

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

RIVALDO TEODORO COELHO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS
ALTERNATIVOS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO
PORTLAND: Uso de grãos de polipropileno reciclado em substituição
aos agregados do concreto.

Campinas - SP
Fevereiro de 2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

RIVALDO TEODORO COELHO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS
ALTERNATIVOS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO
PORTLAND: Uso de grãos de polipropileno reciclado em substituição
aos agregados do concreto.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, concentração em Edificações, linha de pesquisa de Gerenciamento, Técnicas e Materiais de Construção.

Orientador: **PROF. DR. VÍTOR ANTÔNIO DUCATTI**

Campinas, 25 de fevereiro de 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C65c Coelho, Rivaldo Teodoro
Contribuição ao estudo da aplicação de materiais alternativos nos compósitos à base de cimento Portland; uso de grão de polipropileno reciclado em substituição aos agregados do concreto / Rivaldo Teodoro Coelho.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Vítor Antônio Ducatti.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Refugo de plástico. 2. Plásticos. 3. Polipropileno. 4. Reciclagem. 5. Compósitos poliméricos. 6. Blocos de concreto. 7. Gestão Ambiental. I. Ducatti, Vítor Antônio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Contribution to the study of the application of alternartive materials in the composites based on Portland cement: use of polypropylene grains recycled in substitution to the aggregates of the concrete.

Palavras-chave em Inglês: Scrap plastic, Plastics, Polypropylene, Recycling, Polymeric composites, Concrete blocks e Environmental management

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Ana Elisabete Paganelli Guimarães e Rosa Cristina Cecche Lintz

Data da defesa: 25/02/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS
ALTERNATIVOS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO PORTLAND:
Uso de grãos de polipropileno reciclado em substituição aos agregados do concreto.**

RIVALDO TEODORO COELHO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, concentração em Edificações, linha de pesquisa de Gerenciamento, Técnicas e Materiais de Construção.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2005 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti
Presidente e Orientador
FEC – UNICAMP

Prof. Dr^a. Ana Elisabete Paganelli Guimarães
FEC – UNICAMP

Prof. Dr^a. Rosa Cristina Cecche Lintz
PUCCAMP

Campinas, 25 de fevereiro de 2005

À memória de meus pais, Maria Cecília Manoel Coelho e Wilson do Rosário Coelho e de minha tia Marilene Manoel Ferrante.

À minha madrinha, Henriette Trabulsi.

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais: Ademir, Luciano, Marcelo, Marçal e Rodolfo - pelo empenho, soluções criativas, constante busca da excelência, senso de trabalho em equipe além do ótimo ambiente de trabalho;

Aos funcionários da Secretaria da Pós-Graduação, Carlos, Lucinere e Noemia - pela assistência eficaz desempenhada pela equipe em especial pela Sr^a. Paula;

Aos técnicos do Centro de Tecnologia da UNICAMP;

À Chayena Lázara Jorge, pelo companheirismo, incentivo e apoio incondicional.

À MBT/Degussa - pelo fornecimento do aditivo superplastificante;

À Holcim/Cimento Barroso - fornecedora do Cimento CP-ARI-V-Plus;

Ao Sr. Sérgio da empresa Masei Blocos Ltda. - pela atenção durante a fabricação dos blocos de concreto com GRAP;

Ao engenheiro Luiz Alfredo Cotini Grandi - pelas dicas e motivação;

Ao Prof. Dr. André Munhoz Argollo Ferrão - pelos incentivos iniciais ao projeto;

Aos Professores (es) Doutores (as) do FEC que me ajudaram a compreender melhor o sentido da realização deste estudo;

Ao Dr. Antônio Faggiane, Diretor Acadêmico da Universidade Estadual de Campinas;

Aos Professores (as) Doutores (as) membros das Bancas Examinadoras: Ana Elisabete Paganelli Guimarães, Antonio Ludovico Beraldo, Gladis Camarini e Rosa Cristina Cecche Lintz - pelas contribuições na melhoria deste estudo e de meu estágio de desenvolvimento técnico, científico, ético e profissional e,

Ao Prof. Dr. Vítor Antonio Ducatti - que por sua dedicação ao ensino e à pesquisa e por seu interesse demonstrado por este trabalho com orientação segura e competente, me honra com a oportunidade de ser seu orientando.

“Na natureza nada se perde, nada se cria; tudo se transforma”.
LAVOISIER (1743-1794)

“Dêem-me um erro fecundo, cheio de grãos, pronto para brotar sob o efeito de suas próprias correções. Guardem para vocês sua verdade estéril”.
VILFREDO PARETO

Resumo

O principal objetivo desta dissertação foi a determinação das principais propriedades mecânicas de um compósito à base de cimento Portland CP-V-ARI (alta resistência inicial) tendo como agregado os grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAP). A escolha do plástico se deve ao fato de que é um dos principais materiais utilizados pela indústria em geral sendo descartado em média na proporção de 7% do peso e 25% do volume do lixo urbano metropolitano e índice de reciclagem de 17,5%. No caso específico do polipropileno a proposta de seu uso deveu-se ao fato dele ser um dos três plásticos mais consumidos e descartados no Brasil, tornando-se oportuno o desenvolvimento de alternativas para a reciclagem deste material como material para a construção civil como agregado para o concreto. Neste estudo, foram realizados ensaios com base nas normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, para a caracterização do concreto no estado endurecido, principalmente para a determinação das resistências à compressão axial e diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade secante. Os resultados obtidos em ensaios com misturas com e sem agregados minerais (substituição) foram satisfatórios permitindo o desenvolvimento de vários concretos com resistência à compressão axial (f_{c_j}) adequado para a produção de elementos pré-fabricados, concretos porosos adequados para drenagens e enchimento de lajes, painéis, blocos de concreto e grãos de polipropileno mineralizados com a pasta de cimento, dentre outras aplicações. Houve uma redução superior a 30% do peso final do concreto por meio da redução da massa específica. O novo concreto também se mostrou extremamente dúctil, adequado para especificações de absorção de impactos. Através dos resultados desta pesquisa pôde-se concluir que é perfeitamente viável o uso do concreto com grãos de polipropileno em substituição aos agregados minerais na construção civil.

Palavras-chave: compósitos, concreto, meio ambiente, plástico, polipropileno, reciclagem.

Abstract

The main objective of this dissertation was the determination of the main mechanical properties of a composite based on Portland cement CP-V-ARI (high initial resistance) tends as aggregate the grains recycled agglutinated of polypropylene (GRAP). The choice of the plastic is due to the fact that it is one of the main materials used by the industry in general being discarded on average in the proportion of 7% of the weight and 25% of the volume of the metropolitan urban garbage and index of recycling of 17,5%. In the specific case of the polypropylene the proposal of his use was due to his fact to be one of the three plastics more consumed and discarded in Brazil and that indicators reveal the need to develop alternatives for the recycling of this material in the engineering and in the building site as an aggregate for the concrete seeking the partial or total substitution of minerals aggregates. In this study, rehearsals were accomplished with base in the norms of ABNT - Brazilian Association of Technical Norms, for the characterization of the concrete in the hardened state, mainly for the determination of the resistances to the axial and diametrical compression, resistance to the traction in the flexing and module of drying elasticity. The results obtained in rehearsals with mixtures with and without aggregates minerals (substitution) they were satisfactory allowing the development of several concretes with resistance to the axial compression (f_{cj}), through appropriate mixtures to the production of prefabricated elements, an appropriate porous concrete for drainages and stuffing of flagstones and polypropylene grains mineralized with the cement paste, among other applications. There was a superior reduction to 30% of the final weight of the concrete through the reduction of the specific mass. The new concrete was also shown extremely ductile, appropriate for specifications of absorption of impacts. Through the results of this research it could be concluded that it is perfectly viable the use of the concrete with polypropylene grains in substitution to the mineral aggregates in the building site.

Word-keys: composites, concrete, environment, plastic, polypropylene, recycling.

Lista de Ilustrações

FIGURA 5.1: MODELO DE PRODUÇÃO LINEAR.....	61
FIGURA 5.2: CICLO DE PRODUÇÃO FECHADO.....	63
FIGURA 6.1: MATERIAIS SECOS E DOSADOS	78
FIGURA 6.2: GRÃOS RECICLADOS AGLUTINADOS DE POLIPROPILENO – GRAP.....	79
FIGURA 6.3: MISTURA DOS MATERIAIS NA ARGAMASSADEIRA	80
FIGURA 6.4: MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA CÚBICOS	81
FIGURA 6.5: MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	83
FIGURA 6.6: CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DA SÉRIE A, TIPO P6.....	84
FIGURA 6.7: CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DA SÉRIE A, TIPO P10.....	84
FIGURA 6.8: CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DA SÉRIE B, TIPO P22.....	85
FIGURA 6.9: VIGAS PRISMÁTICAS TIPO P6, P10 E P22.....	85
FIGURA 6.10: PENEIRAS PARA OS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA	88
FIGURA 6.11: FRASCO DE CHAPMAN	89
FIGURA 6.12: DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL E AXIAL	91
FIGURA 6.13: DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO	92
FIGURA 6.14: INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE	93
FIGURA 7.1: CURVA GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DE POLIPROPILENO	95
FIGURA 7.2: CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	97
FIGURA 7.8: DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO TÍPICO PARA O CONCRETO	103
FIGURA 7.8-A: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/1, 7 DIAS.....	104
FIGURA 7.8-B: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/2, 7 DIAS	104
FIGURA 7.8-C: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/1, 7 DIAS.....	105
FIGURA 7.8-D: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/2, 7 DIAS.....	105
FIGURA 7.8-E: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/3, 7 DIAS	106
FIGURA 7.8-F: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P10/1, 7 DIAS	106
FIGURA 7.8-G: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/2, 7 DIAS.....	107

FIGURA 7.8-H: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/3, 7 DIAS.....	107
FIGURA 7.8-I: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P22/1, 7 DIAS	108
FIGURA 7.8-J: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P22/2, 7 DIAS.....	108
FIGURA 7.8-K: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/1, 28 DIAS.....	109
FIGURA 7.8-L: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P0/2, 28 DIAS	109
FIGURA 7.8-M: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/22, 28 DIAS	110
FIGURA 7.8-N: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/24, 28 DIAS	110
FIGURA 7.8-O: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P6/25, 28 DIAS.....	111
FIGURA 7.8-P: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P10/22, 28 DIAS.....	111
FIGURA 7.8-Q: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P10/23, 28 DIAS.....	112
FIGURA 7.8-R: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P10/24, 28 DIAS	112
FIGURA 7.8-S: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P22/17, 28 DIAS.....	113
FIGURA 7.8-T: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P22/18, 28 DIAS	113
FIGURA 7.8-U: GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO P22/19, 28 DIAS	114
FIGURA 7.9: CORTE DE SEÇÃO DIAMETRAL DO TIPO P6.....	119
FIGURA 7.10: CORTE DE SEÇÃO TRANSVERSAL DO TIPO P6.....	120
FIGURA 7.11: CORTE DE SEÇÃO DIAMETRAL DO TIPO P22.....	121
FIGURA 7.12: CORTE DE SEÇÃO TRANSVERSAL DO TIPO P22	122
FIGURA 7.13: SEÇÃO DIAMETRAL DO TIPO P10	123
FIGURA 8.1: PREPARAÇÃO DA MISTURA PARA A PRODUÇÃO DE BLOCOS COM GRAP	128
FIGURA 8.2: BLOCOS DE CONCRETO: 1ª. TENTATIVA DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS.....	129
FIGURA 8.3: BLOCOS DE CONCRETO: 2ª. TENTATIVA DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS.....	130
FIGURA 8.4: BLOCOS DE CONCRETO COM GRAP (2004)	130

Lista de Tabelas

TABELA 3.1: DECOMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS.....	17
TABELA 3.2: INDICADORES DA INDÚSTRIA DE TERMOPLÁSTICOS - BRASIL.....	20
TABELA 3.3: EVOLUÇÃO DO CONSUMO APARENTE DE TERMOPLÁSTICOS.....	20
TABELA 5.1: MATERIAIS RECICLÁVEIS - INDICADORES.....	32
TABELA 5.2: RESÍDUOS RECICLADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	60
TABELA 6.1: IDENTIFICAÇÃO DAS SÉRIES DE MISTURAS EXPERIMENTAIS.....	77
TABELA 7.1: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO GRAP.....	94
TABELA 7.2: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	96
TABELA 7.3: RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS SÉRIES A E B, AOS 14 DIAS, CP'S CÚBICOS.....	99
TABELA 7.4: RESUMO DAS RESISTÊNCIAS E DA MASSA ESPECIFICA DOS CP'S CÚBICOS.....	99
TABELA 7.5: RESULTADOS: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	100
TABELA 7.6: RESULTADOS: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	101
TABELA 7.7: RESULTADOS: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	101
TABELA 7.8: RESULTADOS: MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE.....	102
TABELA 7.9: ANÁLISE RELATIVA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	115
TABELA 7.10: ANÁLISE RELATIVA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	116
TABELA 7.11: ANÁLISE RELATIVA À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	116
TABELA 7.12: ANÁLISE RELATIVA AO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE.....	117

Lista de abreviaturas e siglas

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química
ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE - Associação Brasileira da Embalagem
ABREMPLAST - Associação Brasileira de Recicladores de Plástico
ABS - Acrilonitrila butadieno estireno
BRASCELPA - Associação Brasileira de Papel e Celulose
CEMPRE - Compromisso Empresarial para a Reciclagem
CETEA - Centro de Tecnologia em Embalagem
CNI - Confederação Nacional das Indústrias
DSD - Duales System Deutschland
EVA - Poliacetato de Etileno Vinil
GRAP – Grãos Reciclados Aglutinados de Polipropileno
IPI - Imposto sobre Produtos Industrializados
PA - Poliamida
PE - Polietileno
PEAD - Polietileno de Alta Densidade
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
PET - Polietileno Tereftalato
PP - Polipropileno
PS - Poliestireno
PVC - Policloreto de Vinila
WCED- World Comission on Environment and Development

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	2
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	4
1.4 CONTRIBUIÇÃO	4
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	5
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	7
2.1 VISÃO GERAL.....	7
2.2 O CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	9
2.3 O CONCEITO DOS 3R'S	10
3 PLÁSTICO.....	14
3.1 ORIGEM DO PLÁSTICO	14
3.2 PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS DA INDÚSTRIA DE TERMOPLÁSTICOS	17
3.3 A PRODUÇÃO DE LIXO E A RECICLAGEM	21
4 DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	23
4.1 DISPOSIÇÃO.....	24
4.2 INCINERAÇÃO	26
4.3 RECICLAGEM.....	26
4.4 GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	27
4.5 O PLÁSTICO E OS RESÍDUOS SÓLIDOS	29
5 MATERIAIS RECICLÁVEIS	31
5.1 PRINCIPAIS MATERIAIS RECICLÁVEIS.....	31
5.2 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS: CONCEITOS DE RECICLAGEM	33
5.3 IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM.....	35
5.4 TECNOLOGIA E PROCESSOS UTILIZADOS NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS	37
5.5 RECICLAGEM PRIMÁRIA	38
5.6 RECICLAGEM SECUNDÁRIA	38
5.7 RECICLAGEM TERCIÁRIA	39
5.8 RECICLAGEM QUATERNÁRIA	40
5.9 A RECICLAGEM MECÂNICA DO RESÍDUO PLÁSTICO	43
5.10 APLICAÇÕES DO PLÁSTICO PÓS-CONSUMO RECICLADO.....	47
5.11 BARREIRAS À RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO	48
5.12 OPORTUNIDADES PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO	49
5.13 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO.....	52
5.14 RECICLAGEM E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	56
5.15 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL	57
5.16 RECICLAGEM DO ENTULHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	64

5.17	PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS	66
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
6.1	MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO	71
6.1.1	<i>Cimento</i>	71
6.1.2	<i>Agregado miúdo e graúdo</i>	72
6.1.3	<i>Água</i>	72
6.1.4	<i>Aditivos químicos</i>	72
6.1.5	<i>Grãos de polipropileno aglutinado reciclado</i>	73
6.2	DOSAGEM EXPERIMENTAL	75
6.3	PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS.....	77
6.4	CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	79
6.4.1	<i>Corpos-de-prova cúbicos</i>	79
6.4.2	<i>Procedimento de cura</i>	82
6.4.3	<i>Corpos-de-prova cilíndricos</i>	82
6.5	EQUIPAMENTOS.....	86
6.6	MÉTODOS DE ENSAIOS	87
6.6.1	<i>Determinação da composição granulométrica</i>	87
6.6.2	<i>Massa específica aparente</i>	88
6.6.3	<i>Determinação da massa unitária</i>	90
6.6.4	<i>Resistência à compressão axial</i>	90
6.6.5	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	91
6.6.6	<i>Resistência à tração na flexão</i>	91
6.6.7	<i>Determinação do módulo de elasticidade secante</i>	92
7	RESULTADOS.....	94
7.1	CARACTERIZAÇÃO DO GRÃO RECICLADO AGLUTINADO DE POLIPROPILENO (GRAP).....	94
7.2	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA NA EXECUÇÃO DO CONCRETO	96
7.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL: CORPOS-DE-PROVA CÚBICOS.....	98
7.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL: CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	100
7.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	100
7.6	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MÓDULO DE RUPTURA)	101
7.7	MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE: DEFORMAÇÃO ESTÁTICA	102
7.8	REDUÇÕES DE MASSA ESPECÍFICA E DE RESISTÊNCIAS.....	115
7.9	ASPECTOS VISUAIS	117
8	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	124
8.1	COMPORTAMENTO RELATIVO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	124
8.2	COMPORTAMENTO RELATIVO À COMPRESSÃO DIAMETRAL	125
8.3	COMPORTAMENTO RELATIVO À RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO	126
8.4	COMPORTAMENTO RELATIVO AO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE.....	127
8.5	PRODUÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS COM O COMPÓSITO	128
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
10.1	OBRAS CITADAS.....	136
10.2	ACERVO TÉCNICO CEMPRE E PLASTIVIDA	143
10.3	OBRAS CONSULTADAS	144
10.4	PORTAIS CONSULTADOS NA INTERNET	145
ANEXO A: PLANILHAS DE CÁLCULO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE SECANTE.....		146

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo geral

Este trabalho estudou a aplicação de materiais alternativos na produção de compósitos à base de cimento Portland por meio do uso de grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAP) em substituição aos agregados do concreto.

Seis tipos de plásticos estão entre os de maior consumo no Brasil (e no mundo), à saber:

PEBD - polietileno de baixa densidade;

PEAD - polietileno de alta densidade;

PP - polipropileno;

PVC - policloreto de vinila;

PET - polietileno tereftalato e,

PS - poliestireno.

Conseqüentemente, são descartados em grandes quantidades sendo que todos têm potencialidades para a reciclagem e para conduzir estudos deste gênero sendo que, dentre os tipos de plástico relatados, o plástico escolhido, o PP – Polipropileno, apresenta o maior consumo aparente de plásticos no Brasil (cerca de 25%).

Os grãos GRAP são obtidos a partir do descarte de sacos de rafia utilizados para embalar produtos agrícolas (batatas, cebola, etc), constituídos de polipropileno.

Estes sacos são encaminhados para pequenas empresas de reciclagem nas quais passam por um processo de transformação no qual os sacos são inicialmente cortados, triturados e lavados para a remoção de impurezas. Logo em seguida, são secos e encaminhados para uma máquina aglutinadora na qual serão formados os grãos.

Estes grãos têm formato semelhante a um grão de “pipoca estourada”, ou seja, esféricos, estriados e fibroso com dimensão máxima característica de 9,50 mm, módulo de finura 5,81 e massa específica $0,93 \text{ g/cm}^3$, aspecto que favorece a aderência com a pasta de cimento.

Na usina piloto visitada, para a obtenção de 1 kg de GRAP, são necessários aproximadamente de 15 a 20 sacos de rafia.

Dada a leveza do material ele é indicado na substituição dos agregados minerais para se obter concreto leve, quer seja por ausência de areia (concreto cavernoso, concreto pipoca, *no-fines concrete*, etc) quer seja pela presença destes grãos GRAP apenas substituindo os agregados miúdos e graúdos no concreto convencional.

1.2 Objetivo específico

Neste trabalho, foram realizados ensaios laboratoriais com base nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT com o propósito de caracterizar os materiais constituintes do compósito à base de cimento Portland e analisar a viabilidade da substituição dos

agregados miúdo e graúdo pelo GRAP no concreto. Foram medidas as principais resistências em diversas misturas no estado endurecido.

Dois objetivos se destacam na fase inicial deste estudo. Um deles foi o de se obter um concreto leve e com alta resistência já nas primeiras idades (7 a 28 dias).

Outro objetivo foi o aprisionamento dos grãos no compósito final de forma que não se desprendessem do compósito resultante vindo novamente a poluir o meio ambiente.

Este estudo, no entanto, tem caráter exploratório para o aprimoramento de idéias que possam torná-lo mais explícito e estimular a formulação de novas hipóteses e orientar a necessidade de realização de novas pesquisas.

Dentre os ensaios realizados e apresentados a partir da seção 6, destacam-se:

- Determinação da composição granulométrica
- Determinação da massa específica aparente
- Determinação da massa unitária
- Resistência à compressão axial
- Resistência à tração por compressão diametral
- Resistência à tração por flexão
- Módulo de elasticidade secante

Após a análise dos resultados, foram sugeridas aplicações viáveis em termos de construção civil.

1.3 Justificativas

Atualmente, milhões de toneladas de embalagens e de produtos manufaturados em plásticos, vidros e papel são jogadas no lixo em aterros sanitários, em lixões a céu aberto ou simplesmente despejados em rios e mangues. São matérias-primas que poderiam ser recicladas e transformadas em um novo produto agregando-lhes valor.

No caso do material plástico, uma grande variedade de produtos manufaturados com diferentes tipos de plástico podem ser reciclados evitando-se que após o seu descarte venham a acumular-se no meio ambiente, em usinas de compostagem ou em aterros sanitários. Além de ser atualmente o plástico de maior consumo aparente no Brasil, a escolha do polipropileno se deveu também ao fato de ser o plástico mais versátil para a indústria em geral, mais presente no cotidiano humano, com produção, consumo e descarte crescentes.

O primeiro produto resultante da reciclagem do plástico é o grão ou grânulo aglutinado. O GRAP com o qual serão desenvolvidos os ensaios e a produção de compósitos à base de cimento Portland é resultante desta etapa do processo de reciclagem do plástico.

1.4 Contribuição

Os dados obtidos na realização deste trabalho e aqueles que virão poderão contribuir para que as áreas de arquitetura e construção civil, gestão ambiental, possam empreender obras de construção civil vislumbrando a possibilidade de executá-las com menores custos, tornando-as mais acessíveis, promovendo a adoção de tecnologias mais limpas.

Além disso, podem criar novos empregos socialmente interessantes, praticar-se a cidadania e dignidade humana, gerar empresas ambientalmente responsáveis, promover a solução de problemas ambientais por meio da engenharia civil, desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas além de incentivar as pesquisas nas áreas de engenharia, arquitetura e construção civil no âmbito do desenvolvimento sustentável.

1.5 Delimitação do tema

Este trabalho descreve aspectos relevantes sobre o desenvolvimento sustentável e sobre a produção e reciclagem do plástico e apresenta o processo de obtenção dos grãos de plástico reciclado do tipo polipropileno com a finalidade de utilizá-lo como agregado para a produção de concreto.

Apresenta algumas alternativas para o reaproveitamento de resíduos na construção civil, principalmente para produção de compósitos com base em cimento Portland.

Neste trabalho não foram aprofundadas as análises relacionadas à viabilidade econômica dos concretos resultantes comparativamente aos concretos convencionais assim como não estão presentes análises comparativas de características, comportamentos ou propriedades físico-químicas ou de incompatibilidade química ou biológica de concretos adicionados por qualquer outro material proveniente do descarte de resíduos sólidos industriais, da construção e demolição, comerciais ou domésticos.

1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em seções. A seção 2 aborda as questões relativas ao conceito de desenvolvimento sustentável. A seção 3 apresenta a origem e a produção do plástico.

Na seção 4 são apresentados os conceitos sobre a reciclagem do plástico e de outros materiais e aborda o uso de resíduos sólidos na indústria da construção civil para a produção de compósitos. A seção 5 apresenta as alternativas para a destinação final de resíduos sólidos urbanos. Na seção 6 é descrita a metodologia dos ensaios laboratoriais cujos resultados são apresentados na seção 7.

A análise e a discussão dos resultados é apresentada na seção 8 e as considerações finais na seção 9.

2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1 Visão Geral

As organizações e a sociedade em geral passam por transformações profundas de natureza geo-econômica e geopolítica, as quais estão determinando não apenas como serão gerenciadas as empresas ou com quais tecnologias desenvolverão seus produtos, processos e serviços, mas, essencialmente, onde e com quais recursos naturais e energéticos desenvolverão suas atividades.

Analisando algumas tendências, a gestão ambiental pode ser considerada como das mais sérias e urgentes não apenas sob a ótica empresarial, concentrada em pares combinados de resultados imediatos como lucro/competitividade, qualidade/produtividade, matéria-prima/tecnologia, mas também do ponto de vista da própria existência, perenidade e funcionamento das empresas.

Além disto, a sociedade pressiona as organizações para que estas adotem em suas operações os conceitos e as práticas do desenvolvimento sustentável de forma que o meio ambiente possa ser preservado e transmitido às gerações futuras para a utilização dos bens comuns como a água, a fauna, a flora, o ar.

Quando se fala em gerações futuras, entende-se que o desenvolvimento sustentável poderá garantir os recursos naturais e energéticos necessários para que haja mercados, clientes e empresas funcionando, para todos.

Ao se falar em futuro, deve-se compreender que se trata do futuro do planeta Terra, dos bens comuns e de seus habitantes. Embora seja ainda tratado como uma questão filosófica, percebe-se que também há elementos políticos, aspectos de cidadania, de ética, de estratégia, de organização, de método, de competitividade, de gestão empresarial o que leva a crer que é essencialmente uma questão da qual a engenharia e a tecnologia não podem se abster de oferecer análise, pesquisas e desenvolver soluções técnicas.

Além disto, são questões que se caracterizam como globais, mas ocorrem em níveis diferenciados em cada localidade.

Em termos mundiais, as populações urbanas estão crescendo rapidamente, sem que se consiga planejar e gerar soluções para os diversos problemas como, por exemplo, geração de moradia, emprego e renda, saúde e saneamento básico, educação, segurança, infra-estrutura de serviços sociais, dentre outros. De maneira semelhante, há de se desenvolver a sustentabilidade econômica, social e ambiental refletindo-se sobre quanto e de onde serão extraídos os recursos naturais necessários para a produção e o consumo de tecnologias menos sujas e mais sustentáveis, suprimento energético além de solucionar as questões relativas ao descarte dos resíduos sólidos.

Nesse sentido, acredita-se que o grande desafio neste terceiro milênio será o desenvolvimento sustentável, ou seja, aquele que poderá propiciar às gerações futuras condições de sobrevivência e existência com qualidade de vida, dignidade e em sintonia com o meio ambiente ao qual a humanidade pertence e pelo qual é responsável, seja ela pertencente à classe

de empresários ou de cidadãos comuns. Tal responsabilidade recai sobre bens comuns: o ar, a água, a fauna, a flora, o solo e os habitats.

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico, sem dúvida, trouxeram grandes benefícios à sociedade. Mas, aliados ao crescimento populacional e a um comportamento de consumo inadequado, provocaram vários efeitos colaterais. Entre eles, destaca-se a poluição, um dos principais agentes da degradação do meio ambiente e da redução da qualidade de vida humana.

2.2 O conceito de desenvolvimento sustentável

Segundo Kinlaw (1997), o conceito de desenvolvimento sustentável se popularizou através do trabalho e das publicações da World Commission on Environment and Development (WCED). Em 1987, a WCED publicou o relatório intitulado *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum), mais conhecido como *The Brundtland Report*, que define o desenvolvimento sustentável como “[...] desenvolvimento [...] que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (WCED apud Kinlaw, 1997, p.82).

Cabe salientar que o desenvolvimento sustentável não nega a necessidade do progresso tecnológico. Segundo Donaire (1995), o desenvolvimento sustentável tem três vertentes principais: crescimento econômico, equidade social e equilíbrio ecológico. O desenvolvimento tecnológico deve ser orientado para metas de equilíbrio com a natureza e de

incremento de capacidade de inovação dos países em desenvolvimento; o progresso deve significar a integração de maior riqueza, maior benefício social equitativo e equilíbrio ecológico.

Para este tipo de desenvolvimento ser compatível com o equilíbrio ecológico, situações irreversíveis como a destruição da biodiversidade ou o esgotamento de certas matérias-primas devem ser evitadas. Desta maneira, o adequado gerenciamento de resíduos constitui uma alternativa que contribui para alcançar o desenvolvimento sustentável, uma vez que permite economia de capital natural (matéria-prima, energia, água) e de saneamento ambiental (reduz poluição do ar, água, solo e subsolo) (CALDERONI, 1997).

2.3 O conceito dos 3r's

A abordagem hierárquica dos 3R's parece ser a mais lógica e promissora estratégia de gerenciamento de resíduos e tem sido adotada por vários países, como o Canadá e países da Europa (BROWN, 1993). Essa abordagem tem a seguinte hierarquia: reduzir, reutilizar e reciclar.

Reduzir na origem é a alternativa preferível, pois se o resíduo não é gerado, não é gerado também um problema de controle de resíduo. A redução na origem pode ser obtida por meio da redução de rejeitos em um processo industrial, da redução de embalagens e do desenvolvimento de produtos mais duráveis.

Reutilizar significa simplesmente usar um objeto ou material novamente. Assim, reciclar é usar um resíduo no lugar de um material virgem na fabricação de novos produtos.

Reciclar, nesta abordagem significa recuperar um material extraído de resíduos misturados ou de resíduos de outros processos. Como exemplos podem ser citados a recuperação

energética, onde resíduos são queimados para produzir energia ou o uso de resíduos de incineração como agregado para construção de estradas (BROWN, 1993).

Independentemente do ramo de atividade empresarial, é possível destacar pelo menos três fatores que caracterizam o tipo de relacionamento que determinada empresa ou setor da economia estabelece com a questão ambiental.

Em primeiro lugar, há de se verificar se as matérias-primas e insumos básicos utilizados na produção são renováveis ou recicláveis.

Em segundo, se o processo produtivo ou de prestação de serviço é poluente, ou seja, se causa resíduos e se a eficiência do uso de recursos naturais incorpora o aproveitamento de sobras, refugos e resíduos.

Em terceiro lugar, se a empresa age com consciência ambiental, que pode determinar a obediência a padrões, normas, legislação e, até mesmo, a criatividade na busca de alternativas menos agressivas na produção e no estabelecimento de uma relação mais amistosa com o meio ambiente.

Os três aspectos mencionados associam-se a outras variáveis, dentre as quais a capacidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento, a informação e a formação de pessoal, e o comprometimento empresarial na compreensão das implicações que as atividades empresariais têm e como estas afetam e transformam o meio ambiente.

Os empresários mais atentos irão verificar que o investimento na proteção ao meio ambiente repercute na salvaguarda da imagem da empresa, na proteção de seu pessoal e das comunidades vizinhas, melhorando-lhes a qualidade de vida.

Além disso, protege seu capital contra sanções legais, estabelecendo um senso de responsabilidade compartilhada. Responde às pressões do mercado quanto à necessidade de certificação ambiental, gerando negócios lucrativos.

A redução de resíduos, a reutilização e a reciclagem são alternativas efetivas para o tratamento das ineficiências decorrentes da concepção dos produtos e daquelas observadas no processo produtivo ou de prestação de serviços. Juntas, podem determinar uma relação mais consciente e amigável empresa-meio ambiente.

O ser humano interfere no meio ambiente, inevitavelmente gerando resíduos (líquidos, sólidos e gasosos) através de suas ações, tanto durante o processo industrial como durante o consumo dos produtos provenientes dele. Porém, o simples descarte dos resíduos no ar, na água ou no solo pode produzir efeitos prejudiciais no meio ambiente, tornando-se um problema sério para o próprio homem.

Para Demajorovic (1995), a relação entre resíduos e a problemática ambiental torna-se mais visível quando se trata de resíduos sólidos, uma vez que seu grau de dispersão é bem menor do que o dos líquidos e gasosos. Atualmente os lixões e os aterros, controlados e sanitários, são as fôrmas mais usuais de destinação dos resíduos urbanos gerados no Brasil. Entretanto, tais alternativas não são adequadas para a problemática da destinação desses resíduos. O adequado gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos torna-se necessário, com o objetivo de evitar ou minimizar os agravos à saúde e à poluição ambiental, como também manter aspectos estéticos e de bem estar para a população, contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

Segundo Demajorovic (1995), os resíduos sólidos possuem valor econômico agregado podendo ser reaproveitados no que denominou ‘ecological cycle management’, o que

significa a montagem de um sistema circular, onde a quantidade de resíduos a ser reaproveitada dentro de um sistema produtivo seja crescente e a quantidade disposta decrescente.

A reciclagem surge, então, como uma alternativa de destinação dos resíduos sólidos. Essa alternativa permite o reaproveitamento dos resíduos como matéria-prima, reincorporando-os ao processo produtivo, reduzindo o seu impacto ambiental.

A reciclagem é uma estratégia que integrada à política de gestão de resíduos sólidos atualmente considerada ideal, segue as seguintes prioridades, na ordem indicada (DEMAJOROVIC, 1995):

- Redução da produção de resíduos;
- Reciclagem do material
- Incineração com reaproveitamento de energia;
- Disposição em aterros sanitários controlados.

Conforme Wiebeck (1997), dentre os materiais recicláveis, o plástico representa um resíduo de grande aceitação para ser submetido ao processo de reciclagem. Segundo Sherman (1989), a reciclagem é uma das melhores alternativas para os resíduos plásticos.

3 PLÁSTICO

3.1 Origem do plástico

Os plásticos estão na terceira geração de compostos do setor petroquímico e pelo fato desses compostos possuírem diferentes temperaturas de ebulição, é possível separá-los mediante um processo conhecido como destilação ou craqueamento.

A primeira geração é a do gás ou nafta e a segunda é composta pela produção de resinas. Para a produção do plástico é necessário, em média, 4% de petróleo refinado.¹

O setor de transformação do plástico e em especial a do termoplástico é dividido em três linhas de produção: extrusão (fabricação de sacolas, bolsas, embalagens, tubos e conexões), injeção (balde, bacias, brinquedos, peças de automóveis e de eletrodomésticos) e linha de sopro (garrafas para refrigerantes e bombonas de gasolina).

Plástico, do grego Plastikós, significa aquilo que é moldável. Foi inventado há mais ou menos 150 anos, mas sua produção industrial e aplicação comercial ocorreu em 1937 e intensificou-se à partir de 1940, coincidindo com a substituição de outros materiais, principalmente os metálicos que, em função da Segunda Guerra Mundial, eram preferencialmente destinados à produção de equipamentos, de armamentos bélicos e de munições (Plastivida, 1997).

O primeiro plástico a ser sintetizado, no final do século XIX, foi a película de filme fotográfico utilizada em fotos e, depois, no cinema. O uso comercial de plásticos para produtos

¹ Segundo dados da ABIQUIM e da Petrobrás.

domésticos desenvolveu-se entre os anos de 1950 e 1960, identificando não apenas uma nova tecnologia, mas também uma alternativa de material sintético substituto dos metais utilizados intensamente, como já mencionado, durante a Segunda Guerra Mundial.

Atualmente o plástico representa a forma mais fácil de se reproduzir peças e componentes, além de oferecer economia relativa aos mesmos produtos quando industrializados com madeira, alumínio, aço, ferro, vidro, dentre outros materiais.

A variedade na produção já ultrapassa 50 tipos de plásticos, divididos em duas famílias de polímeros: termofixos e termoplásticos.

Termofixos são aqueles que não se fundem com o aquecimento: resinas fenólicas, epóxi, poliuretanos etc.

Os termoplásticos não sofrem alterações em suas estruturas químicas durante o aquecimento e, após o resfriamento, podem ser novamente fundidos: polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), PVC, ABS, entre outros, os mais utilizados em processos de reciclagem.

Dessas duas famílias são utilizados mais intensivamente cerca de 10 tipos, que constituem ou são integrantes dos produtos industriais consumidos na forma de eletrodomésticos, peças, componentes e produtos eletromecânicos e embalagens, as quais praticamente respondem por 60% de uso, aplicação e descarte (BONAR, 1996).

Os plásticos são utilizados em quase todos os setores da economia: construção civil, agricultura, fabricação de calçados, móveis, alimentos, têxtil, lazer, telecomunicações, eletroeletrônicos, automobilísticos, médico-hospitalar, energético, dentre outros.

O setor de embalagens para alimentos e bebidas vem se destacando pela utilização crescente dos plásticos, em função de suas excelentes características, entre elas: transparência, resistência, leveza e atoxidade (PLASTIVIDA, 1997).

O plástico, quando simplesmente jogado em aterros sanitários públicos ou privados, ou descartados nas margens e interiores de rios, lagos, mangues ou terrenos, leva mais de 100 anos para se decompor².

A reciclagem com a finalidade de recomposição, reutilização ou geração de energia pode ser uma excelente oportunidade de negócio para as empresas e para o meio ambiente, num processo no qual se não ganharem todos, ao menos, todos perdem menos sob o ponto de vista sócio-econômico e ambiental.

A Tabela 3.1 apresenta estimativas para o tempo de decomposição de diversos tipos de materiais.

² Há várias hipóteses sobre a decomposição do plástico. Os pesquisadores calculam *entre 100 a 500* anos para que o plástico se decomponha.

A mesma controvérsia ocorre com os demais materiais e pode ser explicada pelas diferentes fôrmas de se calcular e estimar tempos de decomposição, pelas diferentes características e especificações dos materiais básicos e pelas diferentes condições onde ocorrerá a decomposição.

Tabela 3.1: Decomposição dos materiais

Material	Decomposição
Um simples chiclete	5 anos
Restos orgânicos	2 a 12 meses
Lata de aço	10 anos
Embalagem longa vida	100 anos
Garrafa de Vidro	10.000 anos
Sacos e copos plásticos	200 a 450 anos
Papel ou um cigarro	3 meses a vários anos
Madeira	1 ano
Lata de alumínio	1000 anos
Nylon	30 a 40 anos
Pilhas	100 a 500 anos

Fonte: Média de dados do CEMPRE e da Plastivida.

Nota: Todos estes materiais poderiam aparecer de forma genérica como plástico, vidro, papel, alumínio. No entanto, deve-se levar em consideração que Nylon é um tipo de plástico e que a embalagem longa vida contém alumínio, papel e plástico. Esta generalização causa diversas dúvidas quanto ao tempo de decomposição.

3.2 Perspectivas e tendências da indústria de termoplásticos

A média da participação do plástico entre os materiais que compõem o lixo urbano no Brasil é de 7% do peso e 25% do volume - quando comparada à dos países desenvolvidos, mas tal valor vem aumentando.

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST, o consumo anual por habitante de plásticos nos EUA (o maior consumidor deste material no mundo) é de 100 kg e no Japão de 60 kg, enquanto no Brasil está em torno de 20 kg e nestes três países cerca de 65% do consumo refere-se a embalagens descartáveis e recicláveis.

Como no Brasil as aplicações deste material ainda não estão totalmente desenvolvidas esta diferença indica um grande potencial nacional para o aumento do consumo de plástico.

É possível supor que um aumento do consumo de produtos plásticos terá como consequência um aumento na geração de resíduos deste material, e, conseqüentemente, um agravamento no problema da destinação do lixo urbano.

Estudos sobre o tema reciclagem passam a ser relevantes, na medida que podem contribuir para a solução deste problema e, conseqüentemente, para a minimização do impacto ambiental. Além disso, a reciclagem é uma atividade econômica, que pode trazer benefícios às empresas através de ganhos econômicos e redução, entenda-se também solução, do passivo ambiental.

Segundo o CEMPRE (1998a), há uma demanda crescente por estudos em reciclagem devido ao crescente interesse dos órgãos do governo e da iniciativa privada em resolver o problema da geração de resíduos sólidos, especialmente os urbanos.

Para Calderoni (1997), a reciclagem do lixo domiciliar recebe pouca atenção e os poucos estudos existentes a abordam de modo secundário e lacunoso. No Brasil, pesquisas sobre o tema reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo, mais especificamente com recicladoras,

foram encontradas em São Paulo (AGUIAR e PHILIPPI Jr., 1998; GÜNTER, WIEBCK e PIVA, 1999; PLASTIVIDA, 1999; CALDERONI, 1997).

A reciclagem é a alternativa mais adequada para a destinação dos resíduos plásticos, de acordo com o conceito de desenvolvimento sustentável, e pode oferecer vantagens econômicas para as empresas que a adotam (é uma oportunidade de negócio), assim como para as empresas que transformam o resíduo reciclado (redução de custos).

Essas atividades, entretanto, enfrentam vários problemas. Os poucos estudos indicam que as empresas brasileiras utilizam equipamentos rudimentares e há pouca informação disponível. Além disso, os resíduos pós-consumo dos diversos tipos de plásticos normalmente estão misturados uns com os outros e com outros contaminantes, devendo ser separados para a reciclagem, fazendo com que as empresas prefiram os resíduos de origem industrial.

Desde 1996 até 2003 o setor petroquímico de termoplásticos brasileiro vem registrando, em média, aumentos de 8% em seu faturamento e de 10% na quantidade de matéria-prima transformada. Entretanto, segundo as entidades ligadas ao setor, o país explorou apenas 40% das possibilidades de produção e uso do plástico em suas várias fôrmas.

A Abiplast – Associação Brasileira da Indústria do Plástico e a Abiquim – Associação Brasileira da Indústria Química prevêm a continuidade do crescimento do setor dada a presença crescente e irreversível do plástico na vida dos brasileiros. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam alguns indicadores deste setor.

Tabela 3.2: Indicadores da indústria de termoplásticos - Brasil

Indicador	1999	2000	2001	2002	2003
Variação no consumo (%)	5,65	8,61	(2,44)	2,43	(3,71)
Variação no faturamento (US\$ - %)	(13,58)	25,76	(33,40)	20,87	15,62
Consumo per capita (kg)	22,50	24,40	21,70	22,17	21,75
Participação do setor no PIB	1,48	1,66	1,31	1,76	1,90

Fonte: ABIQUIM e ABIPLAST, 2003.

Tabela 3.3: Evolução do consumo aparente de termoplásticos

Tipos	(em 10³ t/ano)					(%) em 03/2004
	1999	2000	2001	2002	2003	
PEBD	525	520	560	528	528	13,83
PEAD	481	498	676	690	654	17,16
PP	536	557	818	910	940	24,59
PVC	504	557	621	692	615	16,11
PS	231	246	288	306	264	6,93
PET	408	419	482	425	430	11,28
Outros (EVA, PEBDL...)						10,11

Fonte: ABIQUIM e ABIPLAST, 2003.

Os indicadores apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3 permitem verificar o crescimento do consumo de termoplásticos e constatar que o polipropileno é um dos principais subtipos mais consumidos.

Desde os anos de 1980 houve a intensificação da utilização de componentes plásticos na indústria em geral em substituição ao aço, ferro e alumínio, com a vantagem de, pelo uso de elementos plásticos, os veículos reduzirem o consumo de combustível em razão do menor peso dos componentes e dos veículos.

Segundo Gonçalves (1997), no ano de 1996, a quantidade de plástico reciclado no país chegou a 250 mil toneladas, perto de 10% do total de matéria-prima virgem transformada no mesmo período, que foi de 2,6 milhões de toneladas. No ano de 2003, este índice foi de 17,5%, segundo a base de dados disponíveis pelo CEMPRE.

É pouco comparado ao índice dos Estados Unidos, que chega a 33% e tais índices variam entre os estados e municípios e, nestes, dependem de uma série de fatores de sucesso, entre eles a coleta seletiva do lixo, os programas de educação ambiental, a política e gestão de resíduos sólidos, do método de cálculo, dentre outros.

3.3 A produção de lixo e a reciclagem

A reciclagem tornou-se necessária em virtude, principalmente, da enorme popularização de produtos descartáveis nos últimos anos. Na Europa, por exemplo, a produção anual de lixo por pessoa subiu de 220 kg para 440 kg em dez anos.

Os países industrializados são os que mais produzem lixo e também os que mais o reciclam. O Japão reutiliza 50% de seu lixo sólido; os Estados Unidos recuperam 11% de seu lixo; a Europa Ocidental recicla 30%. Nos EUA, a produção de lixo por pessoa é o dobro da de

qualquer outro país: em média 1,5 kg/pessoa por dia. Ao final de um ano são 10 bilhões de toneladas. Nova York é a cidade que mais produz lixo no mundo, atingindo a média diária de 13 mil toneladas. São Paulo produz 12 mil toneladas diárias e há estimativas de que sejam produzidos mais de 100 milhões de toneladas anualmente nas regiões urbanas brasileiras.

4 DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a literatura, as prioridades na gestão dos resíduos sólidos urbanos devem ser primeiramente a minimização da geração desses resíduos, através de mudanças de hábito de consumo, e a produção de produtos com menor quantidade de material, feitos de material reciclável, etc.

Depois de minimizar a geração de resíduos, a preocupação deve se voltar para a sua destinação: reciclagem, incineração e disposição, já mencionado na seção anterior.

Os resíduos devem ser primeiramente reciclados; os que não puderem ser reciclados devem ser incinerados; e os que não puderem passar por nenhuma das opções anteriores, devem ser dispostos em aterros sanitários.

Segundo Aisse et al. (1982), o termo “lixo” é o designativo daquilo que tecnicamente é denominado resíduo sólido, sendo o mesmo resultante da atividade das aglomerações urbanas.

Os resíduos sólidos podem ser objetos que não mais possuem valor ou utilidade, porções de materiais sem significado econômico, sobras de processamento industrial ou sobras domésticas a serem descartadas, ou seja, qualquer coisa que se deseje jogar fora (Aisse et al., 1982).

No entanto, na verdade o termo “resíduo sólido” diferencia-se do termo “lixo”, pois o último não possui qualquer tipo de valor, já que é aquilo que deve ser apenas descartado,

enquanto o primeiro possui valor econômico por possibilitar o reaproveitamento no processo produtivo (DEMAJOROVIC, 1995).

Os resíduos sólidos urbanos, tratados neste trabalho, compreendem os resíduos domésticos, comerciais e industriais. Serão considerados como rejeito os resíduos que não tenham aproveitamento econômico por nenhum processo tecnológico disponível e acessível (PHILIP Jr., AGUIAR e MOLLER, 1998).

4.1 Disposição

A disposição é a alternativa de destinação de resíduos sólidos mais antiga e mais utilizada até hoje, embora não seja a mais adequada. Dados do CEMPRE (apud PLASTIVIDA/ABIQUIM, 1997) indicam que a destinação final do lixo urbano no Brasil é feita da seguinte forma:

76% em lixões;

13% em aterros controlados;

10% em aterros sanitários e,

1% passa por tratamento por compostagem, reciclagem e incineração (fôrmas de tratamento alternativas à disposição).

Os lixões são fôrmas de disposição final de resíduos sólidos a céu aberto. São caracterizados pela simples descarga dos resíduos sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (CONSONI et al., 1997).

Acarretam problemas para a saúde pública, como a proliferação de vetores de doenças (como insetos), geração de odores e, principalmente, a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através do chorume (líquido de cor preta, de odor desagradável e de elevado potencial poluidor, produzido pela decomposição da matéria orgânica contida no lixo), comprometendo os recursos hídricos (CONSONI et al., 1997).

Os aterros controlados utilizam princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (Consoni et al., 1997). Esta alternativa é preferível aos lixões, porém ainda causa problemas ambientais. Este tipo de aterro geralmente não dispõe de impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas), nem sistemas de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados (CONSONI et al., 1997).

Para atender as exigências impostas pela legislação ambiental, aterros mais modernos foram introduzidos. Os aterros sanitários permitem o confinamento seguro dos resíduos em termos de contaminação ambiental e saúde pública. Sua instalação deve ser feita em área adequadamente escolhida com a base do aterro com camada impermeabilizada e afastada de corpos d'água, permitindo o controle e o tratamento do chorume (VALLE, 1995).

A disposição em aterro sanitário é uma solução adequada para resíduos estáveis, não perigosos, com baixo teor de umidade e que não possuam valores a recuperar, ou seja, o aterro sanitário é a melhor alternativa de destinação para o caso em que os resíduos não possam ser reciclados, nem incinerados. A reciclagem e a incineração contribuem para a redução do volume de resíduos a ser disposto e o aumento da vida útil dos aterros (VALLE, 1995; NORTH, 1997; DEMAJOROVIC, 1995).

4.2 Incineração

A incineração é a queima dos resíduos sólidos, destruindo-os, descaracterizando-os e transformando-os em cinzas, permitindo a redução drástica do volume dos resíduos a serem dispostos. É a solução mais indicada para os resíduos orgânicos perigosos, desprovidos de valor e de difícil decomposição (VALLE, 1995).

Porém, a incineração apresenta duas preocupações: os gases emitidos pela combustão dos resíduos e a destinação das cinzas e dos particulados retidos nos sistemas de lavagem de gases.

A operação do sistema precisa incluir o manuseio de resíduos, a depuração de gases e a destinação das cinzas, tornando os investimentos necessários muito elevados (Valle, 1995). Os gases resultantes da incineração devem passar por um sistema de lavagem, que costuma representar um investimento tão ou mais caro que o próprio forno de incineração.

4.3 Reciclagem

A reciclagem permite refazer o ciclo, ou seja, permite trazer de volta, à origem, sob a forma de matérias-primas, aqueles materiais que não se degradam facilmente e que podem ser reprocessados, mantendo suas características básicas (Valle, 1995). A reciclagem requer alguma forma significativa de processamento físico, químico ou biológico antes do material ser utilizado novamente.

4.4 Gerenciamento integrado de resíduos sólidos

A composição do lixo varia de país para país, de região para região e pode-se afirmar que a sua composição reflete o estilo de vida da sociedade que o gera.

Em termos médios, no Brasil, tal composição difere daquela dos países da Europa e da América do Norte. A matéria orgânica representa aproximadamente 60% do lixo brasileiro, enquanto naqueles países, tal valor oscila em torno de 30%.

Segundo os bancos de dados do CEMPRE e da Plastivida, no ano 2003, o teor médio de plásticos no lixo das principais capitais do país foi de 5%, ligeiramente inferior aos 7% apontados nos países europeus e norte-americanos.

Segundo Sobral (1996), na cidade de São Paulo tal índice era inexpressivo na década de 60; em 1991, entretanto, representava 11,47%. Devido às mudanças na sua composição, a massa específica do lixo caiu de 500kg/m^3 em 1927 para 234kg/m^3 em 1991, o que sugere a introdução das embalagens e dos produtos constituídos por materiais mais leves, como o plástico.

Em outras palavras, pode-se afirmar que o plástico contribuiu para a redução da massa total de lixo urbano metropolitano.

É praticamente desprezível a utilização de técnicas mais apuradas no tratamento do lixo. A situação é preocupante porque a capacidade dos lixões e aterros sanitários está próxima da saturação, em particular nos grandes centros urbanos.

A disponibilidade de área, a proximidade de mananciais, a infra-estrutura de transporte e o volume de lixo gerado são fatores fundamentais para estabelecer a combinação ótima das alternativas de tratamento do lixo: a reciclagem, a recuperação de energia, a reutilização, a compostagem e, por último, o aterro sanitário.

A simples armazenagem nos chamados lixões e a incineração a céu aberto, sem controle das condições de queima, não podem ser consideradas como alternativas sustentadas de tratamento de lixo.

A legislação alemã, reconhecidamente uma das mais rígidas do mundo, exige índices mínimos de 50% para recuperação da energia, 25% para a reciclagem mecânica e 15% para a reciclagem química.

É importante salientar que esses índices exigidos não estão sendo respeitados por serem muito elevados.

Há também descartes que provêm principalmente de rejeitos de processos de produção e transformação como os originários da indústria metalúrgica: lixo químico, borras de materiais plásticos, aparas, rebarbas metálicas, madeira, fuligem, fluidos, tintas e solventes, fumaça, metais pesados como o mercúrio e o cádmio, pesticidas etc.

Além desses rejeitos, há ainda o risco de vazamentos de óleos e produtos químicos (resíduos líquidos) transportados em navios de cargas marítimas e fluviais, responsáveis pelo derramamento anual de milhões de toneladas de produtos químicos altamente tóxicos, que devastam fauna, flora e ameaçam a sobrevivência de ecossistemas muitas vezes ainda desconhecidos potencialmente pelo homem.

Existem empresas industriais e comerciais que não estabelecem qualquer tratamento em seus resíduos, independentemente destes serem reaproveitáveis, reutilizáveis ou recicláveis. E o que é pior, em muitos casos, são resíduos tóxicos irresponsavelmente lançados no meio ambiente.

De maneira geral as pessoas não se importam muito em saber qual é o destino do lixo após o consumo e descarte doméstico. Tudo o que realmente desejam é se ver livre das “coisas” desprovidas de qualquer valor.

Assim, a reciclagem assume importante papel na resolução do destino de resíduos, especialmente os resíduos sólidos de produtos descartados derivados de materiais como papel, ferro, aço, alumínio, cobre, vidro, entulho de construção civil e plástico.

4.5 O plástico e os resíduos sólidos

Segundo Bonar (1996), nos Estados Unidos mais de 25% do que é jogado fora no lixo todos os dias são compostos de material plástico, incluindo os próprios sacos de lixo. Como o plástico é leve, sua representatividade em termos de massa é de um décimo da massa total do lixo, que inclui material orgânico, metais, papel etc.

Como já mencionado, a maioria dos descartes e, principalmente os residenciais e comerciais, são coletados e encaminhados para aterros sanitários ou para lixões a céu aberto. Nos aterros sanitários, o montante de lixo é coberto com terra em camadas isoladas e protegidas para que se evite a contaminação dos solos, lençóis e cursos d'água, lá permanecendo até que se decomponha.

No caso de lixões a céu aberto, esses materiais ficam perigosamente dispostos em locais onde animais, insetos, vermes, bactérias, fungos e, lamentavelmente, seres humanos – em sua maioria mulheres e crianças, todos juntos – “garimpam” buscando o que poderá ser a refeição do dia ou alguns quilos de alumínio, plástico, papel e vidro para a troca por dinheiro com os sucateiros. É assim, infelizmente, como e onde freqüentemente se inicia uma das fases da reciclagem.

Os materiais plásticos sofrem um processo de decomposição que pode durar de 100 a mais de 500 anos, dependendo do tipo de plástico, suas misturas (blendas) e condições em que ocorrerá a decomposição.

No meio ambiente, os plásticos são facilmente carregados pelo vento ou pela chuva, contribuindo para o assoreamento de canais, rios e reservatórios, dutos da rede pública de esgoto, córregos contribuintes, chegando aos rios e ao oceano, onde podem ser ingeridos por animais, comprometendo a fauna e flora.

Em sua maioria os materiais plásticos não são biodegradáveis ou fotodegradáveis, ou seja, não possuem tecnologias de aceleração da degradabilidade. Ainda que as possuíssem, continuariam a constituir um grande problema devido ao volume que representam³.

³ “...um caminhão com capacidade para transportar 12 toneladas de lixo comum, transportará apenas seis a sete toneladas de plástico compactado, ou duas toneladas sem compactação” (IPT, 1995:181 *apud* Calderoni, Sabetai. *Os bilhões perdidos no lixo*. São Paulo, Humanitas, 1997: 226).

5 MATERIAIS RECICLÁVEIS

5.1 Principais materiais recicláveis

Calderoni (1997), apresentou a lista dos principais materiais existentes no lixo urbano metropolitano no Brasil passíveis de reciclagem e algumas referências relativas às vantagens da sua reciclagem como sintetiza a Tabela 5.1.

Para garantir a sustentabilidade econômica da reciclagem, deve-se levar em consideração:

1. custos da separação, da coleta, do transporte, do armazenamento e da preparação antes do processamento;
2. quantidade de material disponível em condições de limpeza;
3. proximidade da fonte geradora com o local onde será reciclado o material;
4. custo do processamento do produto;
5. características e aplicação do produto resultante;
6. demanda do mercado para o material reciclado;
7. fatores que estimulam a reciclagem;
8. a redução do volume de lixo a transportar, tratar e dispor e,
9. aumento da vida útil dos locais de deposição de lixo e economia de energia consumida nos processos de produção de material virgem.

A cadeia industrial do plástico já manifesta interesse na coesão e padronização de simbologias, normas e procedimentos em suas políticas relativas ao meio ambiente.

Tabela 5.1: Materiais recicláveis - indicadores

	Papel (1)	Alumínio (2)	Vidro (3)	Plástico
Índice de reciclagem (%)	62	89	45	17
Demanda estimada	7.900 mil toneladas	670 mil toneladas	2.904 mil toneladas	200 mil toneladas
Economia de recursos naturais e de matéria-prima	30 m ³ de água por tonelada, preservação de 20 árvores de eucaliptos com 10 anos de idade e 10 m de altura. Produtos químicos necessários à produção de celulose	Redução de até 97% da poluição da água e de até 95% da poluição do ar. 5 t de bauxita para cada tonelada de alumínio.	1,2 t de matéria-prima virgem, ou seja, areia (58%), barrilha (19%), calcário (17%) e feldspato (6%).	Mínimo de 1% da produção nacional de petróleo.
Economia de energia (%) de MWh/t)	70	95	15	50

Fonte: Calderoni (1997). Dados atualizados através das associações através de consulta às bases de dados das entidades representativas empresariais vinculadas ao Confederação Nacional da Indústria – CNI, referentes ao ano de 2003: (1) Associação Brasileira de Papel e Celulose – BRACELPA, (2) Associação Brasileira de Alumínio – ABAL, e (3) Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro - ABIVIDRO.

Com o acirramento da legislação ambiental, limitando espaços físicos para aterros nos grandes centros urbanos, a indústria brasileira do plástico estabelece representações de classe que atuem como porta-vozes nas questões e fóruns ambientais. No plano institucional, instituições como a Plastivida, o CEMPRE e a Associação Brasileira dos Recicladores de Plástico são as mais citadas e representativas do setor, estimado ao redor de 400 indústrias de reciclagem de termoplásticos no Brasil, voltadas totalmente para a reciclagem mecânica, em média centradas em escalas da ordem de 100 toneladas mensais⁴.

5.2 Processos de Reciclagem de Plásticos: conceitos de reciclagem

Na definição adotada pela EPA (Environmental Protection Agency), a agência ambiental dos Estados Unidos, reciclagem é a ação de coletar, reprocessar, comercializar e utilizar materiais antes considerados como lixo (Valle, 1995). Wells et al. (apud Costa, 1998, p.19) definem a reciclagem como o “resultado de uma série de atividades através da qual materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens, feitos anteriormente apenas com matéria-prima virgem”.

Neste trabalho, no entanto, o termo reciclagem terá uma definição mais restrita, abrangendo apenas o processamento do resíduo para ser utilizado como matéria-prima em um outro processo produtivo.

4 ANP- Associação Nacional do Plástico em www.plastico.com.br

A Agência de Proteção Ambiental (EPA) assim define reciclagem: "coleta, processamento, comercialização e uso de materiais considerados lixo" (The Earth Works Group, 1990).

Já a Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM, através da Plastivida⁵, define a reciclagem como sendo a revalorização dos descartes domésticos e industriais, mediante uma série de operações, que permitem o reaproveitamento dos materiais como matéria-prima para outros produtos (Plastivida, 1997).

A definição clássica encontrada em dicionários expressa que "o mesmo material é usado várias vezes para fazer o mesmo produto – ou um produto equivalente".

A definição, no caso dos plásticos e para efeito deste trabalho, é dada como a da reciclagem sem retorno, ou seja, um recipiente plástico é utilizado uma vez, depois o material é usado em um produto novo e diferente.

O conceito geralmente usado pelas indústrias é o de que "se uma fábrica utilizar o mesmo material por duas vezes, esse material é reciclado".

A definição econômica é "reaproveitar alguma coisa".

Na natureza, o processo de reciclagem ocorre com a decomposição e o reaproveitamento dos componentes na forma de nutrientes como, por exemplo, animais mortos, folhas e frutos que caem no solo, onde, decompositores como larvas, minhocas, fungos, bactérias

⁵ A Plastivida é uma comissão da Abiquim – Associação Brasileira da Indústria Química, que representa um grupo de empresas comprometidas com a relação entre os plásticos manufaturados e o meio ambiente. Representa 95% do mercado nacional de termoplásticos.

os apodrecem e os decompõem, transformando-os em matérias-primas ou em sais minerais e proteínas.

Estas serão integrantes do solo e, assim, servirão de nutrientes para as espécies vegetais as quais, por sua vez, se transformarão em alimento para os animais, que um dia morrerão, reiniciando-se o ciclo. Embora simplista esse exemplo pode ser ilustrativo de como a natureza trata continuamente de se reciclar.

Outras fôrmas de eliminar o lixo ainda são incipientes no Brasil como é o caso da incineração em fornos de alta temperatura para geração energética⁶.

5.3 Importância da reciclagem

Para Valle (1995), a reciclagem tem como maiores estímulos dois fatores:

1. possibilita reduzir substancialmente o volume dos resíduos urbanos a serem dispostos ou tratados;
2. permite a recuperação de valores contidos nesses resíduos urbanos que, de outra forma, seriam perdidos.

Além dos aspectos ambientais positivos obtidos, a reciclagem é uma atividade que pode ser viável economicamente, capaz de gerar ganhos econômicos, assim como gerar empregos, como, por exemplo, em cooperativas, onde é realizada a triagem de lixo seco para a venda a recicladoras.

⁶ Na Dinamarca, 75% do lixo é incinerado para a produção de energia. Em São Paulo, apenas 6%, porém, sem aproveitamento energético. Segundo a Plastivida há mais de 300 usinas termelétricas instaladas na Europa, e mais de 100 em construção no Japão, que se utilizam de incineração do plástico para a geração de energia.

Wiebeck (1997) resume os fatores que motivam a reciclagem:

1. necessidade de poupar e preservar recursos naturais;
2. redução do volume de resíduos a transportar, tratar e dispor;
3. diminuição da carga poluente enviada ao meio ambiente;
4. aumento da vida útil dos locais de disposição de resíduos (aterro sanitário e aterro industrial);
5. redução do custo de gerenciamento dos resíduos, com menores investimentos em instalações de tratamento e disposição final;
6. redução da poluição e contaminação ambiental e dos problemas de saúde pública e social decorrentes;
7. criação de empregos ou aproveitamento de mão-de-obra (catadores, por exemplo) em melhores condições de trabalho;
8. maior competitividade e produtividade, em caso de empresas e,
9. possibilidade de participação da população no processo de separação, levando ao conhecimento dos problemas (conscientização em relação a sua responsabilidade).

Calderoni (1997) calculou que a economia possível de se obter através da reciclagem no Brasil em 1996 poderia ser estimada em R\$ 5,8 bilhões. Desse total foi obtida economia de R\$ 1,2 bilhão com a reciclagem, tendo sido perdidos cerca de R\$ 4,6 bilhões pela parte do lixo domiciliar urbano metropolitano não reciclado.

A metodologia empregada nesse cálculo considerou os custos evitados através da reciclagem: os custos de coleta seletiva que se adicionam ao custo obrigatório da coleta convencional do lixo, abrangendo também os custos de implantação, operação e manutenção de aterros, transporte e transbordo. Além disso, considerou ganhos decorrentes da economia de energia, de matéria-prima, da redução de custos com controle ambiental e com consumo de água e outros ganhos de difícil mensuração, como redução de dispêndios com saúde pública e geração líquida de empregos.

O estudo de Calderoni (1997) revelou que a matéria-prima constitui o principal fator de economia, respondendo por 71% da economia total possível de ser obtida com a reciclagem e 62% da economia obtida pelo que realmente é reciclado no Brasil.

O segundo fator foi a economia de energia elétrica, contribuindo com 23% do total possível e 29% do total real obtido.

5.4 Tecnologia e processos utilizados na reciclagem de resíduos plásticos

É possível classificar a reciclagem dos resíduos plásticos em três tipos: primária, secundária e terciária (Pinto, 1995). Ehrig e Curry (1989) e Mano e Bonelli (1994), além dessas três, ainda classificaram um outro tipo de reciclagem de plástico: a quaternária.

A reciclagem primária e a secundária são tipos de reciclagem mecânica. A diferença entre elas é a origem do resíduo plástico a ser reciclado. A reciclagem mecânica é a conversão dos resíduos plásticos em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos, como sacos de lixo, solados, pisos, mangueiras, componentes de automóveis, etc. (PLASTIVIDA/ABIQUIM, 1997).

5.5 Reciclagem primária

A reciclagem primária, também chamada de reciclagem pré-consumo, é efetuada na própria indústria geradora do resíduo, ou por outras empresas transformadoras, com materiais termoplásticos provenientes de resíduos industriais, que são limpos e de fácil identificação, não contaminados por impurezas (Pinto, 1995). “Pode-se afirmar que 100% destes resíduos são reciclados e a qualidade dos artefatos produzidos com esse material é essencialmente a mesma daquela obtida com a utilização de resinas virgens” (PINTO, 1995, p.184).

5.6 Reciclagem secundária

A reciclagem secundária, ou reciclagem pós-consumo é a conversão de resíduos plásticos descartados no lixo. São constituídos pelos mais diferentes tipos de materiais e resinas, com propriedades também diferentes, exigindo uma boa separação, para poderem ser reaproveitados (Pinto, 1995). A separação dos materiais é bastante facilitada com um programa de coleta seletiva do lixo, evitando a contaminação.

Para facilitar a identificação dos diferentes tipos de plástico, foi estabelecido no Brasil pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), na Norma NBR⁷ 13230:94, um sistema de codificação de produtos plásticos, que consiste em um símbolo com três setas em seqüência, identificando o tipo de plástico com o qual o produto foi fabricado.

Além disso, os diferentes plásticos podem ser separados uns dos outros através da diferença entre as suas propriedades físicas, como a tensão superficial, a solubilidade, características elétricas e a densidade (Mano e Bonelli, 1994). A diferença de densidade é o método mais comum de separação, no qual alguns tipos de plástico flutuam na água, enquanto outros afundam.

Existem alternativas de reciclagem de misturas de plásticos, porém elas exigem altos investimentos em equipamentos especiais, necessários para a obtenção de produtos com boa qualidade. Além disso, essas alternativas só permitem a fabricação de peças com espessuras relativamente grandes. No Brasil, já existem empresas empregando este processo para a fabricação da chamada “madeira plástica”, usada na construção civil na forma de escoras, fôrmas de concreto, tábuas e sarrafos, bancos de jardim, etc.

5.7 Reciclagem terciária

A reciclagem terciária é também chamada de reciclagem química. É a decomposição dos resíduos plásticos, através de processos químicos ou térmicos, em petroquímicos básicos: monômeros ou misturas de hidrocarbonetos que servem como matéria-prima em refinarias ou centrais petroquímicas, para a obtenção de produtos nobres de elevada qualidade (PLASTIVIDA/ABIQUIM, 1997, Pinto, 1995).

⁷ A fim de não sobrecarregar o texto, as chamadas de citação das normas da ABNT serão desta forma. Nas referências bibliográficas, elas se encontram sob a entrada: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ver a seção 10, deste trabalho).

Segundo a Plastivida (1997), a reciclagem química tem como objetivo a recuperação dos componentes químicos individuais, para reutilizá-los como produtos químicos ou na produção de novos plásticos. Permite ainda tratar mistura de plásticos, reduzindo custos de pré-tratamento, de coleta e de seleção. Além disso, a reciclagem química permite a produção de plásticos novos com a mesma qualidade de um polímero original.

Existem poucas plantas de reciclagem química em operação no mundo. Uma delas é a Veba Oel, na Alemanha.

Os novos processos de reciclagem química (processos de hidrogenação, gaseificação e quimólise) permitem reciclar misturas de plásticos diferentes, com aceitação de determinado grau de contaminantes (tintas, papéis etc.).

O processo de gaseificação consiste no aquecimento dos plásticos com ar ou oxigênio, gerando-se gás de síntese contendo monóxido de carbono e hidrogênio.

Com relação a quimólise, provoca-se a quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio. Este processo gera frações de hidrocarbonetos capazes de serem processados em refinarias.

5.8 Reciclagem quaternária

Até 1979 a possibilidade de utilização do plástico como fonte para a alimentação de usinas termelétricas não parecia constar, ao menos nas classificações tradicionais de fontes de energia.

A reciclagem energética do plástico refere-se à recuperação de energia contida nos plásticos mediante processos térmicos. Distingue-se da incineração por utilizar resíduos plásticos como combustível para a geração de energia elétrica. Já a simples incineração não aproveita a energia dos materiais, apenas reduz seu volume para a disposição final em aterros sanitários.

Com referência aos conteúdos energéticos tem-se que 1 kg de carvão equivale a 8,6 kWh, 1 litro de óleo combustível, a 10,5 kWh e, para a produção de 1 milhão de kWh, como o faz a Usina Hidrelétrica de Henry Borden, em Cubatão, é preciso um fluxo de 250 mil litros (250 m³) de água por segundo, a uma altura de 836 m (Goldemberg, 1979).

A energia contida em 1 kg de plástico é equivalente à contida em 1 kg de óleo combustível. Cerca de 15% da reciclagem de plásticos na Europa Ocidental é realizada por reciclagem energética. A usina de Saint-Queen, em Paris-França, fornece eletricidade para 70 mil pessoas, gerando 15.400 MW/ano (Plastivida, 1997).

Além da economia e da recuperação de energia, ocorre ainda redução de 70% a 90% da massa do material, restando apenas um resíduo inerte esterilizado.

A presença dos plásticos em incineradores aumenta o rendimento da combustão. O calor pode ser recuperado em caldeira, utilizando-se o vapor para a geração de energia elétrica e/ou aquecimento.

Testes em escala real realizados na Europa Ocidental comprovaram os bons resultados da co-combustão dos resíduos de plásticos com carvão, turfa e madeira, tanto técnica e econômica quanto ambientalmente.

A queima de plásticos em processos de reciclagem energética reduz o uso de combustíveis, poupando recursos naturais. Para a adoção da recuperação energética dos plásticos como combustível devem ser levadas em consideração:

- a disponibilidade de tecnologias limpas para queima de descartes sólidos, principalmente aquelas associadas a mecanismos de filtragem e de controle de emissão de poluentes, como dioxinas e mecanismos para a disposição final de resíduos pós-queima;
- a possibilidade de co-processamento com outros combustíveis, por exemplo, para queima em fornos de cimento.

A reciclagem energética é atualmente realizada em diversos países da Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Segundo dados obtidos junto a assessoria da ABIQUIM, há aproximadamente 300 incineradores na Europa quase todos com recuperação de energia térmica ou elétrica.

Atualmente no Japão cada bairro tem um destes incineradores e existem mais 127 plantas em construção. O que diferencia a geração térmica da elétrica é que com o calor gerado pode-se aquecer água, ou todo o vapor passará por uma turbina que gerará energia. Um copinho de iogurte de 300 g de PP pode manter uma lâmpada de 40 W acesa por uma hora. Um Shopping Center poderia funcionar suas caldeiras e centros de consumo com energia gerada a partir do abastecimento por plásticos recicláveis (PLASTIVIDA, 2003).

No entanto, apesar de desenvolvimentos tecnológicos contínuos para a obtenção de equipamentos mais eficientes e seguros, a produção e o controle da emissão de resíduos ainda coloca em risco a saúde humana e o meio ambiente.

Huang (1995) considerou como dificuldades para implantar esta alternativa de reciclagem de plásticos, o alto custo de uma planta, os altos custos de coleta e triagem dos resíduos plásticos, a possibilidade de produzir grande poluição da água e do ar, as barreiras políticas e a sua aplicação somente em grande escala.

Segundo Calderoni (1997), a queima do plástico produz gases tóxicos, como o caso do PVC, que libera cloro, podendo produzir ácido clorídrico e dioxinas, que são fortemente tóxicos e cancerígenos.

Na Europa, Estados Unidos e Japão, é bastante utilizada a injeção de resíduos plásticos como combustível em altos fornos de siderurgia, reduzindo de 70% a 90% a massa de material a ser descartado (SAMMARCO e DELFINI, 1999).

5.9 A reciclagem mecânica do resíduo plástico

Esta é a mais usual e, talvez, a mais importante forma de reciclagem dos plásticos por possibilitar a imediata redução de volume e da massa do descarte. Consiste na transformação dos descartes plásticos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos para a produção de novos produtos, entre os quais sacos de lixo, solados, pisos, conduítes, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não-alimentícias, etc.

Tal tipo de reciclagem possibilita a obtenção de produtos compostos por um único tipo de plástico ou a partir de misturas de diferentes espécies, as chamadas blendagens.

Estima-se que no Brasil sejam reciclados mecanicamente 15% dos resíduos plásticos pós-consumo. No entanto, a identificação dos plásticos, tem importante papel por possibilitar a separação dos mesmos, o que evita as misturas de plásticos que não se combinam, como por exemplo: PS e poliolefinas, PVC e PET, dentre outros.

São as seguintes as etapas básicas dessa forma de reciclagem:

- sistema de coleta dos descartes (seletiva, municipal, por catadores);
- separação e triagem dos diferentes tipos de plásticos;
- limpeza para a retirada de sujeiras e restos de conteúdos;
- revalorização (produção do plástico granulado) e,
- fabricação de novos produtos reciclados e recicláveis.

Como fases do processo de produção do plástico granulado citam-se: separação, moagem, lavagem, secagem, aglutinação e extrusão.

A separação é realizada em esteira com diferentes tipos de plásticos, de acordo com a identificação ou o aspecto visual, etapa em que são separados também rótulos de materiais diferentes, tampas de garrafas e produtos compostos por mais de um tipo de plástico, embalagens metalizadas, grampos etc.

Por constituir etapa geralmente manual, a eficiência depende diretamente da prática das pessoas que executam a tarefa. Outro fator determinante da qualidade na fase de separação é a fonte do material a ser separado: aquele oriundo da coleta seletiva é mais limpo em relação ao material proveniente dos lixões ou aterros.

A moagem, depois de separados os diferentes tipos de plásticos, consiste na fragmentação dos materiais em pequenas partes.

Em seguida, depois de triturados, o plástico passa por uma etapa de lavagem com água para a retirada dos contaminantes. É desejável que a água de lavagem receba tratamento para a sua reutilização ou emissão como efluente.

Por último, a secagem é a etapa na qual o excesso de água é retirado por intermédio de um secador-centrifugador.

Em termos de negócios, da separação até a secagem, pode-se considerar que se tratam de atividades do serviço de reciclagem que constituem importante mercado para investimento, sendo comumente denominadas de revalorização do material.

As próximas etapas correspondem mais diretamente às atividades industriais da reciclagem, caracterizadas por processos de produção.

O primeiro processo é o da aglutinação. Além de completar a secagem, nesta etapa o material é compactado, reduzindo-se assim o volume a ser enviado à extrusora.

O atrito dos fragmentos contra a parede do equipamento rotativo provoca a elevação da temperatura, levando à formação de uma massa plástica. O aglutinador é também utilizado para a incorporação de aditivos: cargas, pigmentos e lubrificantes.

O segundo processo é o da extrusão, onde a extrusora funde e torna a massa plástica homogênea. Na saída da extrusora a massa é comprimida contra o cabeçote, do qual sai como um "espaguete" contínuo, que é resfriado com água. Em seguida o "espaguete" é picotado em um granulador e transformado em pellets (grãos lisos na forma de pequenos bastões cilíndricos).

É este o material que será, a exemplo da resina virgem, reutilizado para a produção de novos produtos reciclados e recicláveis.

Na reciclagem mecânica, os resíduos plásticos são moídos e fragmentados em pequenas partes e passam por uma etapa de lavagem com água para a retirada de impurezas.

Geralmente a moagem é realizada com a lavagem em um moinho lavador. A água passa por dentro do moinho, arrastando o material para um tanque de lavagem. O material lavado é levado para uma centrífuga, onde o excesso de umidade é retirado.

No caso do material ser composto de filmes flexíveis, primeiramente é compactado em um aglutinador, para reduzir o volume que será enviado para a etapa seguinte, a extrusão.

O aglutinador é um equipamento constituído de facas que trabalham em alta rotação. O atrito do plástico contra a parede do equipamento rotativo provoca elevação da temperatura, levando à formação de uma massa plástica.

Quando o plástico atinge esta forma, joga-se água no equipamento com objetivo de dar um choque térmico no material, fazendo com que ele se retraia. Toda a água é evaporada. O aglutinador retira toda a umidade do plástico e o torna mais pesado para que ele possa escoar no funil da extrusora. Este equipamento funde o plástico aglutinado ou moído e o torna homogêneo. Ainda neste equipamento, o plástico passa por uma matriz para ter uma forma final e é resfriado. Cada matriz dá a forma final ao produto que se deseja obter.

Uma extrusora consiste em um cilindro em cujo interior gira um parafuso de Arquimedes (uma rosca sem fim), que promove o transporte do plástico.

O material é progressivamente aquecido, plastificado, homogeneizado e comprimido, sendo forçado através do orifício de uma matriz montada no cabeçote existente na extremidade do cilindro. O perfil contínuo que sai da matriz (uma espécie de espaguete de plástico) é resfriado em um banho com água para ser, então, picotado, para a obtenção de pellets (grãos plásticos) (WIEBECK, 1997, PLASTIVIDA/ABIQUIM, 1997, CEMPRE, 1998b).

A reciclagem de resíduos de PET apresenta diferenças em relação aos outros tipos de plásticos (PEAD, PEBD, PP, PVC e PS). Um exemplo de processo é descrito na revista Plástico Moderno (Furtado, 1996) no qual os resíduos de PET são classificados, separando os contaminantes maiores como pedras e tampas soltas através de uma peneira rotativa, onde ocorre também uma primeira lavagem.

A seguir, os resíduos são separados de outros tipos de plásticos e também de metais ferrosos através de um detector de metais, sendo depois moídos com lavagem. O material vai para tanques de descontaminação onde ocorre a separação de tampas e rótulos e a adição de produtos químicos. Depois ele é moído, lavado novamente, secado, podendo ser utilizado na transformação (FURTADO 1996).

5.10 Aplicações do plástico pós-consumo reciclado

Segundo o CEMPRE (1997a, 1997b), cerca de 15% dos plásticos rígidos (PET, PEAD, PVC, PP e PS são os mais comuns) e filme (a resina mais utilizada é o PEBD) são reciclados no Brasil, o que equivale a 200 mil toneladas por ano, sendo que deste total 60% provêm de resíduos industriais e 40% dos resíduos pós-consumo.

O principal mercado consumidor de plástico reciclado na forma de grânulos são as indústrias de artefatos plásticos, que utilizam o material na produção de baldes, cabides, garrafas de água sanitária, conduítes e acessórios para automóveis (CEMPRE, 1997b). Já os principais consumidores do plástico filme pós-consumo reciclado são as empresas que fabricam sacos de lixo (CEMPRE, 1997a).

5.11 Barreiras à reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo

Segundo Pinto (1995), os problemas mais comuns para a reciclagem dos resíduos plásticos pós-consumo estão relacionados à implantação de um sistema de coleta seletiva e os processos para a adequada separação de materiais plásticos do lixo. Estes problemas são:

- a escassez de empresas interessadas em comprar o material separado;
- as grandes distâncias que, às vezes, separam o município do Mercado comprador;
- a dificuldade em separar corretamente os diferentes tipos de plástico;
- a difícil tarefa em garantir um fornecimento contínuo de matéria-prima de boa qualidade aos compradores e,
- existem três mitos correntes referentes à reciclagem, apresentados como barreiras a serem vencidas:
 1. produtos fabricados a partir de matéria-prima reciclada custam mais caro;
 2. produtos fabricados a partir de matéria-prima reciclada são de qualidade inferior e;

3. Produtos fabricados a partir de matéria-prima reciclada não têm oferta suficiente.

Wiebeck (1997) apresentou como desvantagens da reciclagem pós-consumo problemas de contaminação e de seleção de materiais. Deve haver uma lavagem cuidadosa dos resíduos após a etapa de moagem para prevenir danos à extrusora. Porém, como maiores problemas, o autor aponta a falta de fonte de suprimento regular e confiável de material para o processamento e a contaminação das águas de lavagem.

O CEMPRE (1997b) apresenta algumas limitações para a reciclagem dos plásticos rígidos. A variedade de plásticos é grande e a mistura de alguns tipos de resinas pode resultar em materiais defeituosos, de baixa qualidade, sem as especificações técnicas necessárias para retornar à produção como matéria-prima.

Além de todas estas dificuldades, o plástico reciclado é o único material taxado pelo IPI (12%), ao contrário do papel, vidro, alumínio e demais insumos comumente reciclados. Na verdade o plástico reciclado está sendo taxado pela segunda vez, uma vez que o produto original já pagou antes de se tornar sucata (Furtado, 1996). Outro fato que não incentiva a reciclagem é que a resina virgem é taxada pelo IPI em 10%, percentual menor do que para a resina reciclada.

5.12 Oportunidades para a reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo

Ferraz et al. (apud Lemos e Nascimento, 1998) vislumbraram que a questão ambiental oferece a oportunidade de se constituir em uma das bases de renovação da

competitividade das empresas brasileiras, dadas a capacitação produtiva e tecnológica existente no país. Porém, segundo os mesmos autores, é necessária a adoção de uma postura pró-ativa com relação ao meio ambiente por parte dos empresários, que poderá construir, a médio e longo prazo, vantagens competitivas de difícil superação pelos competidores.

Para Donaire (1995), “a globalização dos negócios, a internacionalização dos padrões de qualidade ambiental esperadas na ISO 14000, a conscientização crescente dos atuais consumidores e a disseminação da educação ambiental nas escolas permitem antever que a exigência futura que farão os futuros consumidores em relação à preservação do meio ambiente e à qualidade de vida deverão intensificar-se”.

Essa mudança de cenário que vem ocorrendo, intensificando a importância das questões ambientais, vem criando a necessidade de mudança nas empresas para se adaptarem à nova realidade, procurando oportunidades para competirem e serem bem sucedidas.

Para Porter e Linde (1995), as exigências ambientais podem gerar inovações, que por sua vez podem reduzir o custo e o preço total de um produto ou aumentar o seu valor agregado.

Donaire (1995) aponta como oportunidades, entre outras, a reciclagem de materiais, trazendo grande economia de recursos para as empresas; o reaproveitamento dos resíduos internamente ou sua venda para outras empresas através de Bolsas de Resíduos; o desenvolvimento de novos processos produtivos com a utilização da produção mais limpa, que trazem vantagens competitivas e até possibilitam a venda de patentes; e o desenvolvimento de novos produtos para um mercado cada vez maior de consumidores conscientizados com a questão ecológica.

Dentro deste contexto, a reciclagem de resíduos plásticos constitui uma oportunidade e com potencial de crescimento. Atualmente existe uma participação ainda muito pequena da reciclagem de plástico em relação ao potencial de mercado interno de plásticos no Brasil e particularmente inexistente na indústria da construção civil. A reciclagem mecânica tende a crescer significativamente devido à abundância de matéria-prima existente e às oportunidades dadas a esta atividade (CEMPRE, 1998b).

Segundo Maimon apud Lemos e Nascimento (1998), uma pesquisa de mercado elaborada pelo Instituto Gallup, realizada em 22 países (ricos e pobres) indicou que 53% dos entrevistados estavam dispostos a pagar um preço mais alto pela proteção do meio ambiente, assim como 71% dos brasileiros entrevistados.

Da mesma forma, uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional das Indústrias (CNI), em maio de 1998, indicou que 68% dos brasileiros (de 2000 pessoas entrevistadas) estariam dispostos a pagar mais por um produto que não poluísse o ambiente (Ambiente Global, 1999). A correspondência entre o que as pessoas dizem e o que elas fazem pode ser discutível, mas a tendência para o consumo sustentável é inegável (KINLAW, 1997).

No entanto, segundo Günther, Wiebeck e Piva (1999), o material plástico encontra resistências para a sua aceitação pelo mercado brasileiro, apesar do atual movimento ecológico. Em pesquisa realizada com 400 consumidores em Porto Alegre, entre janeiro e março de 1999, foi constatada uma forte resistência dos consumidores a pagar a mais por um produto ou embalagem que tenha material reciclado em sua composição. Para 90,2% da amostra, estes produtos não devem ser mais caros que os “tradicionais”, embora 85,5% dos respondentes

tenham afirmado que as pessoas gostariam de comprar produtos ecológicos, que poluíssem menos, se tivessem esta oportunidade (DINATO et al., 1999).

5.13 Experiências internacionais na reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo

Segundo Furtado (1996), outros países têm uma política ambiental efetiva, que favorece a reciclagem. De acordo com o mesmo autor, os recicladores europeus, americanos e australianos são motivados a crescer e produzir sempre mais de 500 t/mês, em escala muito maior à dos nacionais. Além disso, tais recicladores adquirem a sucata bem melhor coletada e selecionada e são estimulados a desenvolver produtos e tecnologias.

O Japão gera anualmente 9 milhões de toneladas de lixo plástico (Sammarco e Delfini, 1999), sendo o segundo maior transformador de plásticos no mundo, atrás somente dos Estados Unidos. Segundo Huang (1995), nesse país, 11% dos resíduos plásticos são reaproveitados através da reciclagem mecânica, que é predominantemente primária. A reciclagem secundária já foi tentada, mas abandonada, e não parece haver planos nesta área.

De acordo com Iijima (1996), a coleta e disposição dos resíduos plásticos municipais são de responsabilidade dos municípios, mas o Japão não possui uma legislação abrangendo a coleta e reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo. Embora cerca de 65% dos resíduos sólidos urbanos sejam incinerados, apenas 15% o são com recuperação de energia (reciclagem quartenária).

Há planos para que até o fim do século 21 se aumente a reciclagem energética para 70% e se reduza a necessidade de aterros para menos de 10% (atualmente 37% dos resíduos sólidos são aterrados) (HUANG, 1995).

Nos Estado Unidos, a legislação exige uma porcentagem mínima de material reciclado nas embalagens, com um valor que varia de Estado para Estado (na Califórnia e no Oregon, o conteúdo de plástico reciclado exigido nas embalagens é de 25%). Propostas de emendas à legislação vigente incluem metas de porcentagem de reciclagem e estabelecimento de conteúdo mínimo de material reciclado nas embalagens de acordo com o material (LIESEMER, 1996).

Os programas de coleta de resíduos domésticos de plástico nos EUA têm se concentrado quase que exclusivamente na reciclagem de garrafas feitas de PET e de PEAD, matérias-primas de aproximadamente 90% de todas as garrafas de plástico. A coleta tem sido feita, na sua maior parte nas ruas, via coleta seletiva, e uma pequena parte, em postos de entrega especiais. A reciclagem de PET atinge 42% da produção total desta resina no país. As outras resinas predominantes em embalagens como o PVC, PEBD, PS e PP são recicladas, mas a quantidade não se aproximam daquelas obtidas com o PET e o PEAD (LIESEMER, 1996).

As empresas chinesas recebem milhares de toneladas de plástico reciclado em recicladoras alemãs e as transformam, entre outros produtos, em brinquedos baratos e tecidos sintéticos de PET reciclado. Na Alemanha, a legislação exige que as empresas se responsabilizem pelo fim dos seus produtos, ou seja, o destino final (FURTADO 1996).

Segundo Joerg Woidasky, do Instituto Fraunhofer da Alemanha, a legislação alemã das embalagens é baseada no princípio do poluidor pagador (as empresas que poluem pagam taxas

para garantir o tratamento da poluição), na responsabilidade da indústria no recolhimento das embalagens e na prevenção da geração de resíduos (Woidasky, 1999). Esta legislação estabeleceu cotas de coleta e reciclagem para os diversos materiais encontrados no lixo, sendo que para os plásticos a cota é de 64%.

Para que as cotas de reciclagem fossem atingidas, foi criado o Duales System Deutschland AG (DSD, o Sistema Dual Alemão), uma organização sem fins lucrativos.

As empresas pagam taxas ao DSD, responsável pela organização da coleta, seleção e reciclagem dos resíduos domésticos de embalagens.

O termo dual se refere a um segundo sistema operado em paralelo à coleta e disposição municipal. Isto porque o Decreto da Reciclagem de Produto e Gerenciamento de Resíduos de 1994 transfere a responsabilidade para a reciclagem de resíduos à indústria, enquanto os municípios são responsáveis pela incineração ou disposição em aterros dos resíduos que não são reciclados (DSD, 1999a).

As empresas pagam taxas ao DSD para ter o direito de usar o logotipo do ponto verde (Green dot) nas suas embalagens (o ponto verde identifica que a empresa é membro do DSD), garantindo que os resíduos gerados por ela serão coletados e reciclados. Tais taxas a serem pagas variam conforme o tipo e peso do material da embalagem; quanto maior a dificuldade de reciclagem do material, maior a taxa (DSD, 1999b).

As taxas são usadas para a coleta, separação, custos do sistema (70%) e para a reciclagem (30%). O DSD não realiza a coleta, triagem e reciclagem, mas, sim, organiza estas atividades, contratando terceiros para realizá-las. Dependendo do material, a indústria alemã tem organizações guarda-chuva adicionais para organizar estas atividades e as taxas pagas ao DSD

são a elas repassadas (Woidasky, 1999). A DKR, Gesellschaft für Kunststoffrecycling GmbH (a Associação de Reciclagem de Plásticos), é responsável pela organização da reciclagem das embalagens plásticas (BRUDER, 1996).

Os resíduos dos diferentes tipos de materiais têm coleta diferenciada. As embalagens leves (de plástico, alumínio, etc.) são coletadas nas residências através dos sacos amarelos, distribuídos pelo DSD ou através dos containeres, onde os consumidores podem depositar suas embalagens usadas. As embalagens de papel e papelão são coletadas nos pequenos containeres das residências ou através dos grandes containeres situados em locais convenientes (DSD, 1999a).

Na Alemanha, segundo o Decreto da Embalagem, os fabricantes de embalagens têm três alternativas: implantar um sistema de retorno das embalagens, recuperar os produtos ou se unir a uma organização autorizada que realize as suas obrigações, alternativa mais adotada. A França também usa os pontos verdes adotados pela Alemanha.

A França é o país europeu com maior número de unidades de incineração, com aproximadamente 300 unidades, com tendência de ser esta a técnica mais desenvolvida no futuro, tratando aproximadamente 60% dos resíduos domésticos com a recuperação de energia, ou seja, efetuando a reciclagem energética.

Os outros países europeus adotam modelos parecidos com os descritos anteriormente. Em comum, todos têm uma política para a reciclagem dos seus resíduos, principalmente das embalagens.

No Brasil, as empresas recicladoras de resíduos plásticos pós-consumo, são na sua maior parte, micro e pequenas empresas, que não têm acesso à informação, linhas de crédito e

financiamentos ou subsídios fiscais tributários e que apresentam dificuldades para capacitar-se e investir em tecnologias mais modernas. Utilizam, portanto, tecnologias rudimentares em grande parte em empresas de fundo de quintal, trabalhando com a criatividade percebida em seus equipamentos, para reduzir custos, tentando solucionar seus problemas na base da tentativa e erro, basicamente sem apoio governamental ou institucional, neste sentido. Cabe aqui lembrar que os fornecedores dos grãos de polipropileno utilizados para desenvolvimento do presente trabalho são igualmente compatíveis com este contexto e perfil.

5.14 Reciclagem e desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil

A aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável à construção civil permite vislumbrar uma série de diferentes metas ambientais, dentre as quais podem ser citadas:

- Preservação das matérias-primas naturais;
- Redução do consumo de energia;
- Economia de água;
- Proteção do meio ambiente natural;
- Redução do desperdício e da geração de resíduos e,
- Melhoria da qualidade do ambiente construído.

A reciclagem de resíduos como materiais de construção civil tem potencial para colaborar para quase todas as metas citadas anteriormente. No entanto, a vantagem ambiental de um processo de reciclagem somente pode ser dada como certa após efetuar-se uma análise específica. Ela muitas vezes permite também a redução da poluição emitida. No caso da utilização de resíduos como adição ao cimento ocorre a redução do CO₂ emitido por meio da descarbonatação da cal e do CO₂ (entre 274 e 321 kg/t de clínquer) produzidos pela combustão (JOHN, 1999 apud YAMAMOTO et al., 1997).

Segundo os autores, nas condições da indústria de cimento Brasileira, a substituição de 60% do clínquer por escória de alto forno permite uma redução de CO₂ de 494 kg/t cimento. Muitas vezes a incorporação de resíduos permite um aumento da durabilidade Dos materiais de construção civil, como vem sendo comprovado por inúmeros estudos na área de adições ao cimento e produção de compósitos à base de cimento Portland.

5.15 A reciclagem de resíduos na construção civil no Brasil

No Brasil, a maior experiência em reaproveitamento de produtos gerados por outras indústrias na produção de materiais de construção civil é a conduzida pela indústria do cimento, que recicla principalmente escórias de alto forno básicas e cinzas volantes.

Estima-se que a indústria cimenteira brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno básicas, além da calcinação de argilas e adição de filler calcário, reduziu a geração de CO₂ em 29% e uma economia de combustível de 28% (JOHN, 1999 apud YAMAMOTO et al., 1997).

A indústria cimenteira economizou entre 1976 e 1995 cerca de 750 mil toneladas de óleo combustível queimando resíduos, como casca de arroz, serragem e pedaços de madeira, pó de carvão vegetal, pedaços de pneus e borrachas, cascas de babaçu, entre outros (JOHN, 1999 apud MARCIANO & KHIARA 1997).

Importante ressaltar que não se trata de reciclagem propriamente dita e sim de reaproveitamento. É, portanto correto afirmar que esta indústria utiliza o conceito dos 3R's, apresentado anteriormente no item 2.3.

Uma tendência de pesquisa é o desenvolvimento de cimentos de escória para aplicações específicas, como cimentos especiais de baixa alcalinidade destinados a produção de compósitos, ou seja, materiais à base de cimento Portland reforçados com fibras de vidro, termoplásticos ou fibras vegetais.

O setor siderúrgico é também um grande reciclador. Boa parte do aço destinado ao reforço de concreto armado produzido no país é proveniente de processos produtivos que utilizam como matéria-prima quase que exclusivamente a sucata.

A reciclagem desta sucata permitiu economizar em 1997 cerca de 6 milhões de toneladas de minério de ferro, evitou a geração de cerca de 2,3 milhões de toneladas de resíduos e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO₂.

A reciclagem de entulho como material de construção civil, iniciada na Europa após a Segunda Guerra Mundial, encontra-se no Brasil muito atrasada, apesar da escassez de agregados nas grandes regiões metropolitanas, especialmente se comparada com países europeus, onde a fração reciclada pode atingir cerca de 60%, como é o caso da Holanda, que já discute a certificação do produto, tendo se convertida tal prática em um excelente negócio.

Embora já se observe no mercado a movimentação de empresas interessadas em explorar o negócio de reciclagem de entulho e não apenas o negócio de transporte, as experiências brasileiras estão limitadas a ações das municipalidades que buscam reduzir os custos e o impacto ambiental negativo da deposição do enorme massa de entulho (entre 0,7 a 1 t/hab/ano (PINTO, 1995)).

No meio urbano algumas municipalidades, como a de Belo Horizonte, operam plantas de reciclagem, produzindo principalmente base para pavimentação. A tecnologia de reciclagem de entulho em canteiro de obras para a produção de argamassas aproveita inclusive a atividade pozolânica conferida pela fração cerâmica (LEVY e HELENE, 1996).

Um dos problemas mais graves nos entulhos é que sua composição varia de acordo com a fase da obra e o tipo de obra, o que afeta a qualidade das argamassas produzidas. A recente introdução maciça de gesso na forma de revestimentos ou placas é também um complicador.

Estes problemas podem ser superados pela classificação dos entulhos e o seu manejo em pilhas de maneira a reduzir a sua variabilidade. Estas tecnologias somente são viáveis em centrais de reciclagem.

Existe uma grande quantidade de resíduos com potencial de emprego na construção civil e que ainda são ignorados pelo mercado e até por pesquisadores brasileiros, como é o caso do plástico.

O desenvolvimento da reciclagem está estreitamente ligado a atividades de pesquisa e essencialmente é estudado em laboratórios universitários. As diferenças entre os processos industriais, matérias-primas e técnicas de manuseio dos resíduos e as técnicas de construção civil dificultam a simples importação de tecnologias.

A Tabela 5.2 apresenta um panorama resumido sobre o estágio de desenvolvimento de pesquisas com diversos resíduos no Brasil.

Tabela 5.2: Resíduos reciclados como material de construção civil

Resíduo	Caracterização	Risco Ambiental	Alternativas de reciclagem	Estudos laboratoriais	Risco ambiental do novo produto	Viabilidade econômica	Desenvolvimento do processo	Controle da qualidade / Normalização	Transferência da tecnologia	Novas alternativas
Escória de Alto forno										
Cinza volante										
Escória de aciaria										
Cinza de grelha										
Entulho de obra										
Cinza de casca de arroz										
Escória de cobre										
Cinza de xisto betuminoso										
Fosfogesso										
Fibras vegetais										
Microsílica										
Cal de carbureto										
Resíduos de madeira										
Areia de fundição										
Beneficiamento de rochas										
Aparas de plástico										

Nota: As áreas em cinza forte indicam conhecimento consolidado. Cinza fraco conhecimento já desenvolvido. Em branco conhecimento incipiente ou inexistente (JOHN, 1997).

Segundo JOHN (1999), a reciclagem na construção civil, até recentemente, foi vista como sendo apenas uma fórmula de baixar custos. No caso do concreto, a reciclagem

eventualmente é vista como uma ferramenta para melhorar o desempenho do produto, principalmente incorporando resistência mecânica e aproveitando materiais que possam substituir ou compor a fração mineral dos agregados e diminuindo as quantidades de cimentos.

O modelo linear de produção, hoje em vigor no mundo, mostra como os produtos são projetados, construídos, utilizados e são descartados no lixo. Isto é válido tanto para bens de consumo não durável, como embalagens, quanto para edifícios e estradas.

O processo de produção é alimentado, em grande medida, por recursos naturais não renováveis. O modelo de produção representado na Figura 5.1 demonstra-se insustentável, pois atualmente apresenta três problemas evidentes.

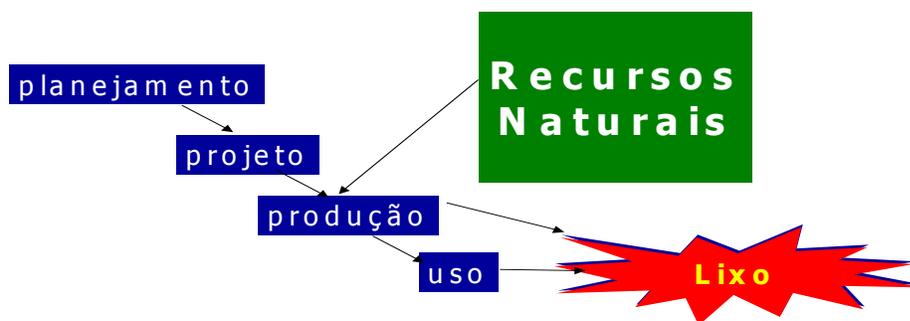


Figura 5.1: Modelo de produção linear

Fonte: JOHN, 1999, apud CURWELL & COOPER, 1998

Em primeiro lugar, para muitos materiais o volume de matérias-primas naturais já não é abundante, ou pelo menos, seu processo de obtenção apresenta dificuldades e custos crescentes. As reservas naturais de cobre, por exemplo, devem durar em torno de 65 anos.

A construção civil é, em qualquer sociedade, o setor responsável pelo consumo do maior volume de recursos naturais, em estimativas que variam entre 15% e 50% dos recursos extraídos, além de seus produtos serem intensos consumidores de energia.

Em segundo lugar, com o crescimento da quantidade de pessoas incorporadas na sociedade de consumo, o volume acumulado de resíduos, inclusive de resíduos perigosos, cresce, tornando seu gerenciamento caro e difícil. A poluição do ar é inerente a muitas atividades industriais.

Por exemplo, a produção de cimento e cal hidratada exige a descarbonatação do calcário, com liberação de grandes volumes de CO₂, o principal gás responsável pelo aquecimento global, para a atmosfera. De fato, para cada tonelada de calcário calcinado são liberados cerca de 440 kg de CO₂ para o ambiente, além da emissão causada pela queima do combustível.

No caso dos resíduos sólidos, a escassez de áreas para disposição destes resíduos na região próxima aos grandes centros populacionais, aliada ao crescente controle dos riscos de poluição ambiental (especialmente de águas subterrâneas) e de saúde pública torna este um problema de custo cada vez mais elevado.

Em terceiro lugar, este modelo de produção somente foi viável até hoje devido à exclusão social: a maior parte da humanidade não participa. A inclusão de populações hoje excluídas neste modelo de bem-estar – certamente mais de 50% da humanidade - agravaria a crise do modelo. Desta forma, torna-se necessário um novo modelo de produção, no qual a utilização dos recursos empregados seja otimizada e a geração de resíduos seja reduzida a um mínimo e este mínimo de resíduos também seja reciclado.

No momento em que a construção não apresentar mais condições de uso o modelo sofre uma reabilitação, ou seja, uma reforma e, no momento em que a simples reabilitação não for capaz de restaurar a capacidade de atendimento das necessidades dos usuários, a construção é desmontada e seus componentes reutilizados (reutilização) em outro projeto, que deverá sofrer reabilitações diversas. Quando o desgaste dos componentes tornar impossível a sua reutilização, normalmente após vários do ciclos uso – reabilitação – reutilizações o material é considerado resíduo. A chave no processo é a reciclagem dos resíduos.

A Figura 5.2, segundo John (1999) apud Curwell e Cooper (1998), apresenta uma adaptação do modelo de ciclo fechado aplicado ao caso da construção civil.

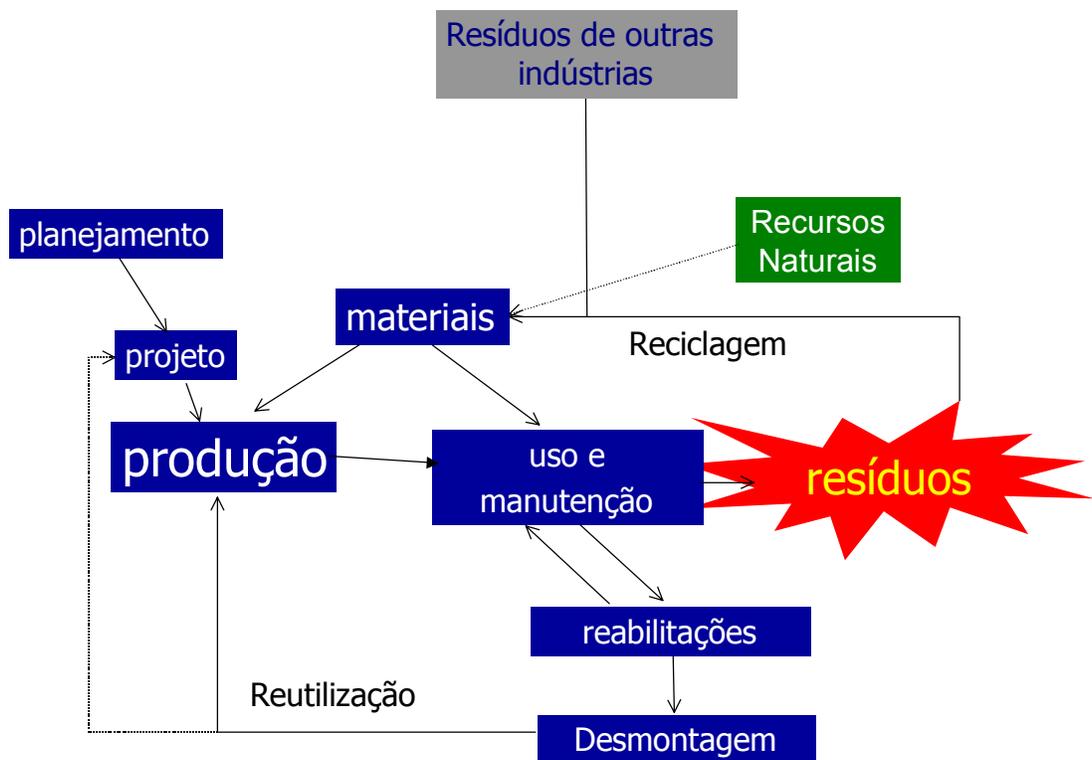


Figura 5.2: Ciclo de produção fechado

O desafio de engenharia embutido no conceito é imenso e duvidosa é a viabilidade deste modelo em toda a sua profundidade para todos os bens necessários ao desenvolvimento da humanidade.

Provavelmente este modelo não vai prescindir de uma extração de matérias-primas externas ao processo e, no caso da construção civil, uma fonte adicional de matérias-primas poderão vir da reciclagem de resíduos produzidos por outras indústrias.

5.16 Reciclagem do entulho na construção civil

A massa de entulho é normalmente superior à do lixo domiciliar, tornando a coleta difícil e onerosa e expondo a cidadania aos riscos das fôrmas de disposição final sem controle que pode provocar enchentes, obstruir vias e desenvolver vetores de doenças.

A reciclagem do entulho é possível e desejável, mas, precisa atingir viabilidade econômica o que inclui o desenvolvimento de mercado, além do atual estágio de caracterização dos materiais, estudos sobre o comportamento físico-químico e viabilidade tecnológica.

Conforme relatado anteriormente, a mudança do Modelo de Produção Linear para o Modelo de Ciclo de Produção Fechado, incorpora uma nova aplicação para os resíduos, que é a da sua percepção como descarte inutilizável, ou seja, lixo, para resíduo sólido reaproveitável.

A qualidade na indústria da construção civil depende da redução da geração de resíduos na obra, do desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem, do desenvolvimento do meio técnico por meio da conscientização geral, de investimentos em pesquisa e

desenvolvimento, do desenvolvimento das técnicas de gerenciamento, de projetos que incorporem especificações técnicas para o reaproveitamento dos resíduos, do incentivo às empresas, da padronização e normalização, da racionalização e da industrialização da construção civil, dentre outros fatores.

A massa de RSCD⁸ varia em cidades brasileiras de médio e grande porte entre 41% (Salvador, BA) e 70% (S.Paulo, SP). As estatísticas internacionais apresentam índices que vão de 130 a 3000 kg/hab. ano.

No Brasil apresenta-se entre 230 (Vitória da Conquista, BA) a 760 kg/hab.ano (Jundiaí, SP).

Os estudos desenvolvidos no âmbito das universidades, estaduais e federais, têm avançado em termos de pesquisas para a aplicação dos RSCD e de outros resíduos gerados pelo descarte urbano metropolitano e pelas demais indústrias. Concentra-se na caracterização dos diversos materiais e ensaios laboratoriais, produção e ensaios de materiais compósitos com base em cimento Portland visando a sua aplicabilidade como agregado para argamassas, concretos e elementos pré-fabricados.

Em geral, o que estes estudos demonstram é que todos os materiais como argamassas, areia, cerâmicas, concretos, madeiras, metais, papéis, plásticos, pedras, tijolos, tintas, etc. são reaproveitáveis.

⁸ Para simplificar, estamos utilizando esta abreviação para Resíduos Sólidos da Construção e Demolição.

5.17 Pesquisa e desenvolvimento: produção de compósitos

Segundo a literatura a palavra compósito refere-se ao material obtido a partir de uma matriz reforçada com fibras, podendo, ainda, referir-se à mistura de componentes na obtenção de materiais com partes das propriedades de cada constituinte isolado.

Suas características, propriedades mecânicas e comportamentos físico-químicos variam de acordo com as dosagens dos componentes utilizados e é daí que surge a necessidade de pesquisas e ensaios laboratoriais, a fim de fornecer subsídios tecnológicos para a produção de materiais de construção alternativos.

O estudo de tais materiais pode viabilizar a fabricação de materiais de baixo custo, permitindo a substituição parcial ou total de alguns materiais convencionais como a areia e a brita. Atualmente, a principal aplicação destes compósitos é na fabricação de elementos pré-fabricados, em sua maioria não submetidos a solicitações mecânicas estruturais.

Pera (1997), descreveu que as pesquisas envolvendo tecnologia para a reciclagem na construção civil iniciaram-se entre 1940 e 1950. Segundo o pesquisador, o desperdício por habitante no oeste europeu varia entre 0,7 a 1,0 t/hab o que representa 215 milhões de toneladas, sendo 175 da demolição e 40 da construção. Ainda, segundo este pesquisador, as pesquisas na Europa concentram-se na área de agregados para substituir a areia que representa 40% do peso do concreto, além de outros materiais que aumentem a resistência do concreto. Em outras palavras, as pesquisas concentram-se no estudo dos compósitos.

A curiosidade é que estes materiais não são necessariamente provenientes da construção civil e sim de outras indústrias que estão tentando resolver o que fazer para a destinação final de seus resíduos face às severas legislações e multas em países europeus.

Cavalcante e Cheriaf (1997), ao realizarem ensaios de avaliação para controle Ambiental de Materiais com Resíduos Incorporados, sugeriram que se devam considerar como aspectos para a viabilidade da aplicação de materiais em adição ao concreto e argamassas, o desempenho estrutural, ou seja, o comportamento físico-químico perante as solicitações de esforços e cargas, o potencial poluente e a influência da lixiviação de certos elementos.

Silveira et. al. (1997), ao pesquisarem a cinza da casca de arroz como adição mineral, identificaram que ocorreu atividade pozolânica na cinza da casca do arroz e que, quando queimada a 700°C apresenta estrutura amorfa e a 1100°C apresenta estrutura cristalina. Os autores concluíram que, a variação da temperatura de queima e o tempo de moagem influenciam nas características físico-químicas e no índice de atividade pozolânica da cinza do arroz.

Ainda sobre a cinza da casca de arroz, Prudêncio Jr. e Santos (1997), apresentaram alguns fatores que apontam para a tendência mundial de adição de pozolanas ao concreto armado. Dentre os fatores destacam-se: o menor consumo de cimento, a melhoria da trabalhabilidade, o menor calor de hidratação e o aumento da durabilidade do concreto.

Masuero et al (1997), ao pesquisarem os resíduos da indústria coureira apresentaram a possibilidade de utilização das aparas, do farelo e a serragem de couro tratadas quimicamente e biologicamente como materiais para a construção civil em razão de suas propriedades isolantes térmicas e acústicas, principalmente para a aplicação deste material na fabricação de painéis e divisórias. Segundo os autores, na época já havia experiências na fabricação de telhas 64% mais leves do que as de cerâmicas, preservando as demais características comparadas.

Na Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, vários estudos são desenvolvidos destacando-se a viabilidade da produção de compósitos à base de cimento Portland

utilizando-se como agregados os particulados da madeira, pó de serra, o pó de borracha de pneu, casca de arroz, fibras de polipropileno, dentre outros materiais descartados pela indústria ou pelo cidadão urbano.

Os resultados apresentam-se satisfatoriamente, principalmente aqueles em que se utiliza o cimento Portland de alta resistência inicial, ou seja, o CP-V-ARI, pelo fato de compensar possíveis perdas de resistências dos compósitos resultantes auferindo resistências superiores aos demais cimentos nas primeiras idades.

Quanto aos plásticos, Garlet e Greve (1997) ao estudarem a aplicação do resíduo do plástico tipo EVA - Ethylene Vinyl Acetate da indústria calçadista na construção civil, concluíram que quando moído e incorporado ao concreto uma relação de até 60% em relação ao volume total de agregado pode ser adicionada para a produção de componentes para a construção civil.

Outras pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas para a produção de compósitos para a produção de painéis de cimentos de escória reforçados com fibra de vidro, reciclagens de cinza de casca de eucalipto e entulho de obra em componentes de construção, uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria, uso de solo-vinhaça concentrado para na fabricação de tijolos, utilização do pó gerado na produção de ligas de ferro-silício e silício metálico em concretos, aproveitamento de escória de ferro-cromo para produção de concreto de elevado desempenho, compósitos reforçados com fibras vegetais, dentre outros materiais compósitos.

A Tabela 5.3, citada anteriormente, apresentando o estágio de desenvolvimento de pesquisas com diversos resíduos no Brasil pode ser constantemente atualizada, revista e ampliada incluindo-se novos materiais e resultados de pesquisas apresentadas em congressos, *workshops*,

feiras e eventos científicos, econômicos ou acadêmicos ou por meio de publicações técnicas e científicas. No entanto, há também experiências práticas desenvolvidas diretamente pela indústria com pouca ou nenhuma divulgação.

No âmbito internacional, há pesquisas sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos na indústria da construção civil, sejam estes resíduos originados na própria construção ou demolição, ou ainda resíduos oriundos de outras atividades industriais e/ou resíduos sólidos decorrentes do descarte doméstico urbano. Como referência, vários destes estudos foram apresentados por ocasião do seminário internacional “Waste Materials in Construction: science and engineering of recycling for environmental protection”, realizado na Escócia em 2000. Na oportunidade 96 trabalhos foram apresentados e posteriormente publicados abordando estudos sobre compósitos com base em cimento Portland com o reaproveitamento de mais de 50 materiais para a construção civil.

No entanto, deste total, apenas um estudo elaborado por Bocci, Colagrande e Montepara, professores respectivamente das Universidades de Ancona, L'Aquila e Parma, abordou o reaproveitamento de plásticos. Neste caso, foram analisadas misturas de PVC e PET moídos para a utilização como adição em concretos asfálticos. Os autores concluíram que quando misturados 45% de PVC, 45% de PET e 10% de outros tipos de plásticos todos cortados em flocos, adicionados até o limite de 10% da massa da mistura, podem auferir acréscimo de ductilidade, o que é desejável em pavimentos e concretos desta natureza.

No que se refere ao plástico, as pesquisas, estudos e ensaios concentram-se no uso de fibras sintéticas de polipropileno para a produção de compósitos cimentícios fibrosos.

De maneira geral, como aspecto favorável dos resultados obtidos nos experimentos com compósitos, os estudos revelam que a tecnologia do concreto desenvolve produtos, processos e métodos para manter, ou em certos casos, melhorar o desempenho quanto à resistência mecânica. Porém, apresenta como aspecto desfavorável a dificuldade no controle de qualidade das amostras dos diversos materiais, em razão da sua heterogeneidade de origem, composição e granulometria. Esta dificuldade está presente em quase todos os trabalhos deste gênero.⁹

⁹ Durante a realização da revisão bibliográfica e dos ensaios laboratoriais deste presente estudo, foram analisadas importantes e representativas fontes bibliográficas para os estudos na construção civil, como o Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, acervo de teses e dissertações da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e Universidade de São Paulo – USP e não se constatou nenhuma pesquisa em andamento ou concluída sobre o reaproveitamento de grãos reciclados aglutinados de polipropileno ou equivalente aos utilizados neste estudo.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem o objetivo de descrever os materiais, equipamentos e métodos normativos utilizados para analisar algumas das principais propriedades mecânicas no estado endurecido do compósito à base de cimento Portland com a adição dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado. A seção 7 apresenta os resultados obtidos por meio destes ensaios.

6.1 Materiais componentes do concreto

6.1.1 Cimento

O cimento utilizado no desenvolvimento desta pesquisa foi o ARI-V (Alta Resistência Inicial), com a garantia de que suas propriedades físicas atendem às normas da ABNT. Este é o cimento normalmente empregado para Concretos de Alto Desempenho – CAD, por apresentar elevadas resistências nas primeiras idades, ou seja, com 1, 3 e 7 dias e possibilitar a redução do tempo de desforma das peças. Todo o cimento utilizado foi retirado de um mesmo lote, transportado diretamente da fábrica (Santo André-SP) para o laboratório (Campinas-SP) e o seu armazenamento ocorreu em local seco, sendo os sacos de 50 kg foram revestidos com sacos plásticos para garantir que não houvesse contato com umidade.

6.1.2 Agregado miúdo e graúdo

Com relação ao agregado miúdo, a escolha da areia foi determinada em função da facilidade de obtenção e de uma granulometria usual para este tipo de concreto.

Portanto, a areia utilizada foi obtida da região de Campinas, interior do Estado de São Paulo, disponível no laboratório da Unicamp.

Esta areia foi previamente passada na peneira #8, abertura da malha 2,4 mm e depois ensaiada para determinação de sua massa específica aparente, massa unitária e curva granulométrica.

A massa específica aparente da areia foi determinada pelo ensaio do frasco de Chapman pelo método NBR 7217:87.

6.1.3 Água

Utilizou-se, em todo o processo, água potável disponível no Laboratório da FEC, fornecida pela concessionária da região de Campinas, São Paulo.

6.1.4 Aditivos químicos

De acordo com a NBR 11768:92, aditivos para concreto de cimento Portland, aditivos são produtos utilizados em pequenas quantidades para modificar algumas propriedades dos concretos, adequando-os ao uso.

Dentro desta especificação, cita-se o emprego dos superplastificantes que têm como função a redução da quantidade de água permitindo misturas com baixas relações a/c, além de melhorar a trabalhabilidade do concreto ou argamassa.

Utilizou-se o aditivo superplastificante líquido de aspecto viscoso com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado (policarboxilatos), isento de cloretos, compatível com as prescrições da norma ASTM C 494 (tipos A e F), ASTM C 1017 e com todos os cimentos que atendem a ASTM 150.

6.1.5 Grãos de polipropileno aglutinado reciclado

Todo o plástico utilizado como substituição no concreto foi obtido através da aglutinação de flocos e tiras de plástico lavados e triturados, provenientes, principalmente, de embalagens do tipo saco de rafia utilizados na agricultura como sacaria de grãos, farelos, vegetais, madeira, materiais de construção civil ou como embalagem de diversos produtos industrializados. O processo da reciclagem foi executado por uma empresa localizada no município de Guarulhos - SP.

Torna-se importante ressaltar que o primeiro fornecedor dos grãos, embora tenha oferecido apoio importante no início deste trabalho em 2001, descontinuando em 2002 o fornecimento e permanecendo com um grande e variado estoque de plásticos em flocos e grãos aglutinados. No entanto, vários destes materiais apresentavam cargas químicas (aditivos, corantes, estabilizantes), porém todos sem identificação ou caracterização inviabilizando a sua utilização neste projeto.

Ao final de 2003, identificou-se um reciclador com o qual se pôde dar continuidade ao desenvolvimento dos grãos para que atingissem o formato e a granulometria adequados para a produção dos compósitos e a realização dos ensaios laboratoriais.

Desta forma, após algumas tentativas, acertos e erros ao longo do período de 2001 a 2004, compreendendo desde a pesquisa de potenciais fornecedores destes grãos até o ajuste do formato, dimensões e tipo de plástico mais adequados, é que se pode consolidar este estudo.

Segundo dados fornecidos pelo reciclador, o plástico utilizado nesta pesquisa é composto essencialmente por tiras de ráfias de sacaria constituída por polipropileno, triturado no estado pós-consumo, sem adições ou aditivos especiais como corantes, estabilizantes, compostos químicos e sem a adição de plástico virgem ou de plásticos de outros tipos (Polietileno de Alta Densidade-PEAD, Polietileno de Baixa Densidade-PEBD, Polietileno Teraftalato-PET, Poliestireno-PE, PVC, Acrílicos-PVA, ABS, Nylon, etc.).

Os grãos foram adquiridos isentos de vestígios de borracha, metais, minérios, minerais ou materiais orgânicos provenientes de vegetais ou animais, graxas, óleos, combustíveis etc. Nas instalações do fornecedor pôde-se acompanhar o tratamento do material que chega prensado e enfardado por outras empresas e depois é cortado, lavado, seco e aglutinado, formando o GRAP. Depois o GRAP é extrusado (derretimento e formação de fios) e cortado na forma de *pellets* (pequenos bastões cilíndricos lisos com aproximadamente 5mm de diâmetro por 5 mm a 10 mm de comprimento) para ser ensacado, pesado e comercializado.

Os grãos foram desenvolvidos em etapas junto ao fornecedor até atingirem o formato adequado para a finalidade desta pesquisa.

O grãos de polipropileno aglutinado reciclado não foram submetidos a tratamentos de lavagem em soluções especiais ou saturadas (hidróxido de sódio comercial - soda cáustica, por exemplo).

No entanto, caso ocorresse a necessidade de remoção de impurezas ou para prover aspereza em sua superfície no intuito de aumentar sua aderência na pasta de cimento e areia, argamassa e concreto, este procedimento poderia ter sido necessário.

A curva granulométrica dos grãos foi obtida por meio do ensaio determinado pela norma brasileira NBR 7211:83. Neste ensaio, também foi determinada a dimensão máxima característica dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado e seu módulo de finura.

6.2 Dosagem experimental

Os ensaios constantes neste estudo foram realizados seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para a construção civil.

Primeiramente, com o objetivo de caracterizar a areia e o grão de polipropileno, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica aparente e unitária.

Posteriormente, iniciou-se a dosagem experimental para se determinar o limite substituição de GRAP considerando a formação de pasta suficiente para se trabalhar com as misturas, a resistência à compressão axial na idade de 7 dias, o aspecto dos compósitos resultantes, a necessidade (ou não) de ajuste do traço e seleção das misturas para dar seqüência aos ensaios em corpos-de-prova cilíndricos.

Foram desenvolvidas duas séries de misturas além de um traço de referência. A primeira série foi identificada pela letra “P” e numerada seqüencialmente de 1 a 10 (P1 a P10), correspondente às misturas com substituição parcial da areia pelo GRAP em intervalos de 5% da massa total dos agregados. Desta série, não foram executadas as misturas P8 e P9.

Nesta etapa, e para esta série, foram moldados corpos-de-prova cúbicos com arestas na dimensão de 75 mm, partindo-se do traço inicial em massa 1:2 com relação água/cimento (a/c) 0,30 e aditivo superplastificante líquido na proporção de 1% em relação à massa do cimento.

A segunda série foi identificada como P21 e P22, correspondentes às misturas com substituição total da areia pelo GRAP sendo seus traços respectivamente 1:0,3 e 1:0,4 mantendo-se as mesmas proporções para a relação água/cimento e superplastificante adotados na série A. O traço de referência foi identificado como P0.

Para cada série e para o traço de referência foram moldados 3 corpos-de-prova cúbicos, totalizando 33 corpos-de-prova.

Na seqüência, foram selecionados os traços e as misturas para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, resistência à tração na flexão e determinação do módulo de elasticidade secante, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos na dimensão de 10,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura. A Tabela 6.1 resume a identificação das séries de misturas experimentais.

Tabela 6.1: Identificação das séries de misturas experimentais

	Traço em massa (1: 2: 0,3)						% de substituição por GRAP
	Mistura	cim	areia	GRAP	a/c	sp	
Referência	P0	1,00	0,20	-	0,30	0,01	0
Série A	P1	1,00	0,19	0,01	0,30	0,01	5
	P2	1,00	0,18	0,02	0,30	0,01	10
	P3	1,00	0,17	0,03	0,30	0,01	15
	P4	1,00	0,16	0,04	0,30	0,01	20
	P5	1,00	0,15	0,05	0,30	0,01	25
	P6	1,00	0,14	0,06	0,30	0,01	30
	P7	1,00	0,13	0,07	0,30	0,01	35
	P10	1,00	0,10	0,10	0,30	0,01	50
Série B	P21	1,00	-	0,30	0,30	0,01	100
	P22	1,00	-	0,40	0,30	0,01	100

6.3 Planejamento e preparação dos ensaios

Todos os grãos de polipropileno aglutinado reciclado utilizados foram guardados em ambiente seco, em embalagem apropriada. O cimento foi mantido na embalagem de fábrica e protegido contra a ação de intempéries e da umidade por meio de sacos plásticos; a areia, após a dosagem, foi mantida em baldes plásticos. Todos os materiais foram identificados por meio de crachás (Figura 6.1).



Figura 6.1: Materiais secos e dosados

Para a produção dos compósitos com o uso de grãos de polipropileno aglutinado reciclado, os agregados minerais miúdo e graúdo foram substituídos pelos grãos de plástico em misturas a partir de 5% em relação à massa dos agregados numa série denominada Série A; na Série B, os grãos foram misturados com o cimento sem agregados minerais, apenas cimento e grãos de polipropileno.

Os grãos de polipropileno aglutinado reciclado apresentaram um formato bastante homogêneo entre si, com superfície bastante estriada, porosa, com cavidades e de geometria irregular, similar aos dos grãos de pipoca estourada (Figura 6.2).



Figura 6.2: grãos reciclados aglutinados de polipropileno – GRAP

6.4 Confeção dos corpos-de-prova

6.4.1 Corpos-de-prova cúbicos

Como já descrito anteriormente, as dosagens experimentais foram inicialmente desenvolvidas para que pudesse escolher os traços adequados para os estudos. Para este início decidiu-se por um traço em massa 1: 2: 0,30 com a aditivo superplastificante . Este traço, rico em cimento, foi escolhido com base em duas hipóteses;

A primeira considerando que um traço mais rico poderia compensar a eventual perda de resistência em função da retirada dos agregados miúdos (parcial e gradativamente) e graúdo (totalmente) e suas respectivas substituições pelos grãos de polipropileno.

A segunda hipótese, considerando a possibilidade de se obter alta resistência para evitar que os grãos de plástico se destacassem do concreto em obras prontas na construção civil, contaminando novamente o meio ambiente. Todas as substituições foram executadas em relação à massa total dos agregados.

Os materiais componentes do concreto foram misturados em uma argamassadeira, com capacidade de 40 litros; primeiramente, numa velocidade baixa, foi colocada a areia e depois, a cada 30 segundos foram colocados o cimento, depois 50% da água previamente misturada com o aditivo, depois os grãos de plástico e o restante da água aditivada.

Logo em seguida (aproximadamente mais 30 segundos), o concreto foi misturado em alta velocidade durante 30 segundos, com um descanso de 1 minuto e 30 segundos e, na seqüência final da mistura, a argamassadeira foi ligada em alta velocidade durante 60 segundos (Figura 6.3).



Figura 6.3: Mistura dos materiais na argamassadeira

A moldagem foi feita usando-se fôrmas metálicas cúbicas (Figura 6.4) com arestas de 7,5 cm, sendo moldados três corpos-de-prova de cada mistura para ensaio de compressão axial. O lançamento das misturas foi feito com o auxílio de uma colher de pedreiro e uma espátula, distribuindo-se em três camadas, adensadas com 10 golpes com a própria espátula e 10 golpes com soquete metálico cilíndrico com diâmetro de 2,54 cm e 2 kg de massa.



Figura 6.4: Moldagem dos corpos-de-prova cúbicos

Ainda que tenham sido adequados, o uso destes dois instrumentos e dos procedimentos anteriormente relatados não evitou uma pequena incorporação de bolhas de ar ao concreto, identificadas posteriormente por meio da análise do aspecto visual dos compósitos já endurecidos quando do corte dos corpos-de-prova em seção axial e diametral.

O adensamento mecânico por meio da mesa vibratória mostrou-se inadequado provocando a segregação da mistura trazendo os grãos para a superfície superior da fôrma sendo, portanto, evitado o seu uso.

6.4.2 Procedimento de cura

Todos os corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos foram desmoldados com 1 dia de idade e imediatamente encaminhados para uma câmara úmida, iniciando-se sua imersão total em água em temperatura ambiente por 3 dias, seguida de cura ambiente até a estabilização da massa.

6.4.3 Corpos-de-prova cilíndricos

Após os ensaios realizados com os corpos-de-prova cúbicos, foram selecionadas três (03) misturas para os ensaios definitivos. Desta forma, foram moldados duas (02) misturas da Série A (com areia), a saber, P6 e P10 e uma da Série B (sem areia), P22.

Em ambos os casos, foram mantidos os traços iniciais, sem ajustes. Destas séries foram ensaiados corpos-de-prova cilíndricos para determinar a resistência à compressão axial e diametral e determinação do módulo de elasticidade secante além de executar vigas prismáticas para ensaio de resistência à tração na flexão. Todos estes ensaios foram realizados com as idades de 7 e 28 dias.

As misturas dos materiais para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos foram executadas em betoneira, seguindo-se a mesma seqüência de lançamento dos materiais e tempos adequados para o recobrimento completo dos agregados pela pasta de cimento e areia e desta sobre o GRAP, até se obter uma mistura homogênea de todos os componentes.

A moldagem foi feita usando fôrmas metálicas cilíndricas, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm (Figura 6.5), sendo moldados 4 corpos-de-prova de cada mistura para cada ensaio, acima descrito.

O lançamento das misturas foi feito com o auxílio de uma colher de pedreiro, distribuindo-se em três camadas, adensadas com golpes 10 golpes com soquete metálico.



Figura 6.5: moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos

Durante o adensamento, seguiu-se os mesmos procedimentos descritos no item 6.3.1; no entanto, a mesa vibratória foi utilizada entre 30 a 40 segundos até que se percebesse visualmente que não havia mais bolhas de ar na superfície do corpo-de-prova e que os grãos não estavam aflorando na superfície ou mesmo saltando para fora da fôrma, como foi o caso da mistura P10, rica em grãos de polipropileno (Figuras 6.6 a 6.8).



Figura 6.6: Corpos-de-prova cilíndricos da Série A, tipo P6.



Figura 6.7: Corpos-de-prova cilíndricos da Série A, tipo P10.



Figura 6.8: Corpos-de-prova cilíndricos da Série B, tipo P22.



Figura 6.9: Vigas prismáticas tipo P6, P10 e P22

6.5 Equipamentos

Os seguintes equipamentos foram empregados para a realização dos ensaios:

- Agitador mecânico de peneiras marca Soiltest;
- Álcool anidro;
- Amassadeira de panificadora marca Perfecta Curitiba, com capacidade de 40 litros;
- Balança analítica marca Marte, com sensibilidade de 0,01 gramas;
- Frasco de Chapmam;
- Diversos tipos de Beckers, pipetas, funis e recipientes diversos;
- Moldes de corpos-de-prova, de aço, cúbicos (75 mm);
- Moldes de corpos-de-prova, de aço, cilíndricos, 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura;
- Peneiras da série normal;
- Prensa hidráulica Soiltest (capacidade: 120 t)
- Máquina Universal de Ensaio WPM (capacidade: 40 t)
- Prensa hidráulica Versatester (capacidade: 15 t)
- Recipientes diversos;

- Soquetes metálicos para a moldagem dos corpos-de-prova;
- Utensílios diversos (espátulas, régua, colher de pedreiro, desempenadeiras, etc);
- Óleo e cera para lubrificar e calafetar as paredes internas dos corpos-de-prova;
- Aparelho coletor de dados tensão-deformação (módulo de elasticidade secante);
- Microcomputador com software aplicativo para a coleta e tratamento dos dados do ensaio de módulo de elasticidade secante e,
- Equipamentos de proteção individual (EPI's).

6.6 Métodos de Ensaio

6.6.1 Determinação da composição granulométrica

Este ensaio foi realizado seguindo a Norma NBR 7217:87, a qual estabelece limites granulométricos para o agregado miúdo e graúdo em função das porcentagens retidas acumuladas na série de peneiras normal ou intermediária (Figura 6.10) e por meio do cálculo do módulo de finura.



Figura 6.10: Peneiras para os ensaios de granulometria

6.6.2 Massa específica aparente

O método empregado para a determinação da massa específica aparente dos grãos de polipropileno aglutinado por meio do frasco de Chapman (NBR 9776:87) consistiu na introdução de uma quantidade com massa previamente conhecida destes grãos de plástico no interior do frasco de Chapman (Figura 6.11), contendo um volume conhecido de água (200 ml) medindo-se o volume de água deslocado e calculando-se a massa específica aparente.

Este procedimento teve duas adaptações. A primeira adaptação pelo fato de que este tipo de plástico tem densidade inferior à da água e para que não flutuassem sem provocar o deslocamento da água e impossibilitando qualquer medição, foi utilizado o álcool como fluido até a marca de 300 ml.

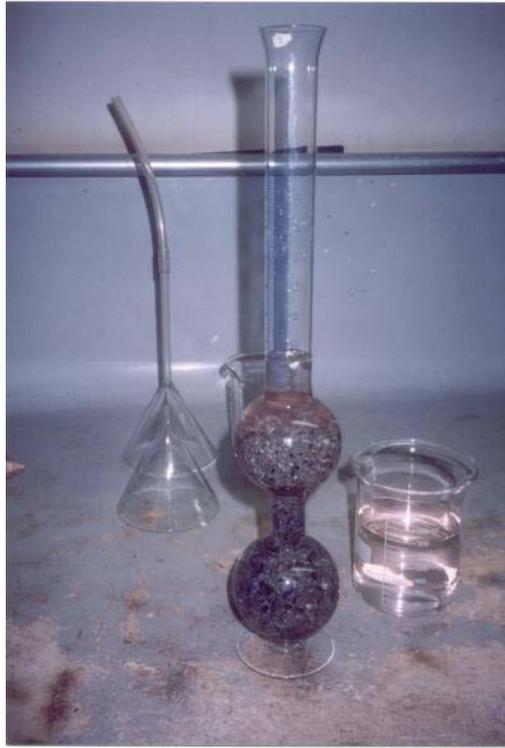


Figura 6.11: Frasco de Chapman

Tal medida foi necessária pelo fato do álcool apresentar densidade de $0,78 \text{ g/cm}^3$ sendo, portanto, menor do que a dos grãos de plástico, permitindo assim o ensaio por meio da imersão dos grãos, deslocamento do fluido e leitura do volume deslocado.

A segunda adaptação deve-se ao fato de que os grãos foram secos no ambiente e não em estufa, para que não ocorresse o risco de alterações físico-químicas em razão da temperatura.

Depois foi anotado o deslocamento do nível de álcool no tubo graduado do frasco e com estes dados foi determinada a massa específica aparente deste material através da relação entre a massa do mesmo seco e o volume resultante da diferença entre o volume final e o inicial de 300 ml.

6.6.3 Determinação da massa unitária

Atendendo a Norma NBR 7251:82, a massa unitária dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado foi determinada colocando-os em um recipiente de metal em forma de paralelepípedo (volume 15dm^3 e tara de $9,450\text{kg}$) para se determinar a massa deste material. Em seguida, Assim, com a relação massa/volume foi obtida a massa unitária deste material.

6.6.4 Resistência à compressão axial

Este ensaio foi realizado seguindo-se a NBR 7215:96. Os materiais do concreto foram misturados na mesma argamassadeira citada no item 3.3, antes de serem moldados os corpos-de-prova. Os moldes foram untados anteriormente com uma camada de óleo para facilitar a desmoldagem dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram capeados com uma mistura de enxofre para regularização da superfície dos mesmos para que ocorresse a melhor distribuição da carga aplicada, sendo depois ensaiados em prensa hidráulica para determinação da carga de ruptura (Figura 6.12).



Figura 6.12: Determinação das resistências à compressão diametral e axial

6.6.5 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 7222:94, que consiste em aplicar uma carga na direção transversal do corpo-de-prova (geratriz), distribuindo a carga por meio de uma talisca de madeira com 1 cm de seção transversal e comprimento do corpo-de-prova, neste caso, 10 cm. Foi utilizada uma talisca de madeira macia (pinus) porque as taliscas deviam ter uma resistência menor do que os corpos-de-prova ensaiados. Esta carga produz uma ruptura diametral do corpo-de-prova o que caracteriza como uma ruptura por tração.

6.6.6 Resistência à tração na flexão

Ensaio realizado com base na norma NBR 12142:92, através da aplicação de carga no centro da superfície superior de uma barra prismática com dimensões de (7,5 x 7,5 x 24,5) cm,

respectivamente, altura, largura e comprimento. Esta carga é transmitida à barra através de dois cutelos localizados nos terços médios da barra simplesmente apoiada (Figura 6.13).

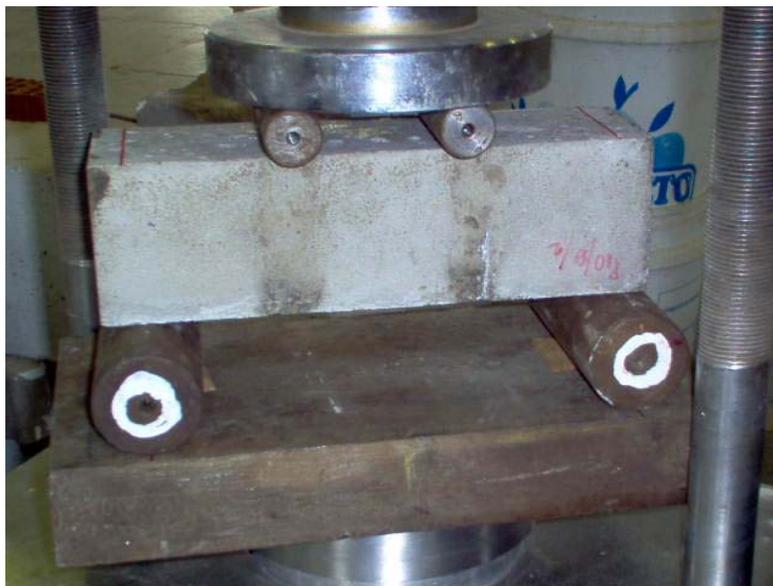


Figura 6.13: Determinação da resistência à flexão

6.6.7 Determinação do módulo de elasticidade secante

Orientado pela Norma NBR 8522:03, este ensaio foi realizado para determinar o módulo de elasticidade secante do concreto para uma análise comparativa entre os traços com e sem adição de grãos de polipropileno aglutinado reciclado testados neste trabalho.

No ensaio não foram utilizados extensômetros elétricos (strain gages) e sim um equipamento desenvolvido no laboratório da FEC, constituindo-se em um medidor-comparador de tensão-deformação.

A utilização do aparelho eliminou a necessidade de preparação das superfícies laterais do corpo-de-prova para instalação e fixação dos calibradores coletores de dados, os quais fixam-se às superfícies por meio de pinos pressionados por rosqueamento.

Os calibradores foram soldados em cabos elétricos (Figura 6.14) para conectá-los a um coletor de dados, o qual fornece a carga em kgf e a deformação específica em milímetros por mil (‰) durante o ensaio para, posteriormente, serem traçados os gráficos tensão x deformação e obter-se o módulo de elasticidade secante. A aplicação de carga foi constante até a ruptura dos corpos-de-prova ensaiados.



Figura 6.14: Instrumentação para o ensaio do módulo de elasticidade secante

7 RESULTADOS

7.1 Caracterização do grão reciclado aglutinado de polipropileno (GRAP).

A Tabela 7.1 apresenta os resultados do ensaio de granulometria dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno e da determinação das massas específica e unitária deste material.

Tabela 7.1: Distribuição granulométrica do GRAP

Peneira (mm)	% retida acumulada
9,5	0,0
6,4	66
4,8	87
2,4	96
1,2	98
0,6	99
0,3	99
0,15	99
Fundo	100,00
Dimensão máxima característica (mm)	9,50
Massa Específica (g/cm³)	0,93
Massa Unitária (g/cm³)	0,34
Módulo de Finura	5,81

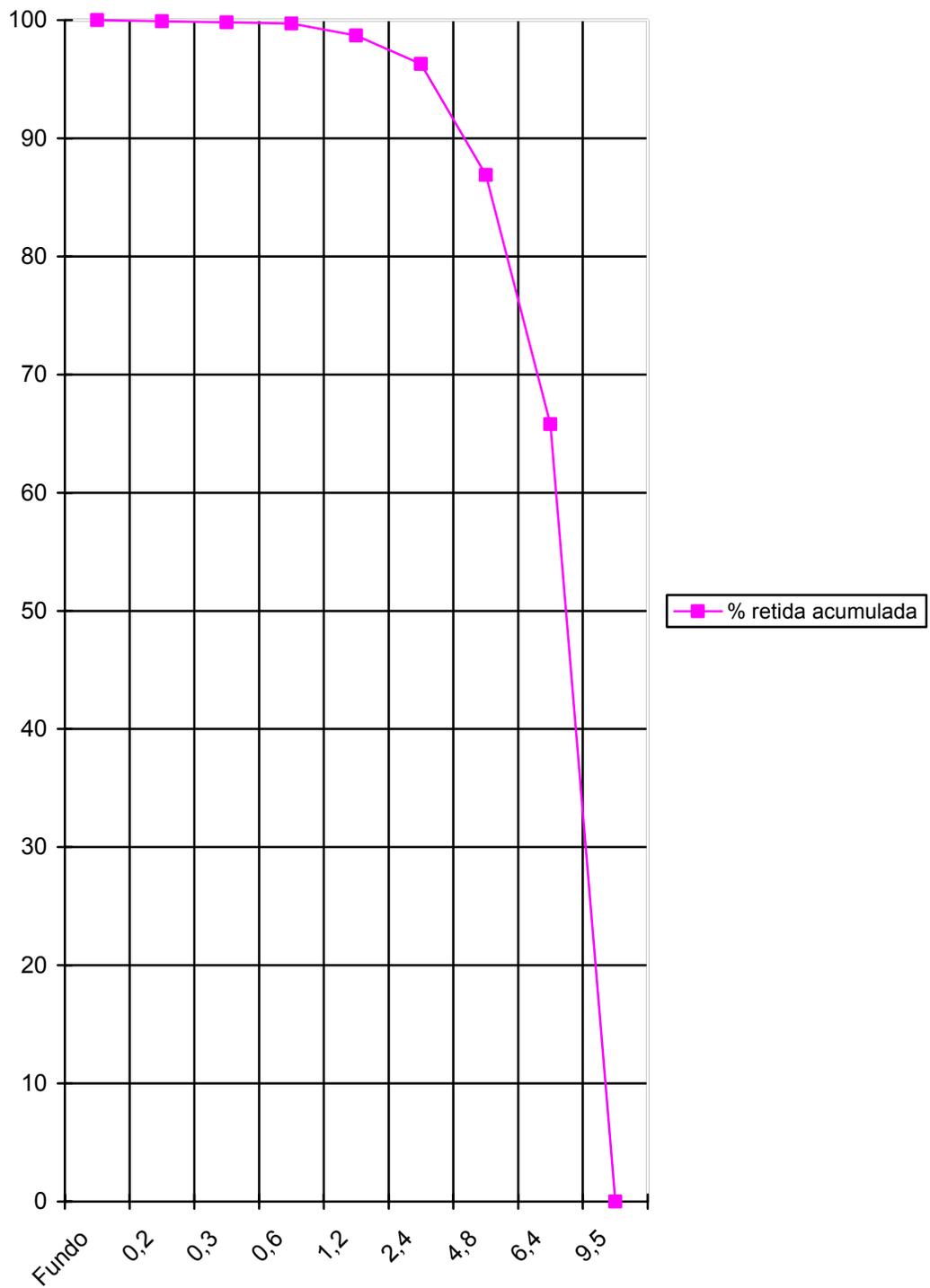


Figura 7.1: Curva granulométrica dos grãos de polipropileno

7.2 Caracterização da areia utilizada na execução do concreto

A Tabela 7.2 apresenta os resultados do ensaio de granulometria da areia e da determinação das massas específicas e unitária deste material.

Tabela 7.2: Distribuição granulométrica da areia

Peneira (mm)	% retida acumulada
2,4	0
1,2	18
0,6	54
0,3	85
0,15	97
Fundo	100
Dimensão máxima característica (mm)	2,4
Massa Específica (g/cm³)	2,62
Massa Unitária (g/cm³)	1,39
Módulo de Finura	(Areia fina) 1,57

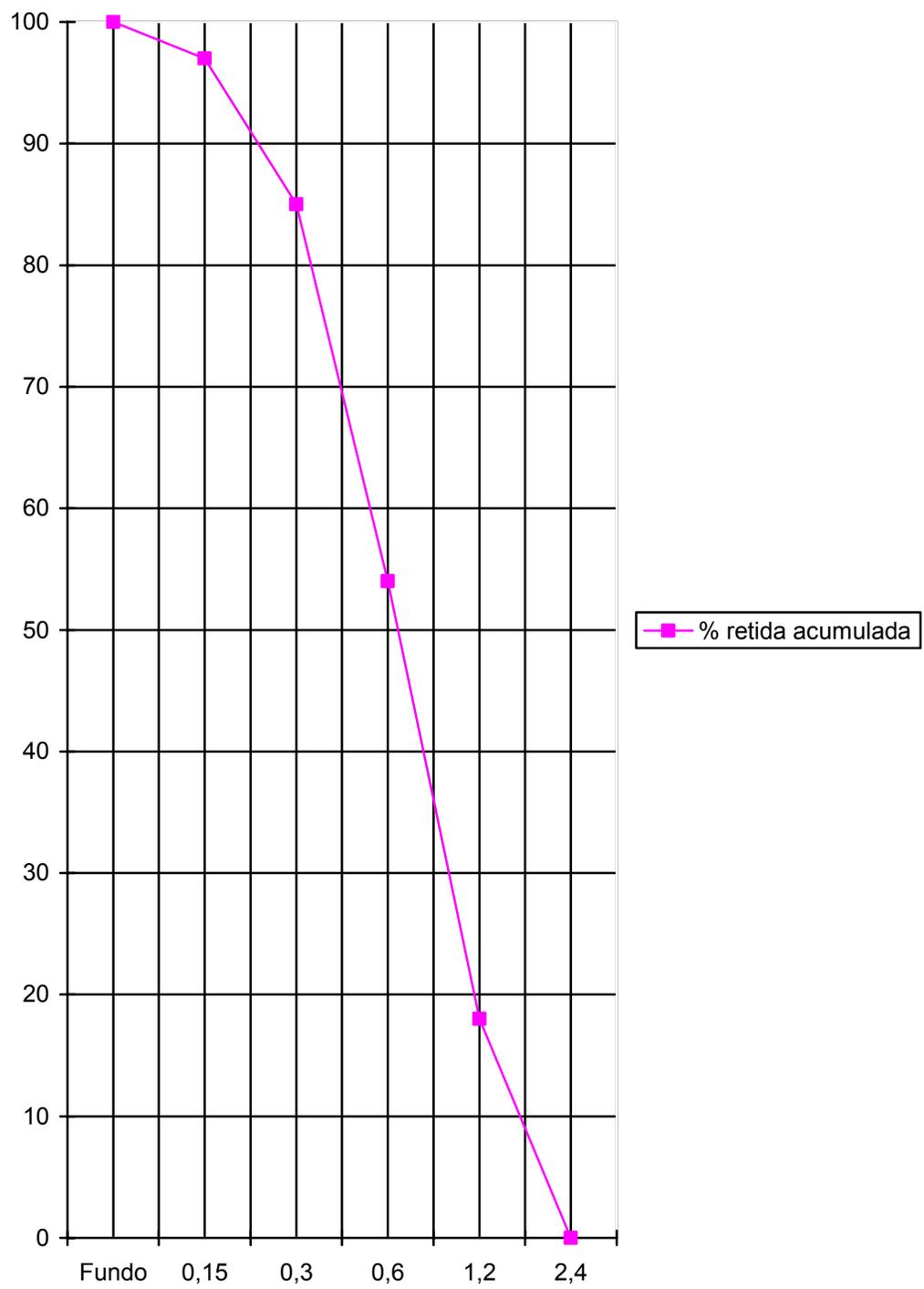


Figura 7.2: Curva granulométrica da areia

7.3 Resistência à Compressão Axial: corpos-de-prova cúbicos

As Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização dos compósitos quanto à resistência à compressão axial e à massa específica.

As misturas P8 a P20 foram descartadas da Série A de ensaios em razão da pouca quantidade de pasta de cimento. A mistura P10 foi adensada manualmente com espátula, sem mesa vibratória e imerso em água por 7 dias. Apresentou significativa melhora nos resultados.

No entanto, estes resultados não foram alcançados quando das moldagens dos corpos-de-prova cilíndricos. Esta mistura P10 tem a aparência de *concreto poroso*, ou seja, um concreto leve, com pasta suficiente apenas para recobrir os agregados mineralizando-os e auferindo aderência.

A mistura P23, com traço 1: 0,5: 0,30 + 1% Glenium e 100% de agregado plástico foi moldada em 3 tentativas, para que pudesse originar um concreto poroso nesta série sem agregados minerais e, no entanto, não foi obtido sucesso, pois não havia pasta suficiente na mistura devido ao grande volume de grãos a serem recobertos.

No entanto, observou-se que os grãos após a secagem estavam mineralizados pela pasta que os recobria e que, desta forma, poderiam ser aproveitados como grãos mineralizados para utilização em concretos, sugerindo-se pesquisa nesta abordagem para trabalhos futuros.

Concluída a fase experimental das dosagens, foram selecionadas as misturas P6, P10 e P22, que apresentaram os resultados no limite das possibilidades dos traços padronizados em cada mistura.

Tabela 7.3: Resultados dos ensaios das Séries A e B, aos 14 dias, CP's cúbicos

Série	Mistura	Traço em massa					% de substituição da areia pelo GRAP	Massa específica (Kg/m ³)	f _{c14} (MPa)
		cim	areia	GRAP	a/c	aditivo			
Referência	P0	1,00	0,20	-	0,30	0,01	0	2329	90
Série A	1	1,00	0,19	0,01	0,30	0,01	5	2206	69
	2	1,00	0,18	0,02	0,30	0,01	10	2091	45
	3	1,00	0,17	0,03	0,30	0,01	15	1962	39
	4	1,00	0,16	0,04	0,30	0,01	20	1921	37
	5	1,00	0,15	0,05	0,30	0,01	25	1832	34
	6	1,00	0,14	0,06	0,30	0,01	30	1752	30
	7	1,00	0,13	0,07	0,30	0,01	35	1632	24
	10	1,00	0,10	0,10	0,30	0,01	50	1365	11
Série B	21	1,00	-	0,30	0,30	0,01	100	1587	36
	22	1,00	-	0,40	0,30	0,01	100	1533	28

Tabela 7.4: Resumo das resistências e da massa específica dos CP's cúbicos

Misturas		Resistência à compressão axial (MPa)	Massa específica (g/cm ³)	Redução de massa específica (%)	Redução da resistência (%)
Referência	P0	89,97	2,33	-	-
Série A	P1	68,93	2,21	5,3	23,4
	P2	45,28	2,09	10,6	49,7
	P3	39,24	1,96	15,8	56,4
	P4	37,24	1,92	17,6	58,5
	P5	34,19	1,83	21,3	62,0
	P6	29,51	1,75	24,8	67,2
	P7	24,24	1,63	30,0	73,1
	P10	11,26	1,37	41,5	87,5
Série B	P21	36,00	1,59	31,9	60,0
	P22	28,15	1,53	34,2	68,7

7.4 Resistência à Compressão Axial: corpos-de-prova cilíndricos

A Tabela 7.5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas P6, P10 e P22, incluindo o referência (P0).

Tabela 7.5: Resultados: resistência à compressão axial

Resistência à compressão axial (MPa)		
Misturas	Idades (dias)	
	07	28
P0	88,75	89,97
P6	31,65	31,96
P10	6,87	7,55
P22	18,52	19,02

7.5 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 7.6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas P6, P10 e P22, incluindo o referência (P0).

Tabela 7.6: Resultados: resistência à compressão diametral

Resistência à compressão diametral (MPa)		
Misturas	Idades (dias)	
	07	28
P0	5,80	6,00
P6	3,40	3,90
P10	1,50	1,56

7.6 Resistência à tração na flexão (módulo de ruptura)

A Tabela 7.7 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas P6, P10 e P22, incluindo o referência (P0).

Tabela 7.7: Resultados: resistência à tração na flexão

Resistência à tração na flexão (MPa)		
Misturas	Idades (dias)	
	07	28
P0	5,10	5,69
P6	4,90	5,59
P10	2,06	2,16
P22	3,14	3,15

7.7 Módulo de elasticidade secante: deformação estática

A Tabela 7.8 apresenta os resultados do ensaio para a determinação do módulo de deformação estática - módulo de elasticidade secante, dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas P6, P10 e P22, incluindo o referência (P0).

Tabela 7.8: Resultados: módulo de elasticidade secante

Módulo de elasticidade secante (GPa)		
Misturas	Idades (dias)	
	07	28
P0	23,23	58,63
P6	13,29	48,74
P10	2,45	3,03
P22	6,69	14,87

Os diagramas tensão-deformação são obtidos em ensaio à compressão axial de um corpo de prova cilíndrico com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para concretos de diferentes resistências e idades. Consistem de um trecho inicial relativamente reto, correspondendo a um comportamento elástico do concreto para tensões baixas, onde a deformação é linearmente proporcional à tensão.

Depois o diagrama começa a curvar, passando por um ponto de máxima tensão, que corresponde à resistência do concreto à compressão na sua idade, apresentando no final um ramo decrescente.

A deformação de ruptura do concreto, ϵ_{cc} , está na maioria dos casos entre 0,3% e 0,6%. A deformação correspondente à tensão máxima é da ordem de 0,2%, como pode ser observado na Figura 7.8.

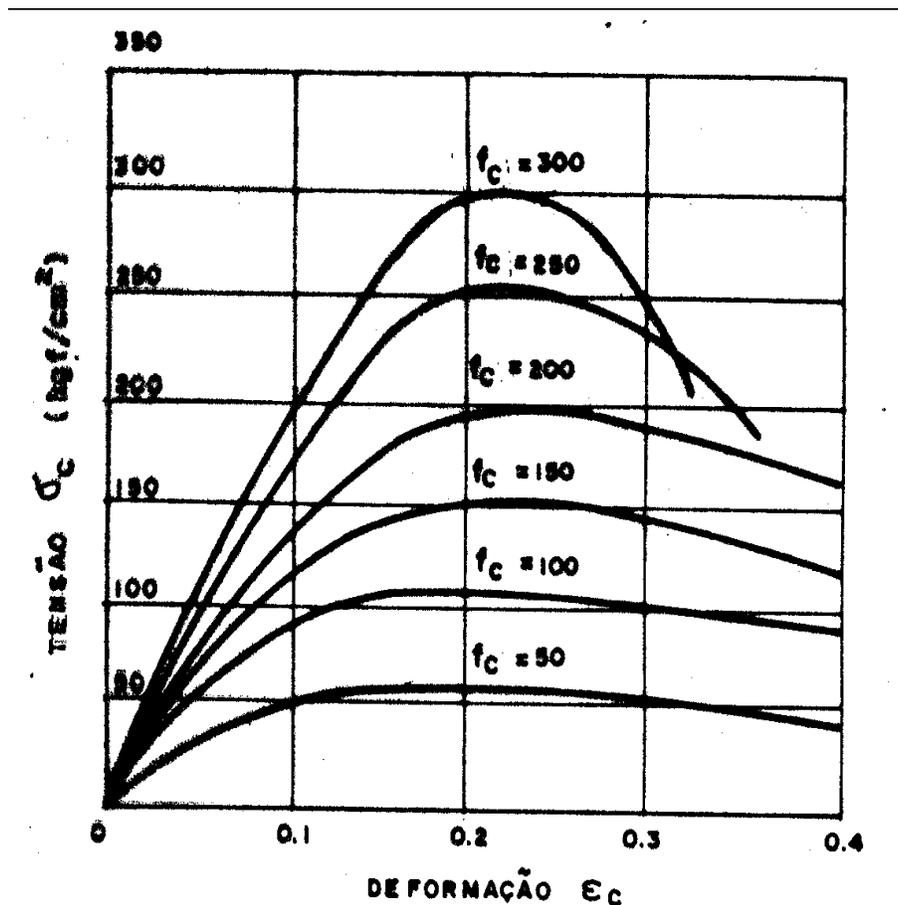


Figura 7.8: Diagrama tensão-deformação típico para o concreto

As figuras de 7.8-a até 7.8-j e de 7.8-k até 7.8-u apresentam os diagramas tensão-deformação representativos para as diversas misturas do compósito com GRAP respectivamente nas idades de 7 dias e 28 dias tendo sido rompidos 24 corpos-de-prova sendo 3 para cada mistura e idade.

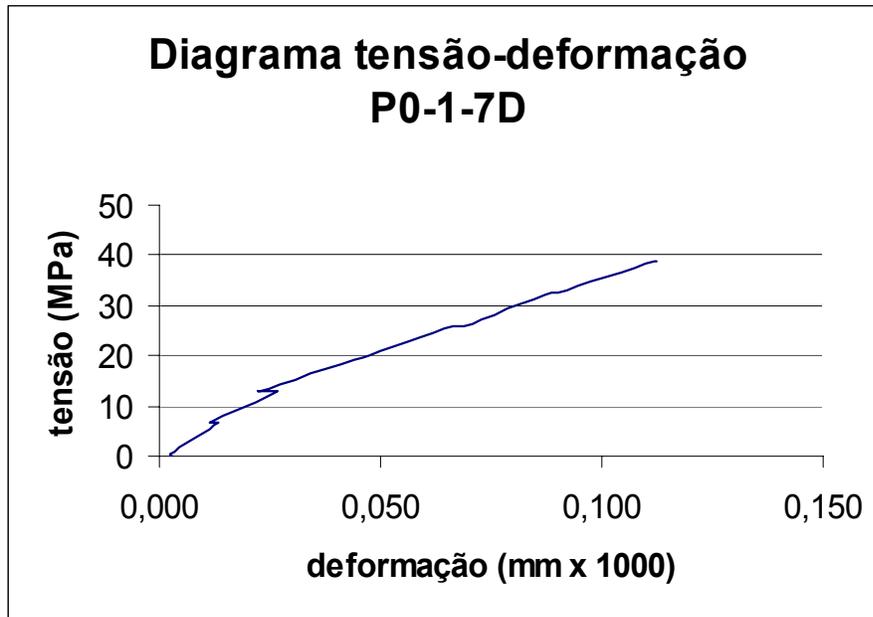


Figura 7.8-a: Gráfico tensão-deformação P0/1, 7 dias

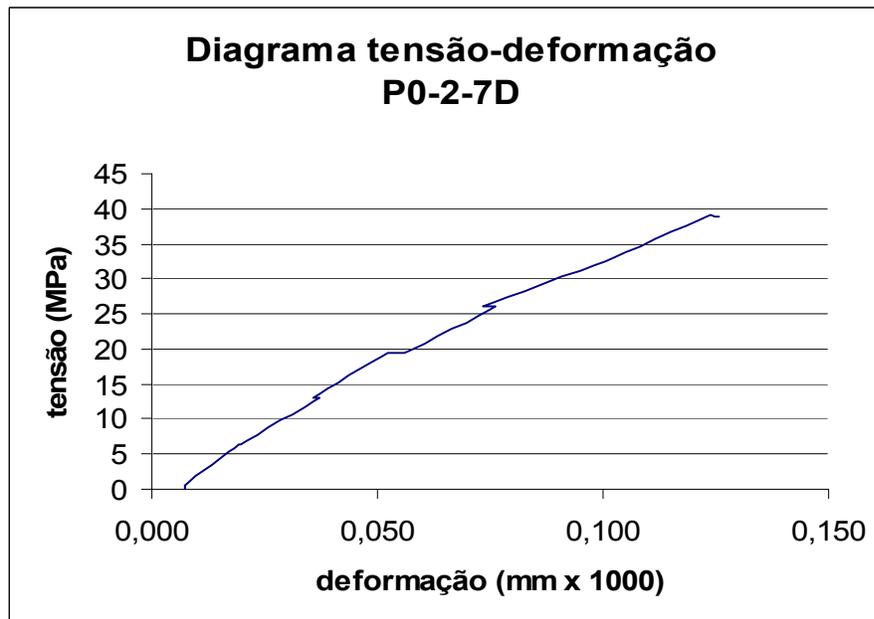


Figura 7.8-b: Gráfico tensão-deformação P0/2, 7 dias

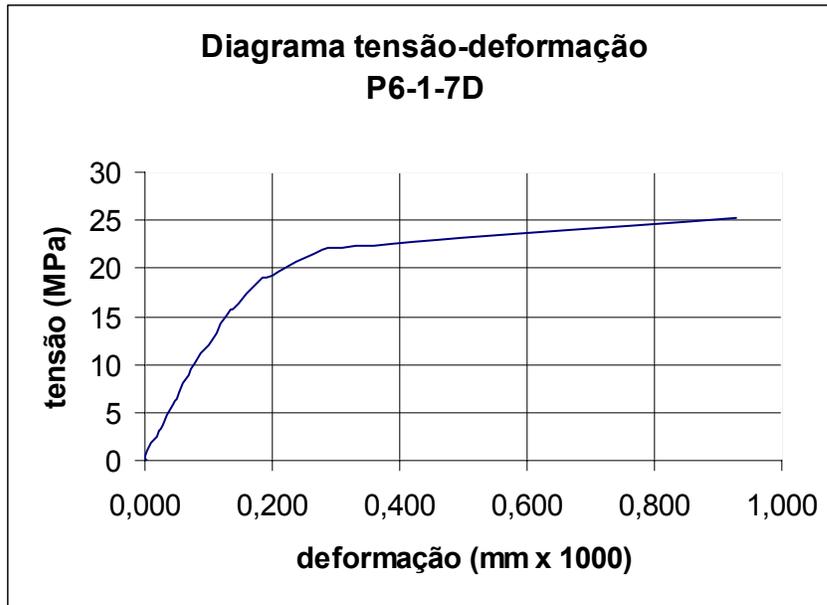


Figura 7.8-c: Gráfico tensão-deformação P6/1, 7 dias

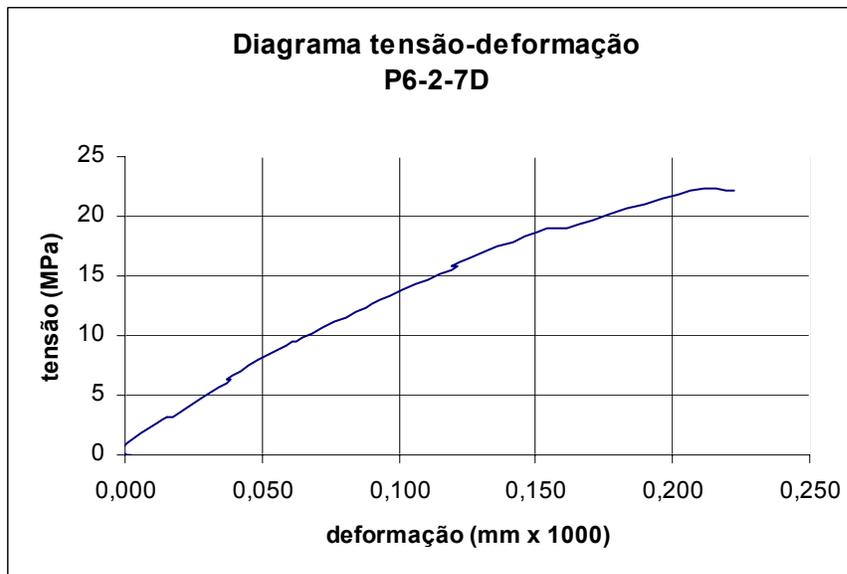


Figura 7.8-d: Gráfico tensão-deformação P6/2, 7 dias

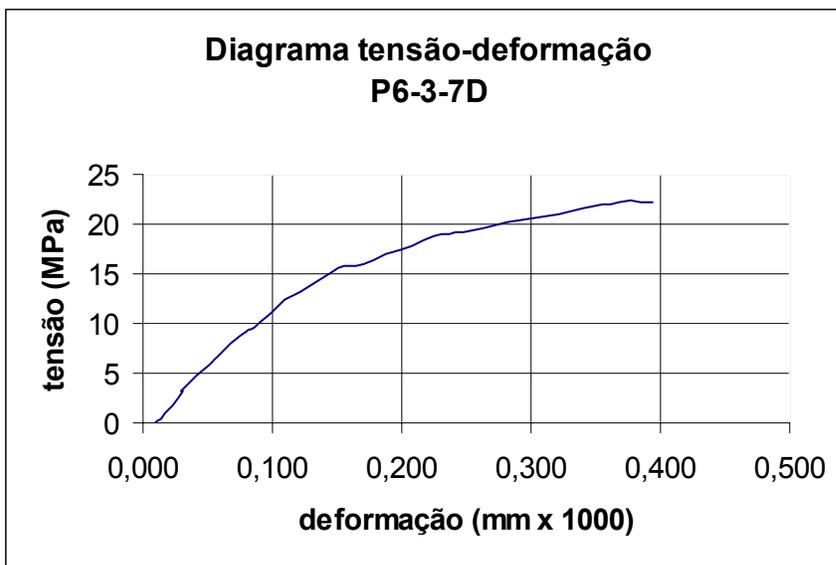


Figura 7.8-e: Gráfico tensão-deformação P6/3, 7 dias

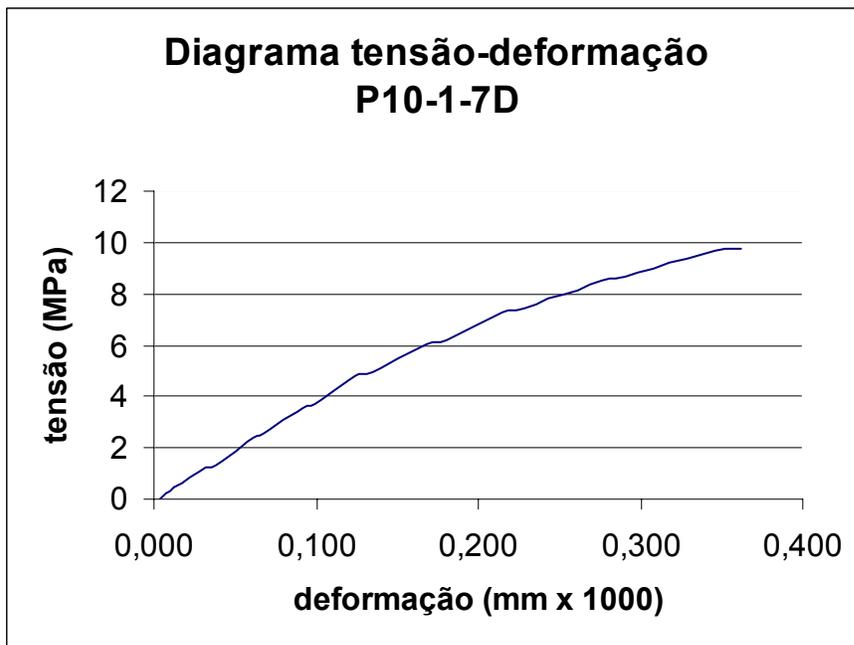


Figura 7.8-f: Gráfico tensão-deformação P10/1, 7 dias

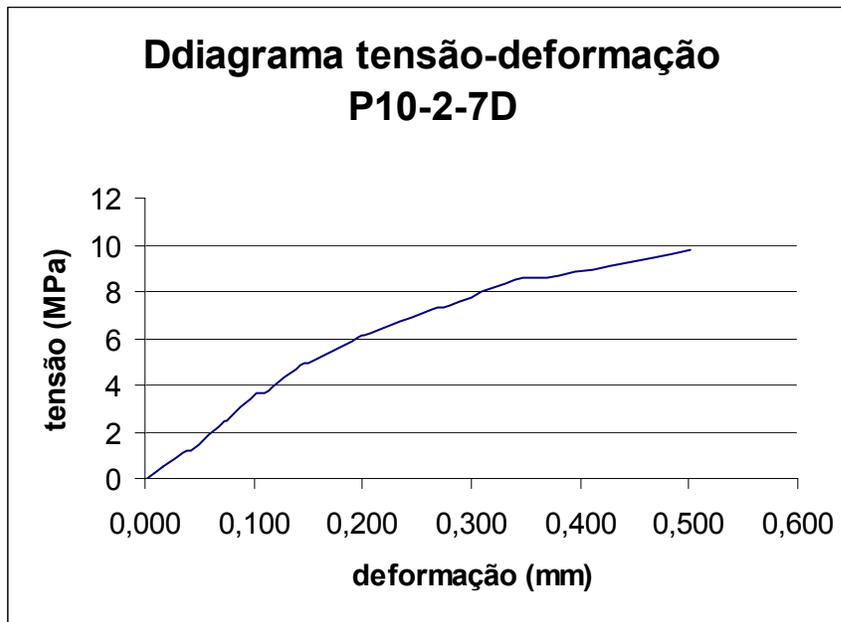


Figura 7.8-g: Gráfico tensão-deformação P0/2, 7 dias

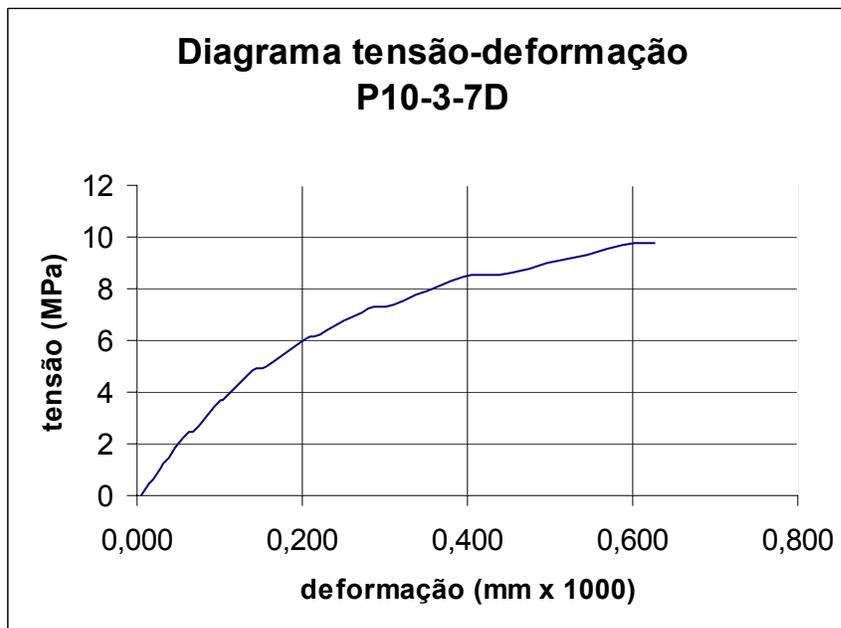


Figura 7.8-h: Gráfico tensão-deformação P0/3, 7 dias

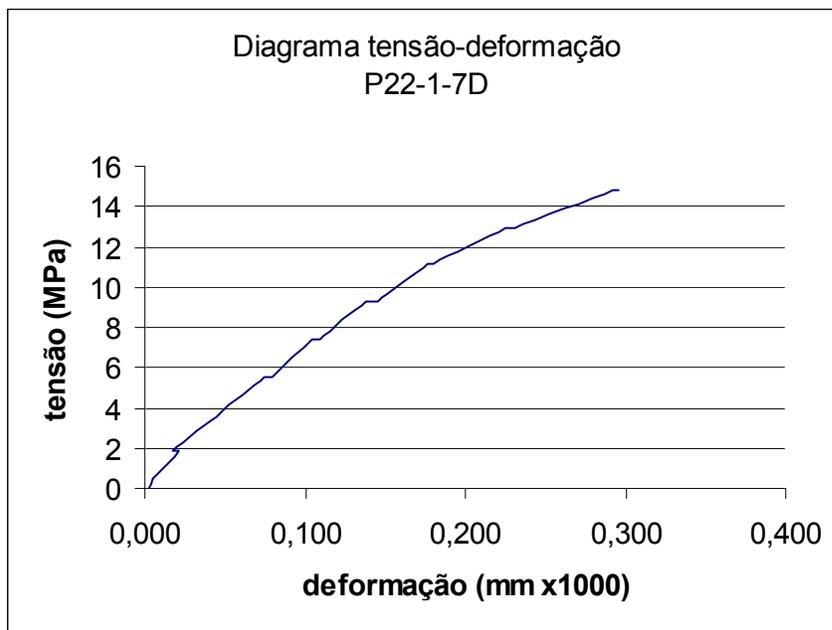


Figura 7.8-i: Gráfico tensão-deformação P22/1, 7 dias

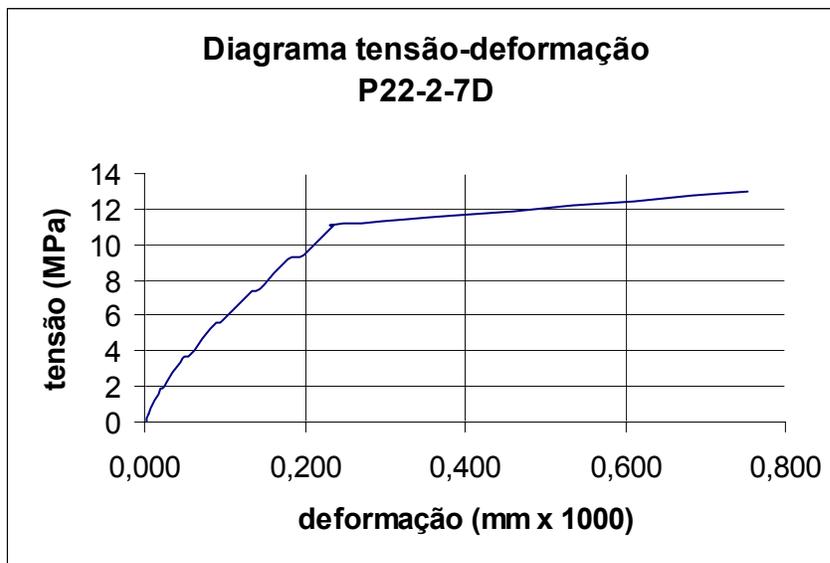


Figura 7.8-j: Gráfico tensão-deformação P22/2, 7 dias

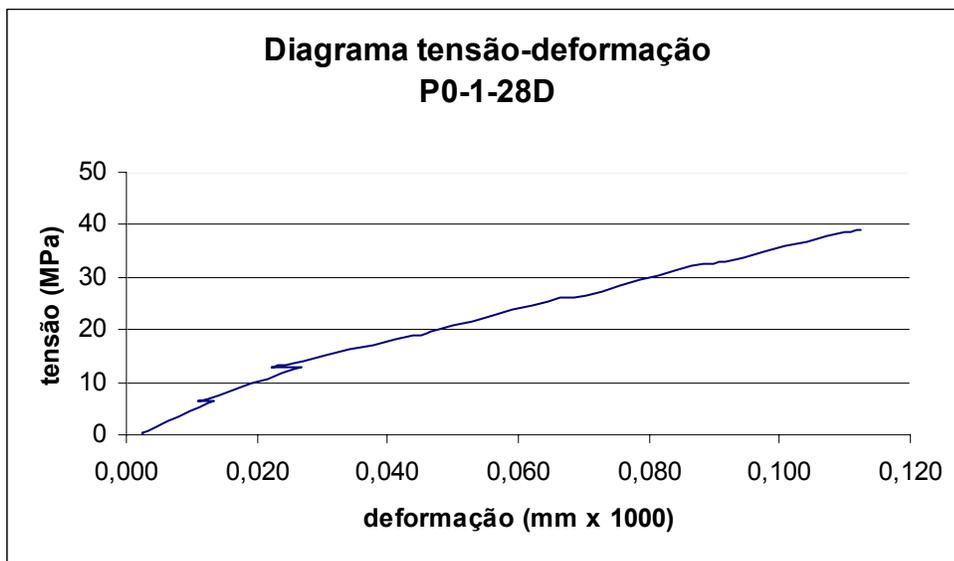


Figura 7.8-k: Gráfico tensão-deformação P0/1, 28 dias

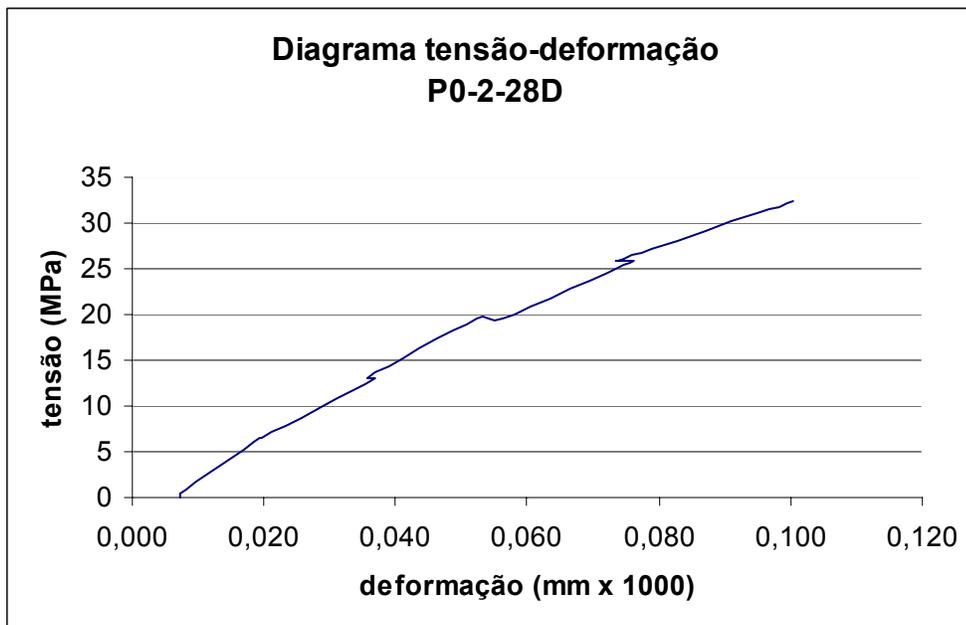


Figura 7.8-l: Gráfico tensão-deformação P0/2, 28 dias

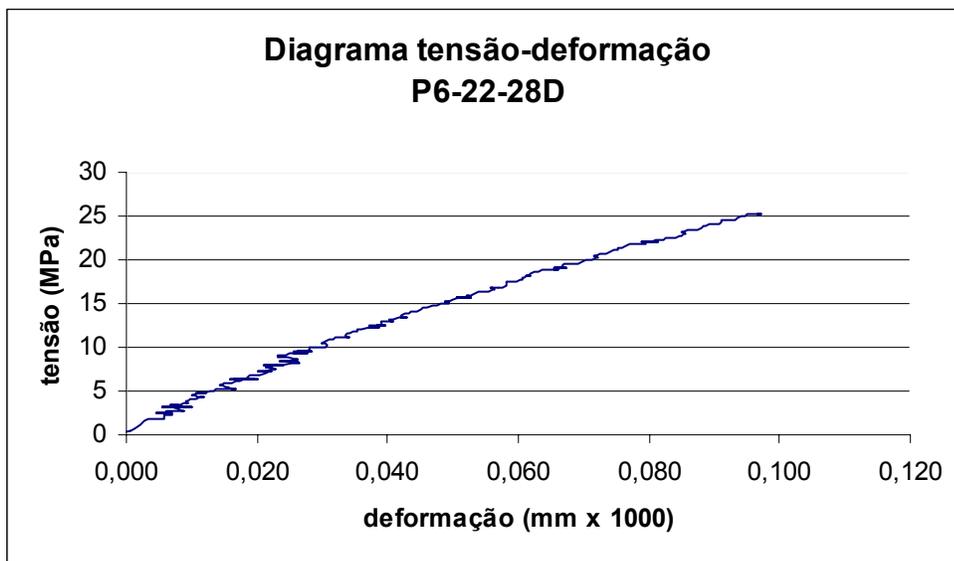


Figura 7.8-m: Gráfico tensão-deformação P6/22, 28 dias

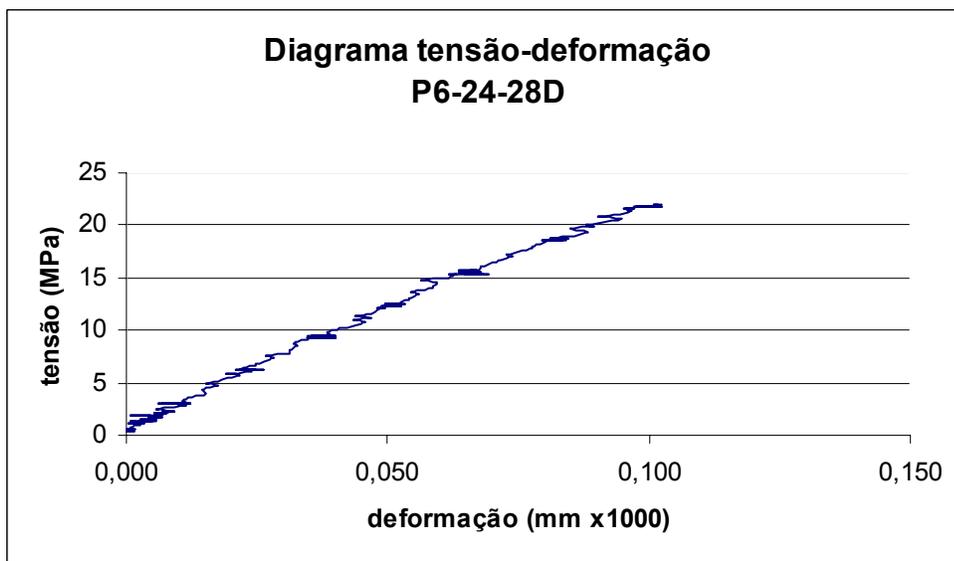


Figura 7.8-n: Gráfico tensão-deformação P6/24, 28 dias

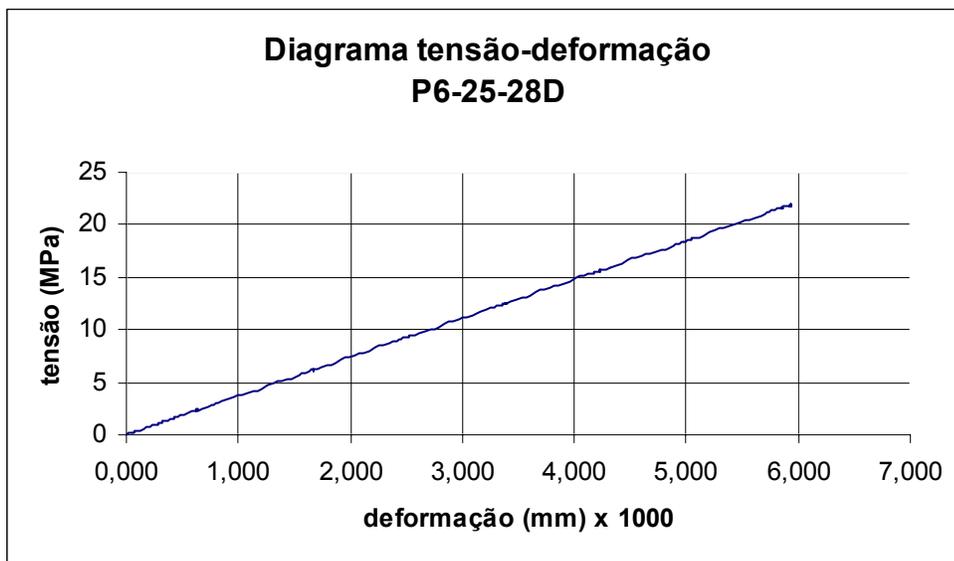


Figura 7.8-o: Gráfico tensão-deformação P6/25, 28 dias

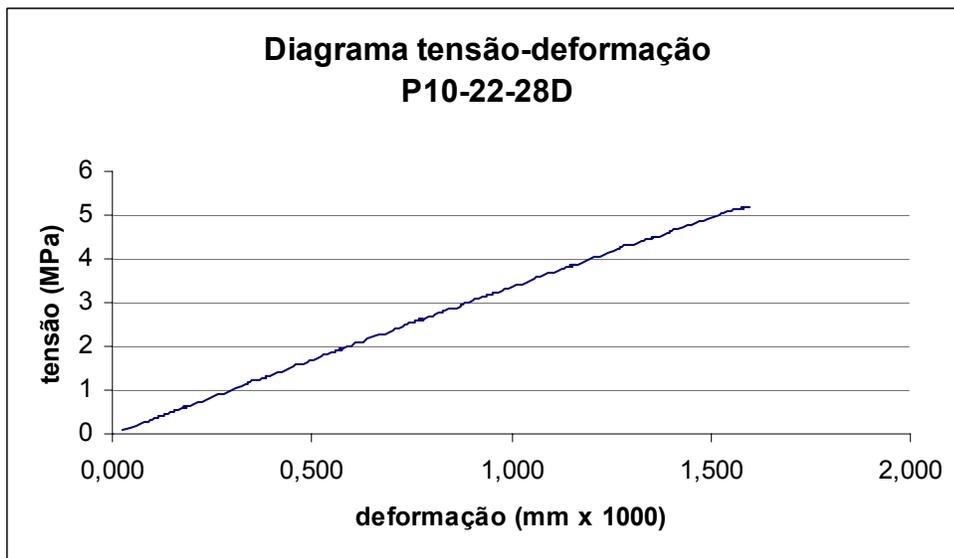


Figura 7.8-p: Gráfico tensão-deformação P10/22, 28 dias

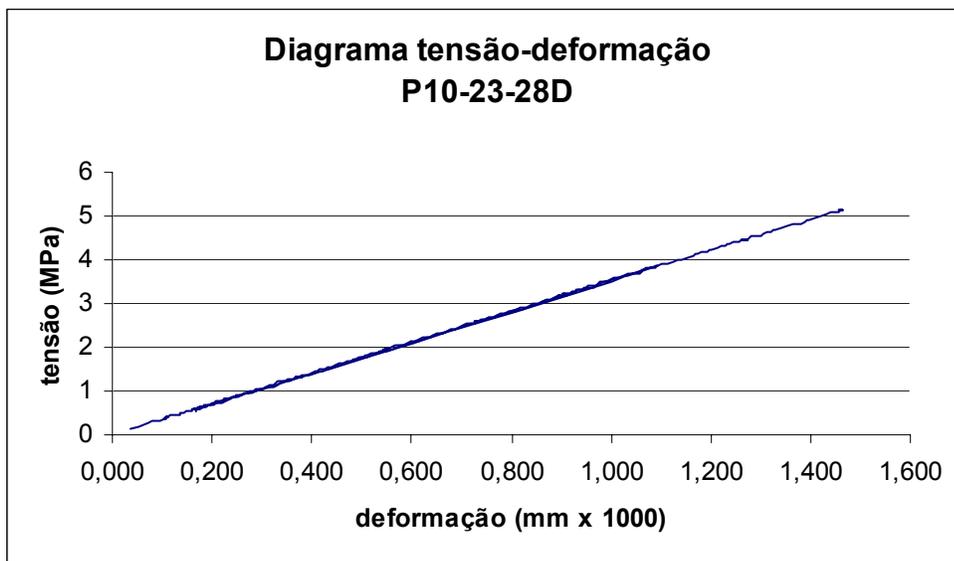


Figura 7.8-q: Gráfico tensão-deformação P10/23, 28 dias

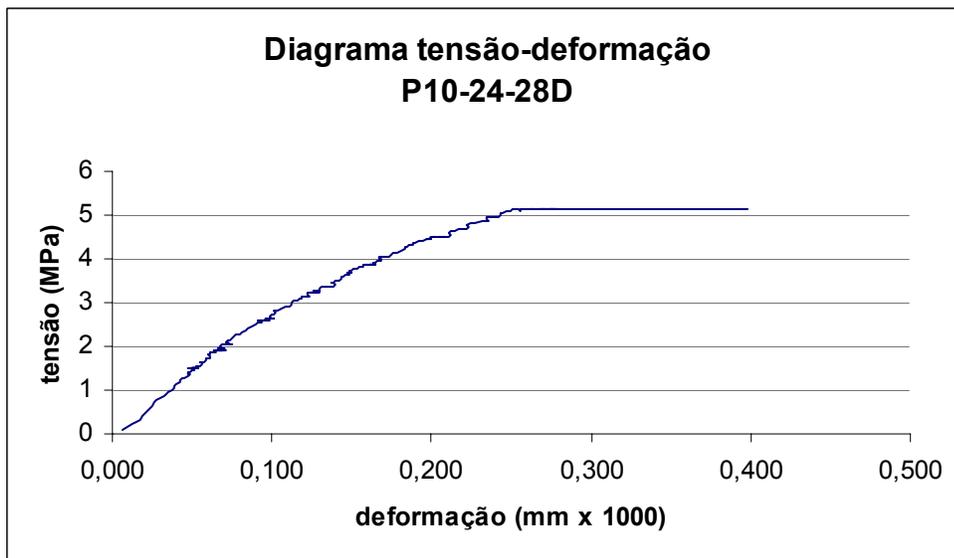


Figura 7.8-r: Gráfico tensão-deformação P10/24, 28 dias

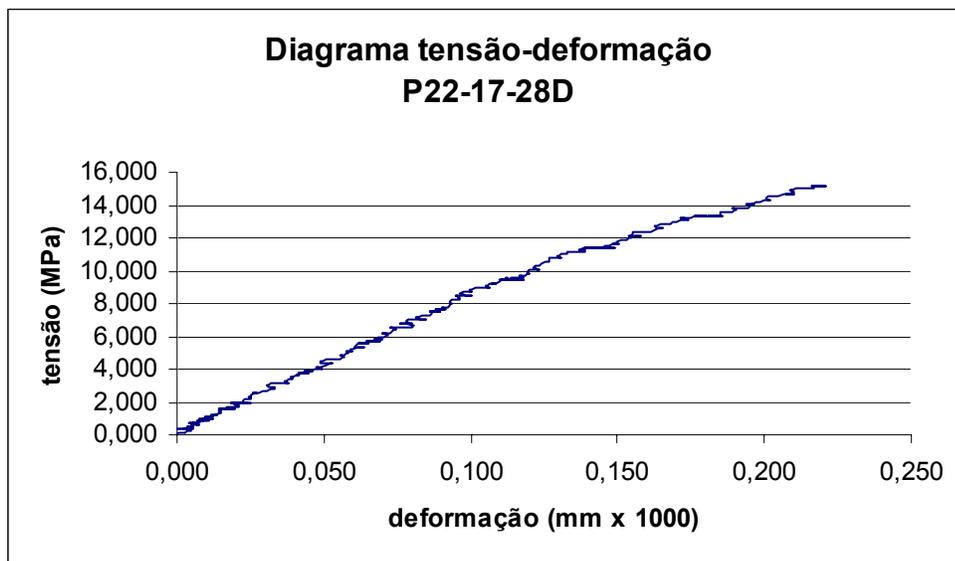


Figura 7.8-s: Gráfico tensão-deformação P22/17, 28 dias

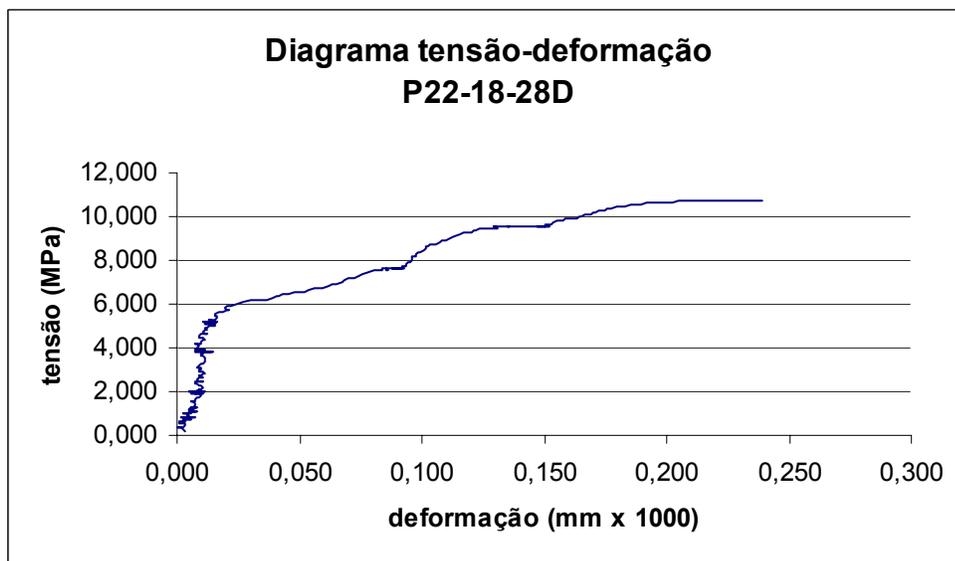


Figura 7.8-t: Gráfico tensão-deformação P22/18, 28 dias

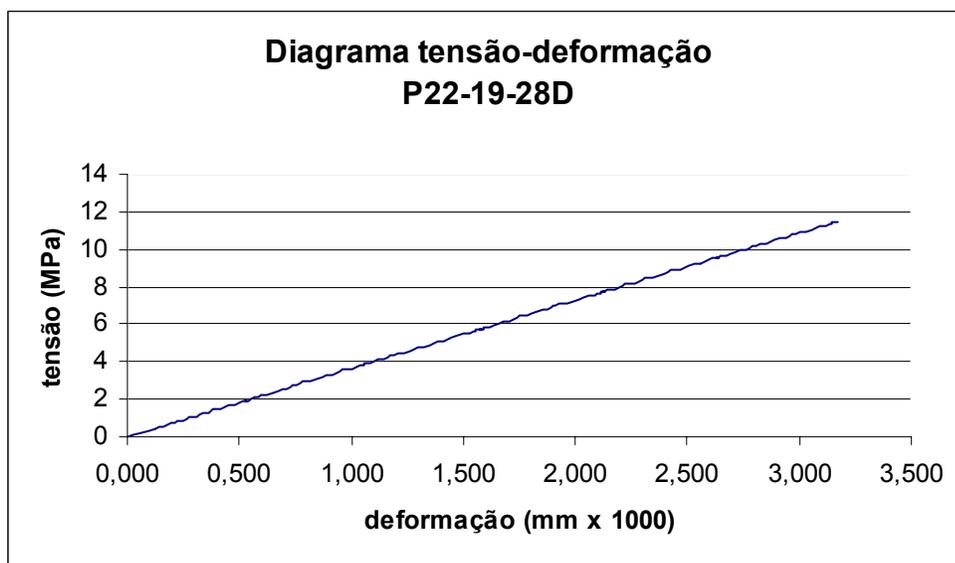


Figura 7.8-u: Gráfico tensão-deformação P22/19, 28 dias

Os cálculos referentes aos módulos de elasticidade constam no Anexo A e foram realizados por meio de planilha eletrônica nas quais estão indicadas as cargas (incremento), as quantidades de corpos-de-prova, as deformações para a tensão de 0,5 MPa, as deformações para o fator 0,4 da carga de ruptura, as médias das deformações e o resultado do módulo expresso em GPa.

7.8 Reduções de massa específica e de resistências

As Tabelas de 7.9 a 7.12 apresentam os resultados comparativos das porcentagens de reduções da massa específica dos compósitos resultantes obtidos por meio dos ensaios dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas P6, P10 e P22, em relação ao referência (P0), assim como a porcentagem de perdas relativas às resistências à compressão axial, diametral e do módulo de deformação estática (módulo de elasticidade secante).

Tabela 7.9: Análise relativa à resistência à compressão axial

Mistura	Massa específica (concreto) kg/m ³	Resistência à compressão axial (MPa)	% de Reduções relativas ao traço P0 aos 28 dias	
			(A) % de redução da massa específica	(B) % de perda de resistência à compressão axial
P-0	2329	89,97	-	-
P-6	1964	31,96	16	64,47
P10	1133	7,55	51	91,60
P-22	1584	19,02	32	78,86

Tabela 7.10: Análise relativa à resistência à compressão diametral

Mistura	Massa específica (concreto) kg/m ³	Resistência à compressão diametral (MPa)	% de Reduções relativas ao traço P0 aos 28 dias	
			(A) % de redução da massa específica	(B) % de perda de resistência à compressão diametral
P-0	2329	5,80	-	-
P-6	1964	3,90	15,67	32,76
P10	1133	1,56	51,35	73,10
P-22	1584	2,93	31,99	49,48

Tabela 7.11: Análise relativa à resistência à tração na flexão

Mistura	Massa específica (concreto) kg/m ³	Resistência à tração na flexão (MPa)	% de Reduções relativas ao traço P0 aos 28 dias	
			(A) % de redução da massa específica	(B) % de perda de resistência à flexão
P-0	2329	5,69	-	-
P-6	1964	5,59	15,67	1,76
P10	1133	2,16	51,35	62,04
P-22	1584	3,15	31,99	44,64

Tabela 7.12: Análise relativa ao módulo de elasticidade secante

Mistura	Massa específica (concreto) kg/m ³	Módulo de elasticidade (GPa)	% de Reduções relativas ao traço P0 aos 28 dias	
			(A) % de redução da massa específica	(B) % de perda do módulo de elasticidade secante
P-0	2329	58,63	-	-
P-6	1964	48,74	15,67	16,87
P10	1133	3,03	51,35	94,83
P-22	1584	14,87	31,99	74,64

7.9 Aspectos visuais

Neste item estão dispostas algumas imagens correspondentes aos cortes de seção transversal e diametral dos corpos-de-prova possibilitando a visualização da distribuição dos grãos de polipropileno no interior dos compósitos resultantes.

Os corpos-de-prova foram cortados axial e diametralmente e posteriormente digitalizados obtendo-se uma imagem no tamanho real dos mesmos.

Este procedimento, embora rudimentar, permite verificar que os grãos estão distribuídos uniformemente, sem a ocorrência de segregação ou concentração na parte superior dos corpos-de-prova, eliminando a hipótese de que, pelo fato de serem extremamente leves (0,93 g/cm³), não permaneceriam bem distribuídos nos compósitos endurecidos.

Além disto, estas imagens permitem verificar uma pequena ocorrência de vazios provavelmente decorrentes da energia do adensamento ou da vibração ou, ainda, pelo efeito de relaxação dos grãos que, por serem extremamente elásticos, tendem a retornar aos seus formatos originais após a sua compactação ou prensagem.

No entanto, é possível afirmar que ocorreu uma boa aderência entre a pasta e os grãos e que ambos contribuem mutuamente para o fechamento do pacote granulométrico.

Nas Figuras 7.9 a 7.12, apresentam-se as imagens destas peças cortadas e na Figura 7.13, apresenta-se uma imagem da seção diametral de um corpo-de-prova da mistura P10 rompido por meio do ensaio de resistência a compressão diametral.

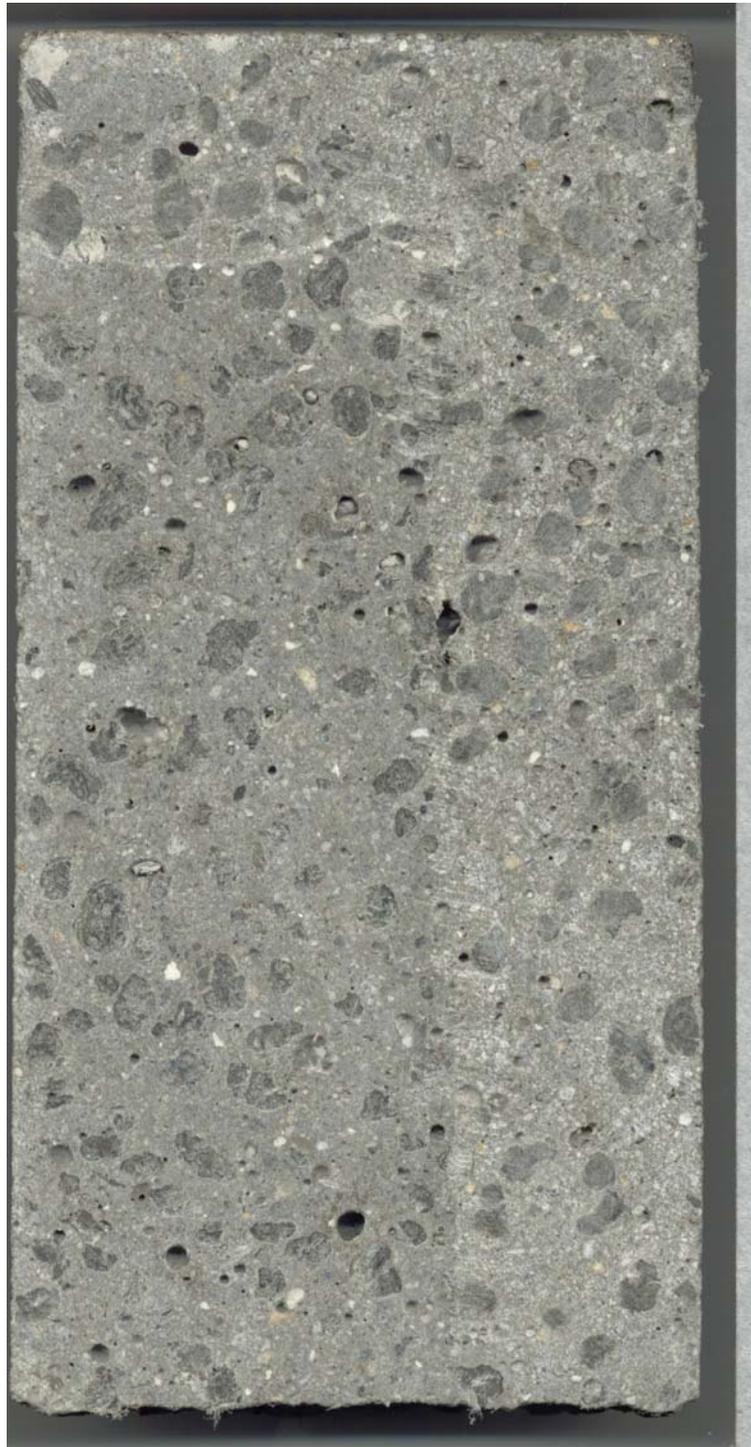


Figura 7.9: Corte de seção diametral do tipo P6.



Figura 7.10: Corte de seção transversal do tipo P6

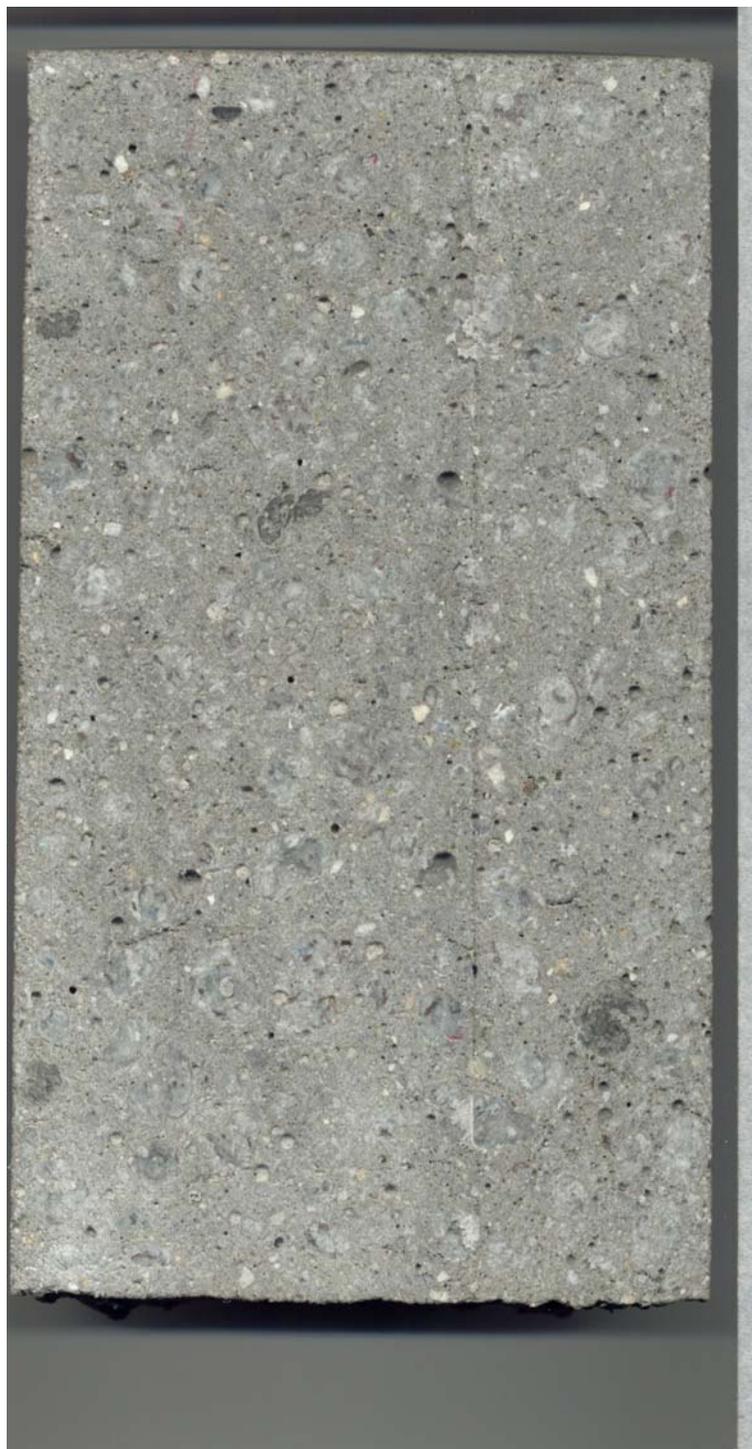


Figura 7.11: Corte de seção diametral do tipo P22



Figura 7.12: Corte de seção transversal do tipo P22



Figura 7.13: Seção diametral do tipo P10

Nota:

Esta imagem é de um dos corpos-de-prova após a realização de ensaio para a determinação de resistência à compressão diametral. Sofreu, portanto, deformações características do cisalhamento, mas possibilita visualizar a distribuição dos grãos de polipropileno no interior do compósito. Este é o compósito que corresponde ao que se atribuiu como sendo o compósito do tipo concreto poroso.

8 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste capítulo, são apresentadas as análises referentes ao comportamento dos compósitos relativas aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

8.1 Comportamento relativo à resistência à compressão Axial

Pôde-se constatar que a adição de maior quantidade de grãos reciclados aglutinados de polipropileno no concreto em todas as misturas e traços fez com que a resistência à compressão diminuísse consideravelmente nas adições iniciais de 5% e 10%, atingindo rapidamente cerca de 50% de redução da resistência à compressão axial.

Nas misturas seguintes, de P3 (cimento 1,00: areia 0,17: GRAP 0,03: água/cimento 0,30) a P-3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30) as reduções correspondentes a esta resistência foram inferiores a 10% (no intervalo), ou seja, houve uma desaceleração das reduções em função da substituição. As misturas deste intervalo permitiram atingir a resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, em valores que são suficientes, por exemplo, para atender (em algumas misturas, até superar) as especificações da Norma NBR 6136:94: bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural, a qual apresenta classes de resistências entre 4,5 e 16 MPa.

Torna-se interessante ressaltar que os traços P6 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: a/c 0,30) e P10 (cimento 1,00: areia 0,10: GRAP 0,10: a/c 0,30) são compostos por 30% e

50%, respectivamente, de grãos reciclados aglutinados de polipropileno, em relação ao total da massa dos agregados. Já o traço P-22 (cimento 1,00: areia 0,00: GRAP 0,40: água/cimento 0,30), não contém agregados minerais miúdo e graúdos, ou seja, é composto apenas pela adição dos grãos na proporção de 400 g para cada 1,00 kg de cimento e, no entanto, apresentou resistência superior a 18 MPa.

Quando comparadas as resistências nas idades de 07 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, verificou-se um pequeno acréscimo de resistência inferior a 3% nos resultados devido ao fato de que, como descrito no anteriormente no item 6.1.1, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial apresenta elevadas resistência nas primeiras idades.

8.2 Comportamento relativo à compressão diametral

As resistências dos concretos com grãos reciclados aglutinados de polipropileno, quanto à compressão diametral, apresentaram a mesma proporcionalidade de redução de resistência quando comparadas ao traço de referência (ou de controle), obtendo-se melhor resultado com a mistura P6 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30) (3,90 MPa aos 28 dias), seguida por P22 (cimento 1,00: areia 0,00: GRAP 0,40: água/cimento 0,30) (2,93 MPa) e P10 (cimento 1,00: areia 0,10: GRAP 0,10: água/cimento 0,30) (1,56 MPa).

Quando comparadas as resistências nas idades de 07 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, os acréscimos de resistência foram respectivamente de 3,5% para a mistura referência, 14,7% para a mistura P6, 4% para a mistura P10 e 7% para a mistura P22.

Assim como descrito no subitem 8.1, as pequenas diferenças se justificam pelo fato de o cimento Portland de Alta Resistência Inicial apresentar nas primeiras idades elevadas resistências.

8.3 Comportamento relativo à resistência a tração na flexão

Os resultados apresentados no item 7.1.6, Tabela 7.7 e Figura 7.5 são animadores quanto à mistura P6, a qual apresentou uma redução inferior a 2% da resistência à flexão com relação ao corpo-de-prova de controle. Da mesma forma, a mistura P10 (cimento 1,00: areia 0,104: GRAP 0,10: água/cimento 0,30) apresentou resultados 62% inferiores ao controle e a mistura P22 (cimento 1,00: areia 0,00: GRAP 0,40: água/cimento 0,30) apresentou 44% de redução.

Comparando-se as resistências obtidas nas idades de 07 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, os acréscimos de resistência foram respectivamente de 11,6% para a mistura referência, 14% para a mistura P6, 4,85% para a mistura P10 e de apenas 0,32% para a mistura P22.

Assim como o que foi verificado nas comparações relativas às resistências a compressão axial e à compressão diametral, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial por apresentar elevadas resistências nas primeiras idades contribuiu para que o acréscimo das resistências à tração na flexão na idade de 7 para 28 dias não tenha sido tão expressivo.

8.4 Comportamento relativo ao módulo de elasticidade secante

Uma das funções de um compósito é o aproveitamento de parte das características dos materiais componentes a fim de se especificar aplicações. No caso do concreto, são desejáveis como características um baixo módulo de elasticidade secante e alta tenacidade. Um dos propósitos deste trabalho foi otimizar estas características citadas anteriormente, para concretos (ou compósitos) com adição de grãos reciclados aglutinados de polipropileno, devido à sua capacidade de deformação.

Observou-se durante as coletas de dados por meio do medidor-comparador e das análises de diferentes traços de concretos convencionais e compósitos, que o concreto com grãos reciclados aglutinados de polipropileno, têm menor módulo de elasticidade secante, permitindo maior deformação sob carga e maior mobilidade, sendo um material ideal para absorver impactos.

As reduções relativas ao módulo de elasticidade secante relevam, por outro lado, um ganho de elasticidade que confere ao compósito uma maior e melhor capacidade de deformar-se, ou seja, de absorver impactos.

Em relação ao controle P0 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,00: água/cimento 0,30), esta “redução” foi de 16% para a mistura P6 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30), 94% para P10 (cimento 1,00: areia 0,10: GRAP 0,10: água/cimento 0,30) e 74% para P22 (cimento 1,00: areia 0,00: GRAP 0,40: água/cimento 0,30).

8.5 Produção de elementos pré-fabricados com o compósito

Como sugestão à aplicação prática dos resultados obtidos por meio deste trabalho, foram fabricados 10 blocos de concreto utilizando como referência a mistura tipo P6. Os materiais foram devidamente dosados no laboratório em Campinas e transportados para a fábrica em Guarulhos.



Figura 8.1: Preparação da mistura para a produção de blocos com GRAP

Como a pá do misturador guarda uma distância de aproximadamente 10 cm do fundo deste equipamento e considerando que o mesmo tem diâmetro aproximado de 1,20 m, a o volume dosado teve de ser ajustado em relação às quantidades de cimento, areia, GRAP, aditivo e água.

Levou-se em consideração a contribuição da experiência dos operários e do proprietário da fábrica, pois segundo estes, a “massa” estaria adequada para a prensagem dos blocos quando não soltar água ao ser pressionada com as mãos.

O traço inicialmente dosado para se obter a mistura P6 foi ajustado para P3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30), mantendo, desta forma, certo grau de segurança para viabilizar o início da fabricação e preservar os equipamentos.

Foram realizadas três tentativas. Na primeira, a face lateral direita dos blocos foi repuxada pela parede da fôrma tendo como consequência o estofamento das laterais (efeito de sucção) as quais logo se romperam, conforme mostra a Figura 8.2. Possivelmente, ainda havia água em excesso, pois neste processo produtivo os blocos são vibrados e compactados.



Figura 8.2: Blocos de concreto: 1ª. Tentativa de fabricação dos blocos

Para a segunda tentativa, os blocos foram desmanchados para o reaproveitamento da mistura ainda fresca a qual foi acrescida de 3kg de cimento não sofreu alterações em virtude da ativação (reação) do aditivo, condições ambientais e o tempo decorrido para entre o preparo da primeira mistura e a segunda tentativa (15 minutos, aproximadamente).

Nesta segunda tentativa, os blocos apresentaram fissuras nas mesmas laterais (Figura 8.3) percebendo-se que os grãos se prendiam nas “janelas” da fôrma.



Figura 8.3: Blocos de concreto: 2ª. Tentativa de fabricação dos blocos



Figura 8.4: blocos de concreto com GRAP (2004)¹⁰

¹⁰ Sr. Sérgio, proprietário da empresa Masei Blocos Ltda., que cedeu suas instalações viabilizando a produção dos blocos com GRAP.

Na terceira tentativa, os blocos foram moldados e desmoldados com sucesso, obtendo-se as dimensões previstas de 15,0 x 19,0 x 39,0 cm, correspondentes respectivamente à largura, altura e comprimento (Figura 8.4, acima).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- 1º. O uso dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno pós-consumo que foram utilizados neste estudo, pode contribuir para a substituição dos agregados minerais convencionais como a pedra britada e a areia, ou quando bem combinados areia e grãos podem oferecer um pacote granulométrico que se apresenta satisfatoriamente fechado, resultando em resistências adequadas a diversas aplicações, em princípio não estruturais;
- 2º. A granulometria, o formato arredondado e estriado característico dos grãos de polipropileno permitiram boa aderência ao concreto sem a ocorrência de desprendimentos ou observação de qualquer segregação ou distribuição inadequada deste material no compósito já endurecido;
- 3º. O tamanho dos grãos mostrou-se adequado quer seja para se moldar os corpos-de-prova nas dimensões utilizadas neste trabalho quer seja para a produção de blocos de concreto, minimizando o risco de os grãos se prenderem nos vãos das fôrmas repuxando o restante dos materiais e provocando defeitos diversos às peças pré-fabricadas;
- 4º. Não houve a necessidade de tratamentos químicos ou físicos das superfícies dos grãos para que pudessem oferecer melhor aderência nas misturas, fato este

que simplifica os processos, reduz prazos e custos das construções ou da indústria da construção civil ao utilizar o compósito;

- 5°. Com o aumento da quantidade de grãos reciclados aglutinados de polipropileno no concreto, a resistência à compressão diminui sensivelmente, principalmente nas adições iniciais, aqui representadas pelas misturas P1 (cimento 1,00: areia 0,19: GRAP 0,01: água/cimento 0,30) e P2 (cimento 1,00: areia 0,18: GRAP 0,02: água/cimento 0,30), com redução de resistência à compressão axial de 35% e 50% respectivamente.
- 6°. As misturas de P3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30) a P6 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAP 0,06: água/cimento 0,30), registraram perdas de resistência à compressão axial inferior a 10% (no intervalo), o que sugere que os grãos, a partir 15% a 30% de adição, oferecem os melhores resultados, em termos desta resistência, nos traços com cimento, areia e GRAP;
- 7°. Nos traços com 100% de GRAP, portanto, com a substituição total de brita e areia, deve-se observar que os traços permitam o recobrimento dos grãos pela matriz de cimento ou argamassa, em razão da expressiva quantidade de grãos, os quais geram um volume muito grande a ser mineralizado. Nesta pesquisa, a mistura limite foi a P22 (cimento 1,00: areia 0,00: GRAP 0,40: água/cimento 0,30) com 400 g de GRAP para 1000 g de cimento que corresponde ao traço em volume 1: 1,67;

- 8°. O compósito mostrou-se adequado para as aplicações que especifiquem materiais ou concretos capazes de absorver energia de impactos e com sua aplicação, melhorem o desempenho do concreto para determinados fins, verificando-se até que ponto o comprometimento da estrutura ou elemento estrutural pré-fabricado esteja dentro dos limites de segurança;
- 9°. O uso dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno pós-consumo no concreto, como já era esperado, diminui as densidades aparentes do concreto, possibilitando a obtenção de compósitos leves porém com elevadas resistências;
- 10°. O grão reciclado aglutinado de polipropileno (GRAP) pode vir a ser utilizado como material inerte na construção civil, tendo como vantagens o fechamento do pacote granulométrico, o significativo ganho de ductilidade, a redução do peso das estruturas, a redução do consumo de agregados naturais e a possível redução dos custos diretos e dos preços finais de produtos pré-fabricados (ou pré-moldados) e preço final das habitações;
- 11°. É possível efetuar a reciclagem do plástico em grande escala para a produção de grãos aglutinados reciclados de polipropileno, destinados ao desenvolvimento novas aplicações como material para a indústria da construção civil, contribuindo para a redução deste resíduo sólido no meio ambiente e integrando a engenharia civil ao campo das soluções científicas, tecnológicas e práticas, não apenas relativas à ciência e à tecnologia dos materiais, mas também em termos da gestão ambiental.

12°. Apesar do caráter exploratório deste estudo, após a realização dos diversos ensaios, pode-se indicar como aplicações para este compósito, a produção de blocos de concreto para alvenaria (de vedação ou estrutural), o enchimento de lajes nervuradas (concreto leve), as defensas rodoviárias para absorção de choque mecânico, os tijolos de enchimento de lajes pré-fabricadas, muros ou paredes filtrantes, tubos de drenagem (concreto cavernoso), painéis e divisórias de concreto pré-fabricados, construções rurais, dentre outras aplicações à desenvolver.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser citadas:

- Aprofundar cada avaliação do compósito produzido com GRAP por meio de Estudos de dosagem – Curva de Abrams;
- Aprofundar a caracterização dos compósitos resultantes quanto a retração linear por secagem, absorção de água e porcentagem de umidade, permeabilidade e resistência ao desgaste por abrasão;
- Produção e caracterização de elementos pré-fabricados para se determinar suas resistências mecânicas bem como suas propriedades de conforto térmico e acústico (ambiente construído) e,
- Avaliações referentes à durabilidade de elementos produzidos com este compósito em edificações.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10.1 Obras Citadas

AGUIAR, Alexandre, PHILIPPI JR. Reciclagem de Plásticos de Resíduos Sólidos Domésticos: problemas e soluções. São Paulo: FSP/ USP, 1998. 19p.

AISSE, Miguel Mansur, OBLADEN, Nicolau Leopoldo, SANTOS, Arnaldo Scherer. Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos. Curitiba: CNPq/ ITAH/ IPPUC/ LHSAMA- UCPr, 1982, 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738*: moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos: procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

_____. *NBR 5739*: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1980.

_____. *NBR 6136*: bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 7211*: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 1983.

_____. *NBR 7222*: argamassa e concreto: determinação da resistência à compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. método de ensaio. Rio de Janeiro, 94.

_____. *NBR 7217*: agregado: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987b.

_____. *NBR 7251*: agregado em estado solto: determinação da massa unitária: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982b.

_____. *NBR 8522*: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 11768*: aditivos para concreto de cimento Portland. método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR 12142*: concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR 13230*: simbologia indicativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos. Rio de Janeiro, 1994.

AMBIENTE GLOBAL. Pesquisa CNI/ IBOPE. Acessado em 7 dez. 1999. On-line.
Disponível na Internet <http://www.uol.com.br/ambienteglobal/>

BONAR, Verônica. Plástico reciclar!. São Paulo, Scipione, 1996.

BROWN, David T. The Legacy of the Landfill: Perspectives on the solid crisis. In: MUSTAFA, Nabil (ed.). *Plastics Waste Management: disposal, recycling, and reuse*. New York: Marcel Dekger, 1993. p.1-35.

BRUDER, Jürgen. Economic Instruments for Encouraging Plastic Recycling. In: BRANDRUP, Johanes, BITTNER, Muna, MICHAELI, Walter, MENGES, Georg (ed.). *Recycling and Recovery of Plastics*. Germany: Carl Hanser, 1996. p.47-59.

CALDERONI, Sabetai. *Perspectivas econômicas da reciclagem do lixo no município de São Paulo*. São Paulo, 1996, 290 p. Tese (doutoramento), Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo [orientação do prof. dr. Luiz Augusto de Queiroz Ablas].

_____. *Os bilhões perdidos no lixo*. São Paulo, Humanitas, 1997.

CHERIAF M., CLEMENTE, E.C., BORGES de CASTILHOS Jr. A., CAVALCANTE ROCHA, J., SOARES, S. R. Valorização dos lodos da indústria têxtil como novo material de construção civil. In: I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, *Anais...*: Canela-RS. 1997. p. 75-80.

CONSONI, Angelo José et al. Disposição Final do Lixo. In: IPTON/ CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1997. p.75-124.

COSTA, Ana Cláudia Fernandes. Os Caminhos dos Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Porto Alegre/RS: Da Origem ao Destino Final. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.

DEMAJOROVIC, Jacques. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos. As novas prioridades. *Empresas*. São Paulo, v. 35, n.3, 1995. p. 88-93.

DINATO, Monique Revillion, et al. O Comportamento Ambiental do Consumidor de Porto Alegre. In: V Encontro nacional sobre gestão empresarial e meio ambiente, *Anais...* : São Paulo, 1999. p. 619-632.

DONAIRE, Denis. Gestão ambiental na empresa. São Paulo: Atlas, 1995.

DSD – Duales System Deutschland AG. Acessado em 24 nov. 1999a. Disponível na Internet: <http://www.gruener-punkt.de/e/index.htm>

_____. Mass Flow Verification 1998. Acessado em 24 de nov. 1999b. Disponível na Internet: <http://www.gruener-punkt.de/e/content/daten/menge.pdf>.

EHRIG, R. J., CURRY, M. J. Introduction and History. In: EHRIG, R. J. *Plastics Recycling: Products and Processes*. New York: Hanser, 1989. p.3-16.

FURTADO, Marcelo Rijo. Aplicações Novas Prometem Dobrar o Uso de Reciclados. jun., 1996. p. 8-20.

GARLET, Givanildo; GREVE, Hélio A. Aproveitamento de resíduos de e.v.a. da indústria calçadista na construção civil. IN: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo:EPUSP/ANTAC, 1997. 184p. p. 87-92.

GOLDEMBERG, José. Energia no Brasil. Rio de Janeiro. LTC, 1979.

GONÇALVES, Alexandre et al. O futuro é de plástico: Revista Empreendedor, São Paulo: Empreendedor, ano 3, n.º 33 p. 14-25, jul 1997.

GÜNTHER, Wanda Maria Risso, WIEBECK, Hélio, PIVA, Ana Magda. Reciclagem. n. 51, 1999. Acessado em 22 de out. 1999. Online. Disponível na Internet <http://www.ablp.org.br>.

HANSMANN, Joseph, MUSTAFA, Nabil. Plastics: A Technical Overview. In: HIWATASHI, Erica. O Processo de Reciclagem dos Resíduos Sólidos Inorgânicos Domiciliares em Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Administração) - Programa de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999.

HUANG, Samuel J. Polymer Waste Management – Biodegradation, Incineration, and Recycling. In: ALBERTSSON, Ann-Christine, HUANG, Samuel J (ed.). Degradable Polymers, Recycling, and Plastics Waste Management. New York: Marcel Dekger, 1995. p.1-5.

IINJIMA, Rinzo. Plastics Recycling in Japan – the Current State and Future Outlook. In: BRANDRUP, Johanes, BITTNER, Muna, MICHAELI, Walter, MENGES, Georg (ed.). Recycling and Recovery of Plastics. Germany: Carl Hanser, 1996. p.549-559.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 21-30.

JOHN, Vanderley Moacyr. Panorama da reciclagem de resíduos na construção civil. *Qualidade na Construção*. São Paulo, v.III, n.20, p.26-36, 1999.

KINLAW, Dennis C. *Empresa Competitiva e Ecológica: desempenho sustentado na era ambiental*. São Paulo: Makron Books, 1997.

LEMOS, Ângela Denise, NASCIMENTO, Luis Felipe. A Produção Limpa como Geradora de Inovação e Competitividade. In: XXII Encontro da Associação dos Programas de Pós-Graduação em Administração, Foz do Iguaçu, 28 a 30 set. 1998. *Anais...* : Foz do Iguaçu, 1998. CD-ROM.

LEVY, S. M., HELENE, P. R. L. Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 138-148.

LIESEMER, Ron N. Plastic Recycling in the USA – a Status Report. In: BRANDRUP, Johan, BITTNER, Muna, MICHAELI, Walter, MENGES, Georg (ed.). *Recycling and Recovery of Plastics*. Germany: Carl Hanser, 1996. p.542-548.

MANO, Eloisa B., BONELLI, Cláudia M. C. A reciclagem de plásticos pós-consumidos. n.698, out./ dez., 1994, p. 18 - 22.

MASUERO, Ângela B. et al. Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: perspectivas de valorização na construção civil. IN: *WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL*, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo:EPUSP/ANTAC, 1997. 184p. p. 61-68.

NORTH, Klaus. Environment Business Management. Geneva, International Labour Office, second edition, 1997.

PERA, Jean. State of the art of waste materials in construction in western europe. IN: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo:EPUSP/ANTAC, 1997. 184p. p. 1-20.

PINTO, T. P. De volta à questão do desperdício. *Construção*. São Paulo: Pini, n. 2491, p. 18-19, nov. 1995.

_____. Perda de materiais em processos construtivos tradicionais. São Carlos: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (Texto datilografado), 1989. 33 p.

_____. Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Planejamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado), 1986. 148 p.

PORTER, Michael E., LINDE, Claas van der. Green and Competitive: Ending the Stalemate. *Harward Business Review*. sept-oct, 1995, p.120-134.

PRUDÊNCIO Jr.; SANTOS, Silvia. Resíduos do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. IN: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo:EPUSP/ANTAC, 1997. 184p. p. 51-60.

SAMMARCO, Celma, DELFINI, Luciano. Mercado brasileiro tem potencial para ampliar a reciclagem de plásticos. *Plástico Industrial*. Mar, 1999, p.106-119.

SILVA, M. G., SOUZA, F. L. S., SILVA, V. G. Reciclagem de cinza de casca de eucalipto e entulho de obra em componentes de construção. . In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 102-108.

SHERMAN, Stratford P. Trashing a \$150 billion business. *Fortune*. August 28, 1989, p. 64-68.

SILVEIRA, Adriana A. et al. A cinza de casca de arroz como adição mineral. IN: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo:EPUSP/ANTAC, 1997. 184p. p. 39-44.

SOBRAL, Helena Ribeiro. O meio ambiente e a cidade de São Paulo. São Paulo, Makron Books, 1996.

THE EARTH Works Group. Manual de reciclagem: coisas simples que você pode fazer. Rio de Janeiro, José Olympio, 1990.

VALLE, Cyro Eyer do. Qualidade Ambiental: como ser competitivo protegendo o meio ambiente: (como se preparar para as Normas ISO 14000). São Paulo: Pioneira, 1995.

WIEBECK, Hélio. Reciclagem do Plástico e suas aplicações industriais. USP/SEBRAE SP, São Paulo, maio, 1997.

WOIDASKY, Joerg. Reciclagem Mecânica e Incineração com Recuperação de Energia. Porto Alegre, FIERGS, 10 nov. 1999. Palestra ministrada no Seminário Internacional Plástico: Recicle que dá certo.

10.2 Acervo técnico CEMPRE e PLASTIVIDA

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. CEMPRE Informa. CEMPRE , São Paulo, n. 42, nov./dez., 1998a.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. CEMPRE Informa. CEMPRE , São Paulo, n. 43, jan./fev., 1999b.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. . CEMPRE, São Paulo, 1997a.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. . CEMPRE, São Paulo, 1997b.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. . CEMPRE, São Paulo, 1997c.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Pesquisa Ciclosoft. 1999a.

_____. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Reciclagem e Negócios – Plástico Granulado. CEMPRE, São Paulo, 1998b.

PLASTIVIDA. A indústria de reciclagem de plástico no Brasil: análise regional outubro/2002. Disponível na Internet <<http://www.abiquim.org.br/plastivida/mail.htm>>. Acessado em 10 jan. de 2005.

PLASTIVIDA. Plásticos em foco. ABIQUIM. São Paulo: 1997. CD-ROM.

10.3 Obras Consultadas

ABREU, Estela dos Santos; TEIXEIRA, José Carlos de Abreu. Apresentação de trabalhos monográficos de conclusão de cursos. Universidade Federal Fluminense, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. 7. ed. Niterói: EdUFF, 2004. 88p.: il.;30 cm.¹¹

BACKER, Paul. Gestão Ambiental: a administração verde. Rio de Janeiro, Qualitymark, 1995.

BAILEY, Ronald. The true state of the planet. Ten of the world's premier environmental researchers in a major challenge to the environmental movement. New York, The Free Press, 1995.

CASTRO, M.S.M.V. Lixo: análise induz modelo de gestão: Revista Saneamento e Meio Ambiente, São Paulo: Signus, ano X, n.º 55, p. 38-41, jan/fev 1999.

CINCOTTO, A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. A Construção, São Paulo: Pini, n. 1855, p. 27-30, ago.1983.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Nosso futuro comum, 2. ed. Rio de Janeiro, Editora FGV, 1991.

DERANI, Cristiane. Direito ambiental e econômico. São Paulo, Max Limonad, 1997.

FLÔRES, Ana. O dinheiro está no lixo. Recicle esta idéia. São Paulo, Grafnorte, 1997.

¹¹ Esta edição incorporou as três últimas normas da ABNT publicadas em 2003 (NBR 6024:03: Informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação, NBR 6027:03: Informação e documentação: sumário: apresentação e NBR 6028:03: Informação e documentação: resumo.

HAMASSAKI, L. T, SBRIGHI NETO, C., FLORINDO, M. Uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 109-117.

JAMES, Bárbara. Lixo e reciclagem, 5.^a ed. São Paulo, Scipione, 1997.

RILEM TC 121 - DRG. Specification for concrete with recycled aggregates: materials and structures, v. 27, p. 557-559, 1994.

STEFFANI, Evandro, FINKLER, Maira. Uma Avaliação das Propriedades do Polipropileno Reciclado. *Plástico Industrial*. n. 40, abr., 1999.

VEIGA, Pedro da Mota & MACHADO, João Bosco M. Diagnóstico e perspectivas da indústria brasileira de termoplásticos. Rio de Janeiro, FUNCEX, 1997.

10.4 Portais consultados na Internet

ABIPLAST: www.abiplast.com.br

ABIQUIM: www.abiquim.org.br

ABREMPLAST: www.plastico.com.br

CEMPRE: www.cempre.org.br

PETROBRAS: www.petrobras.com.br

PLASTIVIDA: www.plastivida.org.br

ANEXO A: Planilhas de cálculo dos módulos de elasticidade secante

incremento	31200	cp1	31200	média de 2	média de 3	MOD-P0- 07 DIAS					
0,1	3120	cp2	31200	31200	31200						
0,2	6240	cp3	31200			para 0.5 MPa					
0,3	9360	média	31200			rel. 01	2,5	média	mm	base	
0,4	12480	15,8899924 MPa				rel. 02	7,5		5	0,005	0,00005
0,5	15600					para 0.4 da carga de ruptura					
0,6	18720					rel. 01	65	média	mm	base	
0,7	21840					rel. 02	77,5		71,25	0,07125	0,0007125
0,8	24960										
metade da ruptura menos 0.5				15,3899924							
						módulo					
						15,3899924					
						0,0007125 menos 0,00005					
						23,2301771 Gpa					
Tensão igual a pressão dividido pela Área											
0.5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$											
F= área(m2) vezes 0.5 MPa											
Força= 1,76715 0,5											
Força(Tf)= 0,883575											
Força(kgf)= 883,575 kgf											

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura referência, idade 7 dias

incremento	31200	cp1	31200	média de 2	média de 3	MOD-P0-28 DIAS					
0,1	3120	cp2	31200	31200	20800						
0,2	6240	cp3	31200			para 0.5 MPa					
0,3	9360	média	31200			rel. 01	4	média	mm	base	
0,4	12480	15,8899924 MPa				rel. 02	6		5	0,005	0,00005
0,5	15600					para 0.4 da carga de ruptura					
0,6	18720					rel. 01	24,5	média	mm	base	
0,7	21840					rel. 02	38		31,25	0,03125	0,0003125
0,8	24960										
metade da ruptura menos 0.5				15,3899924							
						módulo					
						15,3899924					
						0,0003125 menos 0,00005					
						58,6285423 Gpa					
Tensão igual a pressão dividido pela Área											
0.5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$											
F= área(m2) vezes 0.5 MPa											
Força= 1,76715 0,5											
Força(Tf)= 0,883575											
Força(kgf)= 883,575 kgf											

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura referência, idade 28 dias

incremento	18590	cp1	20280	média de 2	média de 3	MOD-P6-07 DIAS				
0,1	1859	cp2	17745	19012,5	18590					
0,2	3718	cp3	17745	para 0,5 MPa		rel. 01	9,333	média	mm	base
0,3	5577	média	18590			rel. 02	-1	4,1665	0,0041665	0,00004
0,4	7436	9,46778711 MPa				para 0,4 da carga de ruptura				
0,5	9295					rel. 01	95,666	média	mm	base
0,6	11154					rel. 02	47,667	71,6665	0,0716665	0,00071667
0,7	13013					metade da ruptura menos 0,5				
0,8	14872					8,96778711				
										módulo
										13,2856105 Gpa
										0,00071667 menos 4,1665E-05
										Tensão igual a pressão dividido pela Área
										0,5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$
										F= área(m2) vezes 0,5 MPa
										Força= 1,76715 0,5
										Força(Tf)= 0,883575
										Força(kgf)= 883,575 kgf

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura P6, idade 7 dias

incremento	18400	cp1	20200	média de 2	média de 3	MOD-P6-28 DIAS				
0,1	1840	cp2	17500	18850	18400					
0,2	3680	cp3	17500	para 0,5 MPa		rel. 01	2,1	média	mm	base
0,3	5520	média	18400			rel. 02	4	3,05	0,00305	0,00003
0,4	7360	9,37102114 MPa				para 0,4 da carga de ruptura				
0,5	9200					rel. 01	32,5	média	mm	base
0,6	11040					rel. 02	10	21,25	0,02125	0,0002125
0,7	12880					metade da ruptura menos 0,5				
0,8	14720					8,87102114				
										módulo
										48,7418744 Gpa
										0,0002125 menos 0,0000305
										Tensão igual a pressão dividido pela Área
										0,5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$
										F= área(m2) vezes 0,5 MPa
										Força= 1,76715 0,5
										Força(Tf)= 0,883575
										Força(kgf)= 883,575 kgf

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura P6, idade 28 dias

Incremento	7840	cp1	7840	média de 2	média de 3	MOD-P10-07 DIAS			
0,1	784	cp2	7840	7840	7840				
0,2	1568	cp3	7840	para 0.5 MPa					
0,3	2352	média	7840	rel. 01		9,6667	média	mm	base
0,4	3136		3,99286988 MPa	rel. 02		10,5	10,08335	0,01008335	0,00010
0,5	3920	metade da ruptura menos 0.5		para 0.4 da carga de ruptura					
0,6	4704		3,49286988	rel. 01		172,33	média	mm	base
0,7	5488			rel. 02		133,33	152,83	0,15283	0,0015283
0,8	6272			módulo					
				3,49286988					2,44690147 Gpa
				0,0015283 menos 0,00010083					
Tensão igual a pressão dividido pela Área									
0,5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$									
F= área(m2) vezes 0,5 MPa									
Força= 1,76715 0,5									
Força(Tf)= 0,883575									
Força(kgf)= 883,575 kgf									

corpo de prova	raio	área cm2	m2	0,5 MPa
5x10	2,5	19,635	0,19635	98,1 kgf
10x20	5	78,54	0,7854	392,7kgf
15x30	7,5	176,715	1,76715	883,5 kgf

Tf

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura P10, idade 7 dias

Incremento	4100	cp1	4100	média de 2	média de 3	MOD-P10-28 DIAS			
0,1	410	cp2	4100	4100	4100				
0,2	820	cp3	4100	para 0.5 MPa					
0,3	1230	média	4100	rel. 01		23,3	média	mm	base
0,4	1640		2,08810797 MPa	rel. 02		14,23	18,765	0,018765	0,00019
0,5	2050	metade da ruptura menos 0.5		para 0.4 da carga de ruptura					
0,6	2460		1,58810797	rel. 01		105	média	mm	base
0,7	2870			rel. 02		37,5	71,25	0,07125	0,0007125
0,8	3280			módulo					
				1,58810797					3,02583209 Gpa
				0,0007125 menos 0,00018765					
Tensão igual a pressão dividido pela Área									
0,5MPa= $\frac{F}{\text{área}}$									
F= área(m2) vezes 0,5 MPa									
Força= 1,76715 0,5									
Força(Tf)= 0,883575									
Força(kgf)= 883,575 kgf									

corpo de prova	raio	área cm2	m2	0,5 MPa
5x10	2,5	19,635	0,19635	98,1 kgf
10x20	5	78,54	0,7854	392,7kgf
15x30	7,5	176,715	1,76715	883,5 kgf

Tf

Planilha de cálculo do módulo de deformação secante: mistura P10, idade 28 dias

