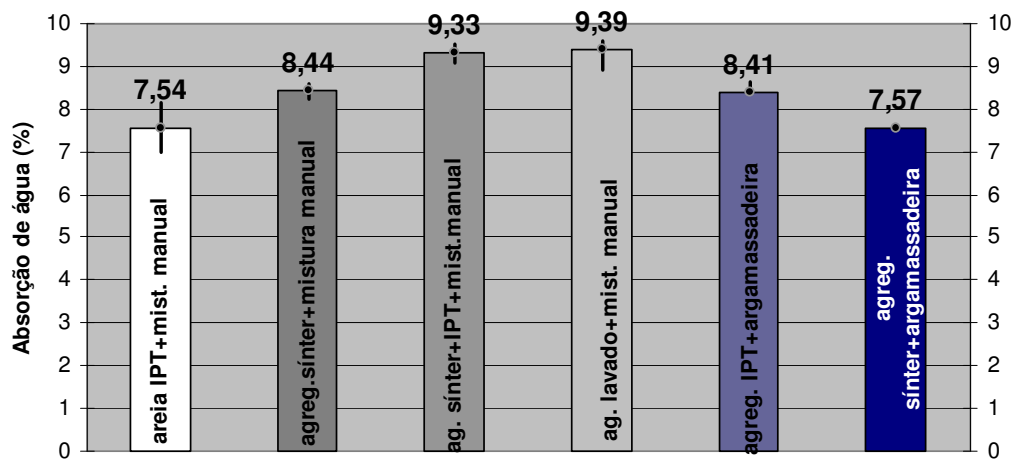


Figura 4.23: Capacidade de absorção percentual de água em peso após 28 dias de cura em câmara úmida das argamassas.

Observa-se que a homogeneidade da mistura afeta a argamassa confeccionada de sínter de forma diferente da que influencia a argamassa com areia do IPT: o composto com areia do IPT de mistura manual absorve menos água do que o misturado mecanicamente. O oposto ocorre com a argamassa de sínter. Isto poderia estar relacionado à forma das partículas. Todos os tipos de argamassas fabricadas no primeiro grupo apresentam absorções de água

maiores do que as argamassas com 100% areia do IPT, apesar disso, ainda podem ser utilizados, pois de acordo com a Norma NBR 9778 de 1986 é recomendado uma absorção máxima dos agregados miúdos de 10%. Já no segundo grupo, as argamassas com 100% de agregado de sínter, apresentam absorções de água menores do que as argamassas com 100% de agregado do IPT. Os dados indicam que quanto a absorção de água pode-se utilizar o sínter estudado como substituto para a areia lavada convencional.

Os resultados acima indicam que a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e a absorção das argamassas para concreto fabricadas com agregado miúdo proveniente da britagem do sínter estudado são similares àqueles das argamassas produzidas com areia lavada convencional e normatizada. Ou seja, do ponto de vista de propriedades mecânicas e absorção de água é viável a utilização de sínter de RCD utilizando escória de alto-forno, coque, calcário e água, nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 litros, respectivamente, para a produção de concretos convencionais.

No entanto considerando que o custo de fabricação de uma sinterização de pequeno porte (produção de 100.000 toneladas/ano) é de três milhões de dólares e o baixo preço da matéria-prima hoje utilizada, a areia natural, em termos financeiros ainda é inviável a utilização de agregados sinterizados. No entanto, em situações em que a necessidade de consumir finos de RCD seja prioritária a sinterização pode ser uma solução a ser analisada, já que é viável tecnicamente.

### **Avaliação das argamassas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

A microscopia da amostra de concreto com areia 100% sinterizada é mostrada na Figura 4.24. Através da Fotomicrografia, com um aumento de 50 vezes, percebe-se que o agregado miúdo (agregado de sínter), ao centro, possui aspecto liso e com poros, diferenciando-se da pasta, localizada em volta deste agregado.

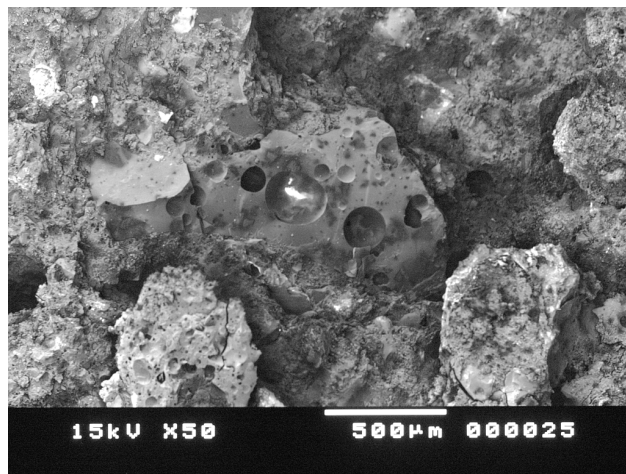


Figura 4.24: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.

Na Figura 4.25, com um aumento de 150 vezes na mesma amostra, é possível observar uma mancha esbranquiçada, que seria o agregado de sínter e a parte mais escura, a pasta.

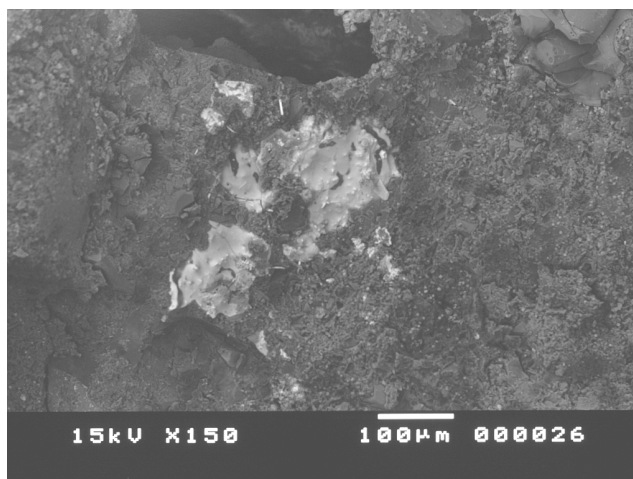


Figura 4.25: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 150 vezes)-MEV-IES.

Na Figura 4.26, com um aumento de 2000 vezes na amostra com areia sinterizada, observa-se a interface agregado/pasta. A parte lisa e mais clara é o agregado miúdo confeccionado com sínter, já a parte rugosa é a pasta. Verifica-se a presença de etringita (filetes como se fossem agulhas) na pasta.



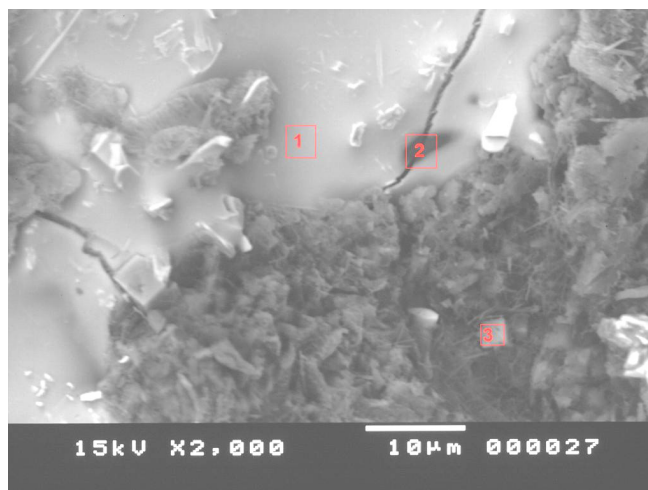


Figura 4.26: Fotomicrografia da amostra com areia sinterizada (aumento de 2000 vezes)-MEV-IES.

Utilizou-se o EDS para realização de análise química semi-quantitativa das áreas demarcadas na Figura 4.26. A composição química da área 1 é mostrada na Tabela 4.3. A composição química da área 2 está na Tabela 4.4 e a da área 3 está na Tabela 4.5.

Nota-se na Tabela 4.3, grande quantidade de chumbo na área analisada, presente no agregado sinterizado. Sua origem provavelmente pode ser explicada, pelo fato do agregado ser fabricado com resíduo de construção e demolição. Já os demais elementos são: o silício e o cálcio.

Tabela 4.3: Composição Química da área 1 da Figura 4.26.

Elementos	Peso (%)
Si-K	18,76
Pb-K	73,72
Ca-K	7,52

A Tabela 4.4 apresenta a composição química da área 2 da Figura 4.26. A área escura é basicamente constituída de silício.

Tabela 4.4: Composição Química da área 2 da Figura 4.26.

Elementos	Peso (%)
Si-K	94,78
Ca-K	5,22

A Tabela 4.5 apresenta a composição química da área 3 da Figura 4.26. A área branca localizada no meio da pasta é constituída em sua maior parte por estanho, provavelmente oriundo do agregado reciclado e em menor parte por cálcio.

Tabela 4.5 : Composição Química da área 3 da Figura 4.26.

Elementos	Peso (%)
Al-K	0,38
Sn-K	64,15
Ca-K	35,48

A amostra do concreto com areia lavada convencional, com um aumento de 50 vezes é mostrada na Figura 4.27. A homogeneidade é nítida. Não se nota o agregado miúdo, porque a pasta o envolve.

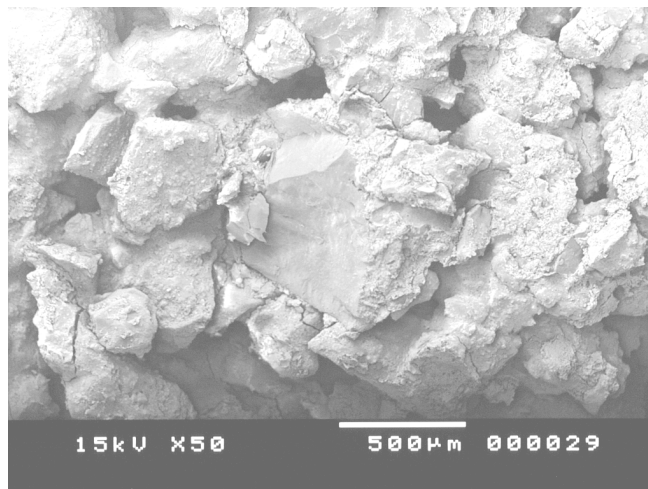


Figura 4.27: Fotomicrografia da amostra com areia comum (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.

Na Figura 4.28, com um aumento de 500 vezes, observa-se a interface da pasta/agregado. A parte mais lisa é o agregado de areia normal, já a parte a direita da figura é a pasta, com um aspecto mais rugoso. Esta diferenciação não é nítida como na amostra com areia sinterizada.

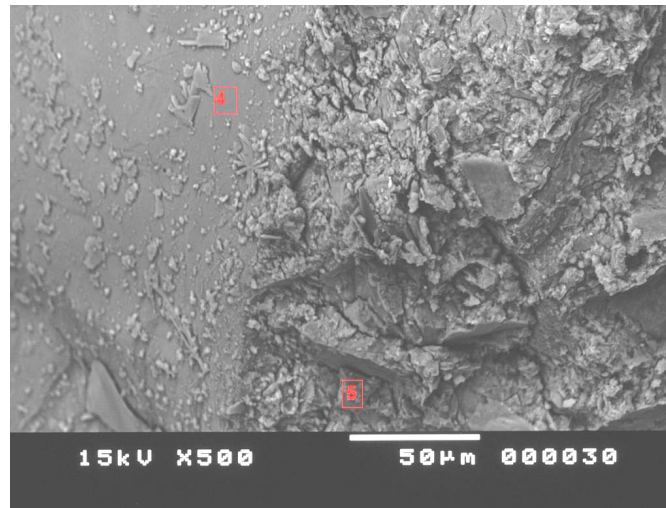


Figura 4.28: Fotomicrografia da amostra com areia comum (aumento de 500 vezes)-MEV-IES.

Ainda na Figura 4.28, observa-se a composição química da área 4, localizada no agregado de areia normal, dada na Tabela 4.6. Mais da metade do material da área é constituído por cálcio, seguida de silício. O que poderia ser um indicativo da presença de CSH (silicato de cálcio hidratado).

Tabela 4.6 : Composição Química da área 4 da Figura 4.28.

Elementos	Peso (%)
Si-K	39,04
Ca-K	54,94
Al-K	6,01

A Tabela 4.7 apresenta a composição química da área 5 da Figura 4.28, localizada na pasta da amostra. Sua constituição é basicamente de cálcio. Podendo indicar a presença de portlandita e/ou calcita.

Tabela 4.7: Composição Química da área 5 da Figura 4.28.

Elementos	Peso (%)
Si-K	17,39
Ca-K	79,05
Al-K	3,56

A microscopia da amostra de argamassa para concreto com 100% de areia do IPT é mostrada na Figura 4.29. Através da figura, com um aumento de 50 vezes, percebe-se que há uma grande homogeneidade entre a pasta e o agregado. A pasta envolve o agregado miúdo, apresentando o mesmo aspecto da argamassa com areia lavada convencional (Figura 4.27).

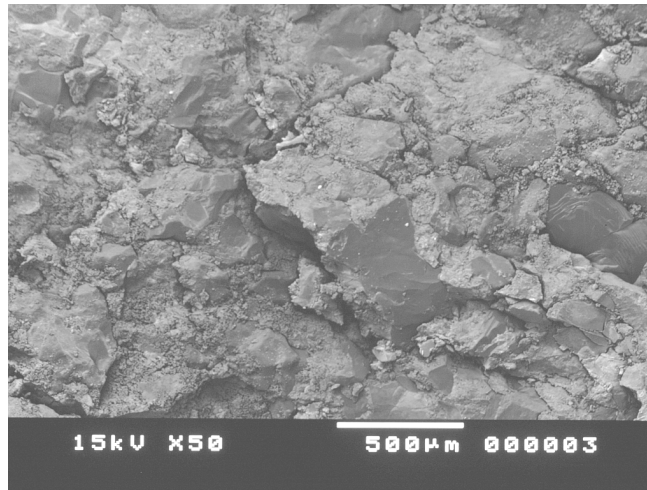


Figura 4.29: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.

Na Figura 4.30, com um aumento de 500 vezes, observa-se a diferenciação entre a pasta e o agregado. A parte lisa com aspecto mais escuro (área 6) é o agregado de areia do IPT e o restante, ao seu redor é a pasta.

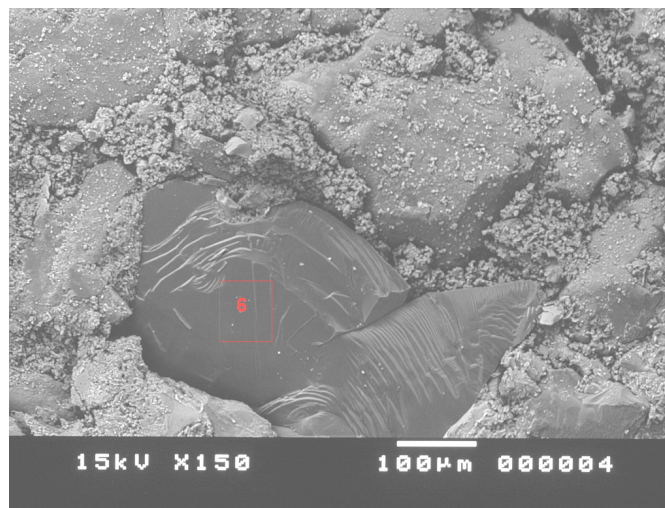


Figura 4.30: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 150 vezes)-MEV-IES.

A Tabela 4.8 apresenta a composição química da área 6 da Figura 4.30. Esta área mais escura é constituída em sua maior parte por sílica, conseqüentemente, é o agregado miúdo.

Tabela 4.8: Composição Química da área 6 da Figura 4.30.

Elementos	Peso (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,47
$\text{SiO}_2$	98,08
$\text{CaO}$	1,46

Na Figura 4.31, com um aumento de 500 vezes, observa-se a interface da pasta/agregado. A parte mais lisa com aspecto de lâminas é o agregado de areia do IPT, já a parte a direita da figura é a pasta, com um aspecto mais rugoso.

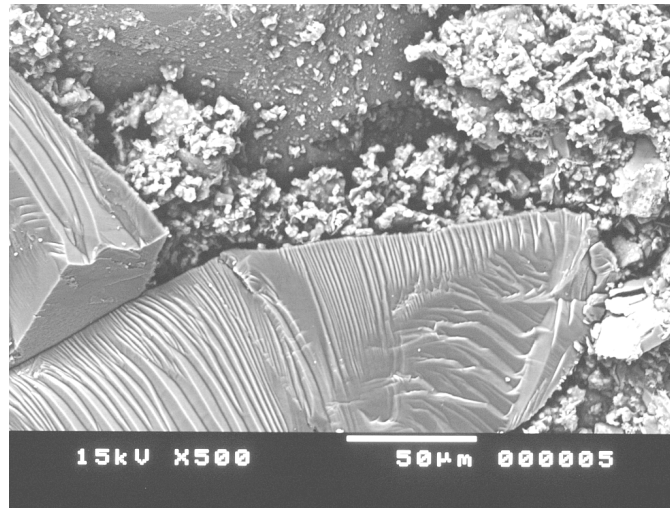


Figura 4.31: Fotomicrografia da amostra com areia do IPT (aumento de 500 vezes)-MEV-IES.

Na Figura 4.32, com um aumento de 50 vezes, observa-se ao lado direito da figura (área 8) a areia do IPT e ao lado esquerdo, a areia sinterizada com aspecto mais poroso (área 7). Isto fica mais nítido na Figura 4.33, com aumento de 150 vezes. Esta argamassa para concreto foi fabricada com os dois tipos de agregado miúdo. A pasta envolve os dois agregados distintos.

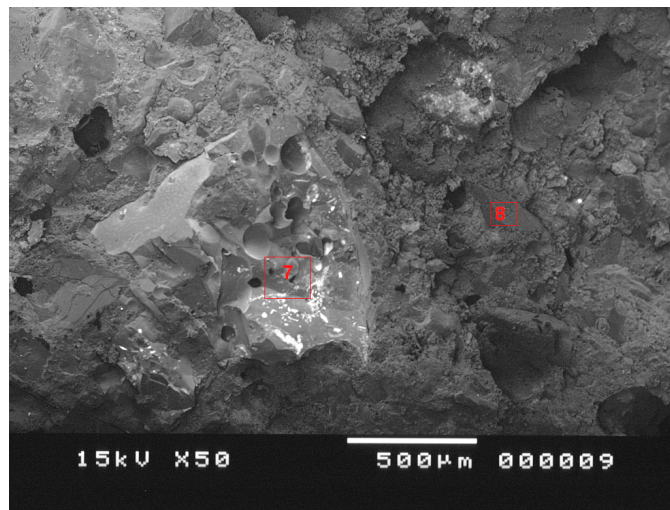


Figura 4.32: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 50 vezes)-MEV-IES.

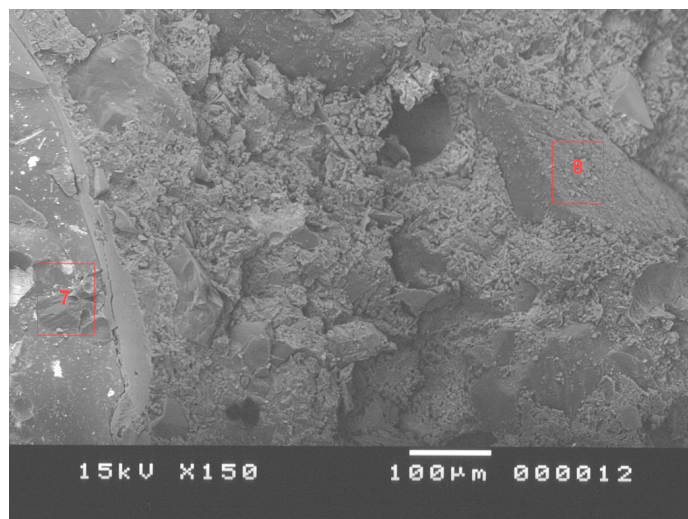


Figura 4.33: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 150 vezes)-MEV-IES.

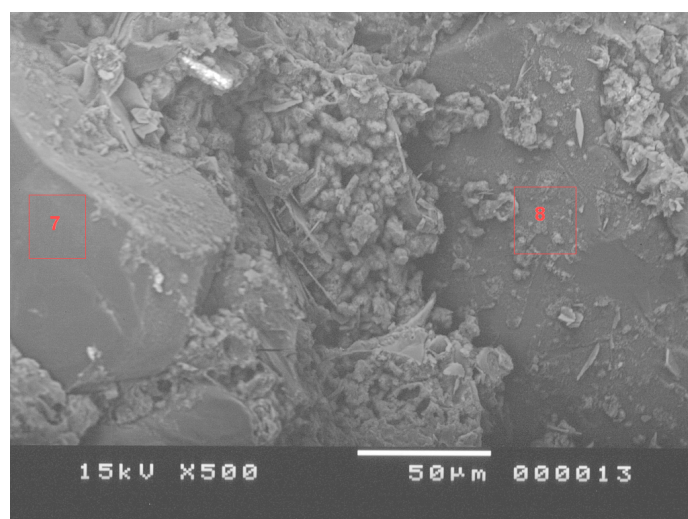


Figura 4.34: Fotomicrografia da amostra com agregado de sínter+ agregado IPT (aumento de 500 vezes)-MEV-IES.

A Tabela 4.9 apresenta a composição química da área 7 da Figura 4.34. Esta área um pouco mais clara é constituída em sua maior parte por sílica, contendo também outros constituintes em menor proporção, como: sódio, magnésio, potássio, cálcio e ferro. Isto indica que realmente esta área é o agregado de sínter.

Tabela 4.9: Composição Química da área 7 da Figura 4.34.

Elementos	Peso (%)
$Al_2O_3$	12,61
$SiO_2$	50,62
$CaO$	16,94
$Na_2O$	1,42
$MgO$	2,46
$K_2O$	1,97
$Fe_2O_3$	5,69
$SnO_2$	8,30

Já na Tabela 4.10 verifica-se que basicamente a área 8 da Figura 4.34 é constituída de sílica, comprovando ser a areia do IPT utilizada nas argamassas para concretos.

Tabela 4.10: Composição Química da área 8 da Figura 4.34.

Elementos	Peso (%)
$Al_2O_3$	0,05
$SiO_2$	97,33
$CaO$	2,62



## 5. CONCLUSÕES

---

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que:

- 1) Não é possível sinterizar finos de argamassa utilizando calcário, coque, escória de alto-forno e água nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 1,25 litros de água, respectivamente;
- 2) É possível sinterizar finos de RCD utilizando escória de alto-forno, coque, calcário e água nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 litros, respectivamente;
- 3) A presença de cerâmica vermelha parece ser necessária para que os finos de resíduo de construção possam ser sinterizados com escória de alto-forno, coque, calcário e água;
- 4) A análise macroscópica e a avaliação qualitativa da resistência ao impacto indicaram que a sinterização foi mais efetiva para a amostra constituída de resíduo de construção (RCD), escória de alto-forno, coque, calcário e água, nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 litros, respectivamente;
- 5) Os dados indicam que, no tocante a resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água, é possível substituir a areia natural por sínter confeccionado de finos de resíduos de construção, escória de alto-forno, coque, calcário e água, nas proporções de 45,5%, 22,75%, 9%, 22,75% e 2 litros.
- 6) A análise da microestrutura por microscopia de varredura mostra ser o agregado de sínter mais poroso, o que não implicou no aumento do índice de absorção de água do composto com ele confeccionado. Isto poderia estar relacionado à maior envolvimento do mesmo pela pasta, que dessa forma vedaria os poros externos do sínter;

7) Em situações em que a necessidade de consumir finos de RCD seja prioritária a sinterização pode ser uma solução a ser analisada, pela sociedade que visa o desenvolvimento sustentável já que é viável tecnicamente.

## 6. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS

---

Para novos estudos relacionados ao presente trabalho são sugeridos os seguintes temas:

- 1) estudo utilizando areia lavada convencional e sínter com distribuição granulometria contínua e comumente empregada, sem separação por faixas;
- 2) sinterização de finos de RCD em fornos de mufla utilizando escória e calcário;
- 3) sinterização de finos de RCD em fornos de mufla utilizando escória, calcário e cinzas;
- 4) queima de finos RCD em fornos de mufla.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AGENDA 21 GLOBAL. In: *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano - Eco-92*. Rio de Janeiro; 1992.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD reciclados. *IBRACON- Anais do 43º Congresso Brasileiro de Concreto*, 2001a.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. *Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. E-MAT – Revista de Ciência e Tecnologia e de Materiais de Construção Civil, 1(1):22-32. 2004b.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. BT/PCC/279. São Paulo, 2001c.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: *IBRACON Ct- 206 – Meio Ambiente*. Anais do VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2003. (CD-ROM). São Paulo; 2003.p.22

ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F. R; SELMO, S. M. S.; JOHN, V. M. *Utilização de pilhas de homogeneização para controle de agregados miúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. Anais do Construção 2001. v. 2, p. 713 - 720. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2001b.

ANGULO, S. C; JOHN, V. M. *Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade*. Anais do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002. p. 1613 -1624. Foz do Iguaçu; 2002b.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos*. Anais da I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo; 2004a.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: *IBRACON Ct-206/IPEN*. Anais do V Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2002. (CD-ROM). São Paulo; 2002a.

ARAÚJO, L. A. *Siderurgia*. Editora F.T.D.S.A, 483p. São Paulo, 1967.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 5738 de 1980: Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7211 de 2005: Agregados para concreto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7214 de 1982: Areia Normal para Ensaio de Cimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7215 de 1991: Determinação da Resistência à Compressão do Cimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7215 de 1996: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7218 de 1987: Determinação do Teor de Argila e Materiais Friáveis. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 7219 de 1987: Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9778 de 1986.  
Determinação da absorção de água por imersão-Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9976 de 1987:  
Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos Por Meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro.

AZEVEDO, G. O. D.; KIPERSTOCK, A.; MORAES, L. R. S. *Resíduos de Construção Civil em Salvador: os caminhos para uma gestão sustentável*. ENG. SANIT.AMBIENT. vol.11, n. 1, jan/març 2006, 65-72.

BORDEAU, Luc. *The Agenda 21 on Sustainable Construction*. Construction & Environment. November 23 e 24. São Paulo: 2000.

BUTLER, A.M. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. *Revista do Concreto-IBRACON*. Fevereiro de 2005: 26-29.

CAMILO, G.; PACHECO, T. A.; HONORATO, E. P. Determinação de limites de utilização de resíduos oleosos na sinterização. *28º Seminário de Redução de Minério de Ferro, 12º Seminário de Controle Químico em Metalurgia e 8º Seminário de Carboquímicos*. Vitória, ES: 1 a 3 de dezembro de 1997.

CIB. *Agenda 21 on sustainable construction*. CIB Report Publication 237. 1999.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução 307 de 5 julho de 2002.

COSTA, N. A. A.; COSTA JR., N. C. A.; DETONI, M. M. L. *et al. A reciclagem de resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada*. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo: 2004.

DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F.; MASUERO, A. B.; GEYER, R. M. T. Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a indústria da

construção civil. Volta Redonda, RJ, 1994. In: 25° Seminário de Redução e Matérias-primas siderúrgicas.

EVANGELISTA, L. R.; BRITO, J. *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. CEMENT & CONCRETE COMPOSITES 29. 2007.

FACHIN, L. C. *A reciclagem de resíduos sólidos como meio de geração de emprego e renda, análise dos problemas sócio-ambientais e do custo de oportunidade*. (Monografia). Departamento de Economia da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

FLORIM, L. C.; QUELHAS, O. L. G. *Contribuição para a construção sustentável: características de um projeto habitacional eco-eficiente*. ENGEVISTA, v.6, n.3, p.121-120, dezembro 2004.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologias e materiais alternativos de construção. In: *Materiais alternativos de construção- entulho de construção e demolição*. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2003.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M.C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: *Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção*, 1996, São Paulo: Epusp/Antac. 170 p., p. 107-115.

HANSEN, T. C. HEDEGARD, S.E. Properties of recycled aggregate concretes as affected by admixtures in original concretes. *American Concrete Institute Journal*. January-February 1984; 81 (3): 21-26.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Departamento Nacional de Contas. *Participação percentual das classes e atividades no PIB*. 2007.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.; et al. *Controle ambiental das Indústrias de Ferro-Gusa em Altos Fornos de Carvão Vegetal*. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002.

JOHN, V. M.; ANGULO, S.C.; AGOPYAN, V.; ABIKO, A. K.; PRADO, R. T. A.; GONÁLVES, O. M.; SOUZA, U. E. *Agenda 21 for the Brazilian construction industry- a proposal. Construction & Environment*. November 23 e 24, 2000. São Paulo.

JOHN, V. M.; ANGULO, S.C.; AGOPYAN, V. *Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. (?).

JOHN, V. M.; ANGULO, S.C.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V.; SILVA, V. G. *Agenda 21: Uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro*. ANTAC- Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Canela- 24 a 27 de abril de 2001.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. *Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. Conference on the use of recycled materials in buildings and structures 8-11 Barcelona, Spain. Abstract Id Number: 536 9 Páginas. November 2004a.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. *Influence of recycled aggregate quality on concrete*. Conference on the use of recycled materials in buildings and structures 8-11 Barcelona, Spain. Abstract Id Number: 545 9 Páginas. November 2004b.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LEVY, S. M. *Contribuição ao estudo de durabilidade de concretos, produzidos com resíduo de concreto e alvenaria*. (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. *Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil*. In: *Workshop sobre reciclagem e reutilização*



- de resíduos como materiais de construção*. São Paulo: Epusp, Antac, 1997. 170 p. p. 137-146.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete – microstructure and properties 3<sup>a</sup> ed. Usa: Mcgraw-Hill, 2005.
- MEHTA, P.K. High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. International workshop on sustainable development and concrete technology.1994.
- MENG, F. H.; CHAO, L. H. Study of fine sediments for making lightweight aggregate. *Waste Management Research*. 2007; 25, 449-456.
- MÜLLER, A. *Lightweight aggregates from masonry rubble*. Conference on the use of recycled materials in buildings and structures. 8-11 November 2004, Barcelona, Spain. Abstract Id Number: 97 10 Páginas.
- NASCIMENTO, A. A. P.; ASSIS, C. S.; *et al.* Sustentabilidade. Comitê Técnico do “Meio Ambiente”: 8 anos de vitórias e contribuições a sustentabilidade da construção civil. *Revista Concreto*. (?).
- OTT, C. *Gestão pública e políticas urbanas para cidades sustentáveis: a ética da legislação no meio urbano aplicada às cidades com até 50.000 habitantes*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2004.
- PÁDUA, J. P. *Dados relatados*. 2007.
- PÁDUA, J. P. de. *Mini-Sinterização KTS Processo SKP*. LT/KTS-072.1996.
- PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21. In: *Tradução do Relatório CIB- Publicação 237*. Novembro, 2000.p. 17.
- PENA, A. Sinterização de minério de ferro. 2<sup>a</sup> edição. 1997.
- PEREZ, F. A. Sinterização a coque. Capítulo 3. (?)

RILEM. <http://www.rilem.net/>. Acesso em 23/12/2006.

SALEM, A.; CORDEIRO, J. S.; SOUZA, F. R. *Estudo da resistência à compressão e da absorção de água em concretos produzidos com a adição conjunta de resíduos de construção e demolição e lodos de estações de tratamento de água*. AMBIENTE CONSTRUÍDO, Porto Alegre, v.4, n.2, p. 31-40, abr/jun. 2004.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance and properties structural concrete made with recycled concrete aggregate. *ACI Materials Journal*, September-october, 2003. 371-380.

SILVA, D. S.; PELISSER, F. Concreto com agregado reciclado. *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto*, São Paulo: IBRACON, 2005.p.246-258.

SLU (Secretária de Limpeza Urbana de Belo Horizonte). *Dados relatados*. 2006.

SOUZA, C. A. Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

USIMINAS. Utilização de minério de ferro na siderurgia. (?).

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. *Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição*. ENGENHARIA CIVIL. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.4, n.4, p.47-63. 2004 b.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. *Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduo de construção e demolição*. ENGENHARIA CIVIL, 19: 5-18. 2004a.

WEIMANN, K.; MÜLLER, A. Properties of Building material gained from wet-processed crushed concrete fines. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. Volume 1. 8-11 November 2004, Barcelona, Spain.

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

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)