

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE DE
ECOSSISTEMAS COSTEIROS E MARINHOS

ORLANDO CARLOS BATISTA DAMIN

SEQUESTRO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) POR RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Santos – SP
Junho/2013

ORLANDO CARLOS BATISTA DAMIN

**SEQUESTRO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) POR RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos, sob orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Jr. e Prof. Dr. Aldo Ramos Santos.

Santos – SP

Junho/2013

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Damin, Orlando Carlos Batista.

Sequestro de Dióxido de Carbono (CO₂) por resíduos de construção e demolição / Orlando Carlos Batista Damin.

-- 2013.

113 f.

Orientador: Prof. Dr. DEOVALDO DE MORAES JÚNIOR

Coorientador: Prof. Dr. ALDO RAMOS SANTOS

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos, Santos, SP, 2013.

1. Dióxido de carbono. 2. carbonatação. 3. resíduos de construção. 4. ecologia. 5. captura do dióxido de carbono. I. De Moraes Júnior, Deovaldo, orient. II. Santos, Aldo Ramos, coorient. III. Sequestro de Dióxido de Carbono (CO₂) por resíduos de construção e demolição.

Elaborado pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

ORLANDO CARLOS BATISTA DAMIN

SEQUESTRO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) POR RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos (ECOMAR), da Universidade Santa Cecília, para obtenção do grau de Mestre em Ecologia.

Data da aprovação: ____/____/____.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Prof^a. Dr.(a) Karina Tamião de Campos Roseno

Prof^a. Dr.(a) Miriam Antonio de Abreu

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pela dedicação e o cuidar de toda uma vida.
À minha mulher, filho e filhas pela paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e Dr. Aldo Ramos Santos, por mostrar os caminhos, pela amizade e ensinamentos.

Ao grande amigo Freitas, que influenciou de forma decisiva a iniciar, continuar e terminar o mestrado.

Ao professor e amigo Dr. João Inácio da Silva Filho, pelos ensinamentos, ajuda, determinação e por ensinar que a humildade é o caminho.

À coordenadora do curso de Engenharia Civil da Unisanta, Me. Nilene Janine de Oliveira Seixas, pelo incentivo e sugestões para aprimoramento deste trabalho.

À Universidade Santa Cecília, pela oportunidade.

Às secretárias da pós-graduação, Sandra e Imaculada, pela atenção, simpatia e cortesia.

Aos companheiros de mestrado, pela amizade e convívio ao longo desta caminhada, em especial a Ramos, Érika, Maza, Elias, Hélio, Duarte, Valéria, Aguinaldo e Nogueira.

Aos funcionários dos laboratórios de construção civil e solos, especialmente ao amigo e hoje professor Paulo, pela cooperação e ajuda.

Aos professores do curso de mestrado, principalmente ao Dr. Fábio Giordano, Dra. Mara Magenta, Dr. Camilo, Dr. Augusto César, Dr. Rodrigo, Dr. Borges e Dra. Milena pelo convívio, entusiasmo, amizade e ensinamentos.

Ao Dr. Sílvio José Valadão Vicente, pela parceria e entusiasmo ao orientarmos trabalhos de conclusão de nossos alunos.

Aos alunos Fernanda, Jonas, Marcelo, Salvador, Raoni e Vander pelo brilhantismo e pela honra de tê-los orientado em seus trabalhos de conclusão de curso.

Aos alunos Marcel, Jordan e Maurício, agradeço pelas informações, paciência e atenção, mostrando que como professor serei sempre um eterno aprendiz. Que tenham uma carreira brilhante como profissionais de engenharia.

Em especial ao amigo e Eng. Carlos Eizo da Secretaria de Serviços Públicos da Prefeitura de Santos, pelos esclarecimentos e contribuições fundamentais para realização deste trabalho.

Agradecimento especial ao futuro engenheiro Giovanni, diretor da Foccus Gerenciamento de Resíduos, que contribuiu com o fornecimento do resíduo de construção e demolição para a pesquisa.

EPÍGRAFE

"Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma"

*Lavoisier, Antoine Laurent (1743-1794)
Lei da conservação da matéria*

RESUMO

O dióxido de carbono, anidrido carbônico ou gás carbônico (CO_2), é essencial para a existência da vida no planeta, imperativo para o processo físico-químico da fotossíntese vegetal e utilizado em vários processos industriais. Contudo, o aumento das suas emissões, resultado de ações antropogênicas, tais como queimadas, uso de combustíveis fósseis e na fabricação de cimento, vem sendo indicado como principal responsável pelo aquecimento global. Apontado como responsável por emissões de 5 a 7% de gás carbônico na atmosfera, o cimento, assim como a cal, retêm o CO_2 no processo químico de cura e carbonatação. Essa reação química da penetração de dióxido de carbono na matriz do cimento umedecido destaca-se pela ação rápida na cura de produtos que utilizam calcário, onde o agente catalisador é o ácido carbônico, que altera o pH da matriz cimentícia. O presente trabalho tem por objetivo principal estudar a contribuição dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para a mitigação do dióxido de carbono atmosférico, investigando o impacto ecológico de sua capacidade de sequestro de CO_2 e as iniciativas da indústria do cimento para reduzir as emissões desse gás na composição do efeito estufa. Como objetivo secundário, busca quantificar de forma teórica e experimental a contribuição das operações unitárias de absorção (retenção na água por solubilidade) e adsorção (retenção no sólido) do CO_2 pelo RCD. As amostras de material, obtidas junto à empresa processadora de resíduos e construtoras, foram classificadas através de ensaio de granulometria, umidade e pH. Logo após, a mostra foi separada pelo diâmetro em três diferentes faixas granulométricas e colocadas em uma coluna de vidro de 280mm de altura e 30mm de diâmetro, através da qual foram inseridos dois dutos ligados aos cilindros com CO_2 puro (variadas vazões) e outro com ar, em vazão constante de 2,99 mL/s. As concentrações de CO_2 em função do tempo, na entrada e saída da coluna, foram obtidas por titulação. A massa de CO_2 , retida experimentalmente nas amostras por adsorção, foi de aproximadamente 35 vezes maior que a quantidade retida por absorção na água das amostras - dada pela Lei de Henry. Os resultados indicaram que a água no RCD é responsável por uma pequena parte da retenção de CO_2 . A fixação do CO_2 no RCD é praticamente resultante da operação unitária denominada de adsorção, definida como a retenção de um gás ou líquido em um sólido por polaridade, massa molar ou forma, seguida ou não de reação química.

Palavras-chave: gás carbônico, carbonatação, resíduos de construção, ecologia, captura de dióxido de carbono.

ABSTRACT

Carbon dioxide, carbonic anhydride or carbonic gas (CO_2) is essential for the existence of life on the planet, imperative for the physic-chemical process of vegetable photosynthesis and it is also used in various industrial processes. However, the growth in its emission as a result of anthropogenic activities, such as forest burning, fossil fuel use and cement manufacturing has been appointed as the main factor to the global warming. Blamed for the emission of 5 to 7% of carbonic gas in the atmosphere, cement as well as lime trap CO_2 during the chemical processes of curing and carbonation. This chemical reaction of carbon dioxide penetration in the moistened cement matrix stands for the rapid healing of products that utilize limestone, where the catalyst is the carbonic acid, which alters the pH of the cement matrix. The main objective of this research is to study the contribution of Construction and Demolition Waste (CDW) to atmospheric carbon mitigation, investigating the ecological impact of its CO_2 sequestration capacity and the cement industry initiatives to decrease these gas emissions during the greenhouse effect composition. As a secondary objective, it seeks to quantify in a theoretical and experimental way the contribution of CO_2 absorption and adsorption by CDW's unit operations. The sample material obtained with residue processing and construction companies were sorted through granulometry, moist and pH tests. After that the sample was separated by diameter into three different particle sizes and placed on a column of 28cm of height and 3cm in diameter through which were inserted two wires connected to the cylinders with pure CO_2 (varying flows) and another air at constant flow rate of 2.99mL/s. Due to time issues CO_2 concentrations at the entrance and exit of the column were obtained by titration. CO_2 mass experimentally retained in the adsorption samples was approximately 35 times bigger than the amount retained by absorption at the water's sample – according to Henry's Law. The results indicate that water at the CDW is responsible for retaining only a small part of CO_2 . RDW's CO_2 fixation practically results from the unitary operation called adsorption, defined as retention by polarity, molar mass or form of a gas or liquid present in a solid substance, followed or not by a chemical reaction.

Keywords: carbonic gas, carbonation, construction waste, ecology, capture of carbon dioxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Apresentação esquemática do efeito estufa	24
Figura 2: Contribuição para o efeito estufa (fontes naturais e artificiais)	25
Figura 3: Ciclo do Carbono simplificado. Troca rápida entre a atmosfera e o oceano é representada por A e B, as emissões terrestres (inclusive fabricação de cimento) e absorção pelas florestas são verificadas por C e D, a emissão da queima de combustíveis fósseis é indicada pela letra F, absorção pelo fundo dos oceanos se apresenta pela letra E.	26
Figura 4: Total de emissões anuais de gás carbônico por setor no estado de São Paulo (CETESB, 2011a).	29
Figura 5: Emissões de GEE do Brasil e do Estado de São Paulo em 2005 (CETESB, 2010j).	31
Figura 6: Concreto com idade acima de 30 anos, condições de exposição atmosférica sem proteção de revestimento. Teste de fenolftaleína.	35
Figura 7: Esquema da Fabricação de Cimento. (A.B.C.P., 2011)	38
Figura 8: Principais componentes do material cru e clínquer do cimento Portland	39
Figura 9: Distribuição da produção de dióxido de carbono (1,6 Gt) no Brasil em 2005	44
Figura 10: Esquema de industrialização da Cal (GUIMARÃES, 1998).	45
Figura 11: (A) Cidades com gestão de resíduos antes da Resolução CONAMA 307/2002 e (B) após a promulgação da Resolução (PINTO, 2011)	49
Figura 12: Distribuição percentual das empresas de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).	52
Figura 13: Registro dos últimos 10 (dez) anos com pedidos de licenças para demolição e aprovação de projetos arquitetônicos na Prefeitura Municipal de Santos (julho/ 2012).	53
Figura 14: Resíduo misto chegando à Foccus Gerenciadora de Resíduos.	56

Figura 15: Micrografia eletrônica (a) e análise em EDS (b) do carbonato de cálcio, em amostra de RCD.	58
Figura 16: Extração de cátion Cálcio em função da variação de solução de ácido clorídrico.	59
Figura 17: Profundidade de carbonatação para concretos com idade de 147 dias, uso de agregado reciclado. (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).	60
Figura 18: Bancada de ensaio desenvolvida no Laboratório de Operações Unitárias, para determinação de quantidade de dióxido de carbono adsorvida pelo RCD.	67
Figura 19: Desenho esquemático da unidade experimental para obtenção da massa de gás carbônico retida na amostra de RCD por adsorção.	67
Figura 20: Difusor para dissolução do gás carbônico em água.	68
Figura 21: Notação do balanço de massa no ponto da mistura.	72
Figura 22: Relação de C/Co de resíduo misto, entre abertura de malha 0,30mm a 0,15mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.	73
Figura 23: Curva C/Co em função do tempo, indicando estabilidade no resíduo após 600s.	74
Figura 24: Relação de C/Co de resíduo misto, entre abertura de malha 1,18mm a 2,00mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.	75
Figura 25: Relação de C/Co de resíduo misto, abertura de malha 2,36mm a 4,75mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.	76
Figura 1 do ANEXO 1: Medições de pH e respectivos desvios-padrão (n = 9)	91
Figura 1 do ANEXO 4: Detalhe do Bolhômetro criado no Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta (SOARES, 2012).	97
Figura 1 do ANEXO 5: Curva de Saturação do Gás Carbônico com uso de difusor 2.	98
Figura 1 do APÊNDICE 1: Frota de veículos em função dos meses (2008 e 2009). Fonte: Detran/SP.	100

Figura 2 do APÊNDICE 1: Frota de veículos em função dos meses (2010 e 2011). Fonte: Detran/SP. 101

Figura 1 do APÊNDICE 2: Curva granulométrica de amostra de resíduo misto enviada pela empresa Foccus Gerenciadora de Resíduos. (n=2). 102

Figura 1 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura de gás carbônico para resíduo do tipo misto, material padrão. 106

Figura 2 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura de resíduo misto, material seco. 107

Figura 3 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura do resíduo misto, material úmido 108

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Efeito da substituição do clínquer por adições em diferentes cimentos brasileiros (JOHN; ANGULO; AGOPYAN, 2005).	42
Tabela 2: Produção da cal brasileira de 2005 a 2008 – (A.B.P.C., 2012).	46
Tabela 3: Estimativas das emissões de gás carbônico na produção de cal (CETESB, 2011b).	47
Tabela 4: Geração de Resíduos x Cidade.	48
Tabela 5: Quantidade de licenças de demolição e aprovação de projetos arquitetônicos, até de julho/2012. (DAMIN; SANTOS; MORAES JÚNIOR, 2012) .	54
Tabela 6: Coleta de RCD antes da triagem de resíduos.	56
Tabela 7: Resíduo Misto, resultado de pH entre .	68
Tabela 8: Ensaio de granulometria do resíduo misto (n=2).	69
Tabela 9: Tipo do resíduo misto, separado por faixa granulométrica e umidade.	70
Tabela 10: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco e padrão.	74
Tabela 11: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco, padrão e úmido, entre abertura de malha 1,18mm a 2,00mm.	76
Tabela 12: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco, padrão e úmido para 2,36mm a 4,75mm.	77
Tabela 1 do APÊNDICE 3: Resíduo misto padrão com 1,78% de umidade.	103
Tabela 2 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto seco com 0% de umidade.	103
Tabela 3 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto úmido com 66% de umidade	103
Tabela 4 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto seco, 0% de umidade.	104
Tabela 5 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto padrão, 1,82% de umidade.	104
Tabela 6 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto Úmido, 66% de umidade.	104

Tabela 7 do APÊNDICE 3: Resíduo misto seco, 0% de umidade.	105
Tabela 8 do APÊNDICE 3: Resíduo misto padrão, 2,28% de umidade.	105
Tabela 9 do APÊNDICE 3: Resíduo misto úmido, 66% de umidade.	105
Tabela 1 do APÊNDICE 5: Demolições registradas por bairro no município de Santos.	109
Tabela 1 do ANEXO 1: Resultados do teste t (carbonatação).	92
Tabela 1 do ANEXO 3: Resistência a compressão de 3 a 28 dias da argamassa de contrapiso.	96
Tabela 1 do ANEXO 5: Valores experimentais da concentração de gás carbônico.	98
Tabela 1 do ANEXO 6: Abertura de peneiras Mesh x mm.	99

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

A.B.C.P. - Associação Brasileira de Cimento Portland;
A.B.N.T. - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
A.B.P.C. - Associação Brasileira dos Produtores de Cal;
ACV - Análise de Ciclo de Vida;
ARC - Agregado Reciclado de Concreto;
a/c - fator água/cimento;
 Ca^{2+} - Cátion Cálcio;
 Ca(OH)_2 - Hidróxido de Cálcio;
 CaCO_3 - Carbonato de Cálcio;
 CaSiO_3 - Silicato de Cálcio;
CCS - Captação e Armazenamento de Carbono;
 CO_2 - Dióxido de Carbono, Gás Carbônico, Anidrido Carbônico;
 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ - Dióxido de Carbono equivalente;
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente;
COMASP - Comitê do Meio Ambiente do Sinduscon/SP;
EDS - Dispersão de Energia por raios-X ou EDS (*Energy Disperse X-Ray Spectroscopy*), conforme a sigla em inglês;
G - Giga (10^9);
GEE - Gases do efeito estufa, em inglês GHG (*greenhouse gas*);
GtC - Giga tonelada de carbono;
 H_2CO_3 - Ácido Carbônico;
 HCO_3^{1-} - Bicarbonato;
kg - Quilograma;
kt - Quilotonelada;
 MgCO_3 – Carbonato de Magnésio;
MPa – Megapascal;
Mt - Megatonelada;
NASA - Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos;
pH - Potencial hidrogeniônico;
pHmetro - Peagômetro - medidor do potencial de hidrogênio;
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente;
RCD - Resíduos de Construção e Demolição;

SINDUSCON - Sindicato das Indústrias de Construção;

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento;

UT MUT F - Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	17
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Política e mitigação da emissão de dióxido de carbono	21
2.2 Efeito Estufa, Ciclos Geológico e Biológico do Carbono	23
2.2.1 Oceanos	27
2.2.2 Inventário de emissões	29
2.2.3 Programa Nacional de Redução de Emissões de GEE	31
2.3 Técnicas de Tratamento de Gases	32
2.4 Carbonatação	34
2.5 Cimento	37
2.5.1 Produção e Tipos de cimentos brasileiros	40
2.5.2 Emissões de gases estufa	43
2.6 Cal	44
2.6.1 Produção e Tipos de cales brasileiras	46
2.6.2 Retenção de gás carbônico pela Cal	46
2.6.3 Emissões de gases estufa	46
2.7 Resíduos de construção civil	48
2.7.1 Características	49
2.7.2 Legislação	49
2.7.3 Normas Técnicas	51
2.7.4 Tipos de coleta e empresas na Baixada Santista	52
2.7.5 Captura de dióxido de carbono por RCD	56
III MATERIAL E MÉTODO	62
3.1 Umidade das amostras	62
3.2 Granulometria	63
3.3 Teste de fenolftaleína e peagômetro	64
3.4 Análise de variância e estatística paramétrica	65
3.5 Massa absorvida pela Lei de Henry	65
3.6 Massa retida por adsorção	66
IV RESULTADOS e DISCUSSÃO	68
4.1 Umidade, granulometria e pH	68
4.2 Massa absorvida pela Lei de Henry	70
4.3 Massa retida por adsorção	71
V CONCLUSÃO	78
VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

ANEXOS

Anexo 1. Análise estrutural e patológica dos postes de iluminação das praias de Santos.	91
Anexo 2. Definições da resolução CONAMA nº.307/2002.	93
Anexo 3. Utilização de resíduos da construção civil para execução de contrapiso em edifício de 28 pavimentos no município de Santos – SP.	96
Anexo 4. Bolhômetro.	97
Anexo 5. Análise de adsorção de CO ₂ em resíduos de construção civil.	98
Anexo 6. Tabela de conversão Mesh x mm.	99

APÊNDICES

Apêndice 1. Venda de veículos automotores no estado de São Paulo; 2008 a 2011.	100
Apêndice 2. Curva granulométrica das amostras de resíduos de construção.	102
Apêndice 3. Resultados dos ensaios de adsorção de CO ₂ dos resíduos de Construção Civil.	103
Apêndice 4. Curvas de ruptura de CO ₂ dos resíduos de construção civil.	106
Apêndice 5. Demolições por bairros em Santos – 2005 a 2012.	109

I. INTRODUÇÃO

Como hipótese, o presente estudo se baseou na reação química do concreto com o dióxido de carbono, conhecida como carbonatação, cuja principal característica é a “captura” do CO₂ pela superfície da peça e seu consequente armazenamento dentro do concreto (ou mesmo argamassa), não mais retornando à atmosfera, contribuindo para a mitigação das emissões de gás carbônico pela indústria do cimento (BARIN, 2008; CAFANGE, 2011; CASCUDO, 1997; ALEXANDER; MACKECHNIE; YAM, 2007).

Foi verificado nos resíduos de construção e demolição (RCD) o consumo máximo de gás carbônico entre 9,14% a 10,56%. A mistura de solo e resíduos, até 25% de umidade do solo, foi identificada como a mais adequada para o seqüestro de CO₂. (GUPTA; BHAVYA; NEMAR, 2011; GUPTA; NEMAR, 2011). Inclusive em base seca (GUPTA; NEMAR, 2012)

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial, apresentou em 2007, a queima de combustíveis fósseis, as queimadas e a fabricação do cimento como os principais emissores de CO₂ atmosféricos, sendo que a produção do cimento contribui com 5 a 7% dessas emissões no mundo (IPCC, 2007; QUÍMICA, 2011). O cimento produzido no Brasil é o que apresenta menores emissões (SATO, 1998) e um estudo elaborado pela IEA – International Energy Agency, analisando os principais países produtores de cimento, apontou o Brasil como o que apresenta um dos menores potenciais de consumo de energia, considerando as melhores tecnologias existentes (SNIC, 2011; SNIC, 2010).

Especificamente na seção 2.7 desta pesquisa, se apresenta o impacto ambiental gerado pelos resíduos de construção. O Brasil possui legislação restritiva (RESOLUÇÃO Nº 307, 2002; LEI Nº 12.305, 2010), inclusive adotando a “logística reversa” como forma de reduzir as emissões de gás carbônico na indústria do cimento, o impacto ao meio ambiente e orientação através de normas técnicas sobre a disposição e manuseio deste agente poluidor.

O presente trabalho tem por objetivo principal estudar a contribuição dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para a mitigação do dióxido de carbono

atmosférico, investigando o impacto ecológico de sua capacidade de sequestro de CO₂ e as iniciativas da indústria do cimento para reduzir as emissões desse gás na composição do efeito estufa. Como objetivo secundário, busca quantificar de forma teórica e experimental a contribuição das operações unitárias de absorção (retenção na água por solubilidade) e adsorção (retenção no sólido) do CO₂ pelo RCD.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na década de 90, pesquisadores mostraram como o dióxido de carbono pode ser transformado em um fluido supercrítico e injetado no concreto para torná-lo mais forte, mas o uso intensivo de energia inviabilizou o processo. Na área petrolífera, os resultados do uso de CO₂ supercrítico, relativo a ataques químicos, não apresentaram bom desempenho. Em compensação, utilizando alguns tipos de cimentos específicos, apresentou resultados satisfatórios à resistência mecânica (HASTENPFLUG *et al.*, 2010).

No Canadá está em desenvolvimento uma tecnologia que promete sequestrar CO₂ expondo os produtos pré-moldados de concreto aos gases de combustão durante o processo de cura. A equipe acredita poder armazenar 60 toneladas de dióxido de carbono como pedra calcária - ou carbonato de cálcio - dentro de cada 1.000 toneladas de concreto produzido (TECHNOLOGY REVIEW, 2008; HAMILTON, 2008).

O pesquisador Toledo Filho (QUÍMICA, 2011) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Labest/COPPE/UFRJ, propõe a fabricação de um cimento capaz de "sequestrar" do ar o dióxido de carbono. Aproveita o dióxido de carbono atmosférico para promover o endurecimento controlado do material. O processo é feito dentro de uma câmara, combinando o CO₂ com o Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio) do material cimentício, de maneira que forme o CaCO₃ (carbonato de cálcio).

Uma Pesquisa desenvolvida na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP (QUINTO, 2010) apresenta um tipo de cimento à base de óxido de magnésio, chamado de cimento magnesiano. Conhecido desde 1867 o alto custo deste material inviabilizava sua utilização. Segundo QUINTO (2010), o produto apresenta menor emissão e maior captura de CO₂. MARTINELLI JÚNIOR (2010) vem utilizando as cinzas de casca de arroz para produção de cimento com o intuito de minimizar as emissões de CO₂ na fabricação do aglomerante.

Em 2011, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP, foi produzido um concreto de alta resistência, com menor impacto ambiental e custo reduzido, onde a pesquisa teve como objetivo buscar tecnologia que possibilitasse um concreto autoadensável, com baixo consumo de cimento Portland, e de alta resistência. O problema quanto ao uso do cimento Portland em altas porcentagens é atribuir à produção de concreto a característica de vilã ambiental, pois implica na produção de 90% de gás carbônico da indústria do concreto. A intenção era produzir um concreto que utilizasse apenas 350kg/m³ do cimento Portland, bem menos do que os 500Kg/m³ de um concreto de alto desempenho tradicional. Mas os resultados encontrados foram até melhores, chegaram a apenas 325 kg/m³ de cimento (PEREIRA; LIBÓRIO, 2011).

Uma empresa com sede na Califórnia, sul dos Estados Unidos da América, apresenta um sistema que pode aproveitar 90% das emissões industriais de CO₂ para fabricação de cimento (ZAEKE; YOUNG; ANDERSEN, 2011). Com base em pesquisas realizadas na Universidade de Stanford pelo cientista Brent Constantz: para cada tonelada produzida de cimento é sequestrada 0,5 tonelada de gás carbônico. O processo é uma mimetização da forma como os corais e as conchas utilizam os carbonatos de cálcio e magnésio presentes na água do mar em temperaturas e pressões normais, onde o CO₂ é transformado em H₂CO₃ e em seguida em CaCO₃ ou MgCO₃ (ZAEKE; YOUNG; ANDERSEN, 2011; BIELLO, 2008). A tecnologia é um novo processo que utiliza salmouras alcalinas, sais minerais, materiais de resíduos alcalinos, sendo fabricado a partir de um processo eletroquímico, em combinação com salmoura ou minerais pesados dissolvidos ("Mineralização via Precipitação Aquosa") em cálcio e/ou magnésio (que não estão ligados como carbonatos) para capturar emissões de CO₂ e gases de combustão, transformando o carbono em sólidos de carbonato geologicamente estáveis na forma de líquidos ou pós-desidratados adequados para o armazenamento ou uso em materiais de construção.

Pesquisas realizadas, principalmente na Europa, apresentam a Captação e Armazenamento de Carbono (CCS) como uma alternativa promissora. A técnica consiste em isolar o CO₂ de uma corrente de gás e evitar sua liberação na atmosfera, armazenando-o em um reservatório geológico adequado (rochas porosas, calcárias ou arenitos, por exemplo). Usinas que utilizam energia de combustíveis fósseis são

as mais propícias na aplicação desta tecnologia (COMISSÃO EUROPEIA, 2011; EUROPA – EU WEBSITE, 2012; Oilgas: petróleo, petroquímica y gas, 2010). Vários ecologistas rejeitam este método mediante os perigos de que fatores ambientais possam afetar tais sumidouros, possibilidade da ineficácia e escape dos gases, limitações de tempo no armazenamento, efeitos negativos pela injeção de CO₂ no fundo dos oceanos, descomissionamento - pelos governos, dos agentes gestores responsáveis pelo monitoramento e funcionamento dos sumidouros (ROSAS, 2002; VILA; MONTON, 2008a).

Outra forma de diminuir as emissões de CO₂, limitando o consumo de combustíveis fósseis, é a utilização do coprocessamento de resíduos nos fornos das indústrias de fabricação de cimento (FONTOURA; MONTENEGRO, 2009a; FONTOURA; MONTENEGRO, 2009b; MONTENEGRO; SEMA, 2009). Estudos sobre a fabricação de cimento mostram que a indústria cimenteira brasileira emite 659 kg de CO₂ por tonelada produzida, contra 800 kg na média mundial (LIMA, 2010).

A comparação da emissão de dióxido de carbono a partir da construção de concreto e madeira em dois edifícios na Suécia e na Finlândia foi verificada. As estruturas de madeira, em comparação com edifícios funcionalmente equivalentes construídos com estruturas em concreto, apresentou menores emissões. Incluindo o uso de combustíveis fósseis na produção, e a substituição de combustíveis fósseis por resíduos de biomassa, material de demolição, e as reações no processo de fabricação do cimento, exigindo menos energia que o concreto (GUSTAVSSON; PINGOUD; SATHRE, 2006). O estudo não incluiu a captura de CO₂ pelos componentes cimentícios.

As pesquisas e estudos em andamento mostram que existem muitas técnicas e materiais que podem auxiliar na redução das emissões de CO₂, funcionando como “sumidouros” ou “sequestradores” de gás carbônico para a atmosfera.

2.1 Política e mitigação da emissão de dióxido de carbono

No início da Revolução Industrial, o cômego inglês Joseph Priestley, tornou-se a primeira pessoa a observar a fotossíntese das plantas - o fato delas absorverem o dióxido de carbono e liberarem oxigênio. Antes deste experimento, já havia iniciado os estudos das principais características do gás carbônico, inclusive desenvolvendo o uso da água gaseificada (carbonatada).

Com o aumento no consumo de energia, associada às atividades urbano-industriais e mais tarde a necessidade de crescimento econômico dos países, caracterizam as emissões antropogênicas pela formação e concentração de núcleos de poluentes, principalmente pelo uso do carvão.

Em Estocolmo, Suécia, aconteceu em 1972 a primeira conferência da Organização das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente. O encontro não apresentou grandes avanços. Realizado em plena guerra fria, os países dos blocos socialistas e capitalistas não chegaram a definir políticas de controle, de efetivo aconteceu à criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Em 1988, James Hansen, um cientista da NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos), ao depor no Congresso Americano, causou grande preocupação ao anunciar que a temperatura da Terra estava subindo pelo aumento das emissões de gás carbônico, e apontava como principais culpados: a queima de combustíveis fósseis (carvão e petróleo) e os desmatamentos, principalmente através de grandes queimadas, não houve contestação. Afinal, naquele ano, os americanos enfrentaram um de seus piores verões (DEL PINO; KRÜGER; FERREIRA, 2011). Fato que se repetiu em julho de 2012.

O que parecia até os anos 90 pura ficção científica ou surto de alarmistas começou a ser discutido mais seriamente a partir de 1995 no encontro sobre mudanças climáticas em Berlim. Sendo que o ponto de partida foi dado na Eco-92, no Rio de Janeiro, nesse encontro foi criada a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC em inglês) e a assinatura da Agenda 21 - um plano de metas para a melhoria das condições ambientais nos países, estados e municípios ("Pensar Globalmente, agir localmente"). Esses primeiros encontros mostraram a necessidade da modelagem referente ao clima de todo o planeta, com

o intuito de anteciparem eventos e investigações científicas sobre emissão de poluentes, efeito estufa, derretimento de glaciais, etc.

No entanto, nos anos de 1993 e 1994 dados obtidos pela agência espacial americana mostraram que o nível dos gases que provocam esse fenômeno diminuiu na atmosfera. A expectativa era que houvesse um acréscimo no ritmo de crescimento desse gás, dentro das previsões de estudos realizados (modelagem matemática). O gás carbônico, que é apontado como principal responsável pelo aquecimento global - passou a ter sua curva de ascendência diminuída, bem como outros gases como o metano, o clorofluorcarboneto (CFC) e o monóxido de carbono, também, apresentaram queda. Na época, o coordenador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Volker Kirchhoff comentou que: “Essa é a mais nova incógnita da ciência”. Fato este comprovado, também, pelas universidades de Oregon e Califórnia e a Administração Nacional dos Oceanos e Atmosferas (NOAA). Na época os cientistas se dividiram acreditando que o fenômeno era passageiro ou que teria sido atingido um ponto de equilíbrio (DEL PINO; KRÜGER; FERREIRA, 2011).

Alguns fatos poderiam ter contribuído para explicar esse decréscimo, por exemplo: a crise econômica da União Soviética ou a queda de produção na indústria mundial. Outras hipóteses podem ser associadas, como exemplo: a atividade biológica ou química nos oceanos, o oceano funcionando como uma "Bomba física e biológica" (CASTRO *et al.*, 2010).

Em 2002, acontece outro encontro, desta vez na África do Sul. Desses encontros são definidos tratados, convenções e protocolos, como o de Kyoto. Principal instrumento onde os países desenvolvidos se comprometem a reduzir as emissões, mais especificamente o gás carbônico em 5% em relação aos níveis de 1990. As mudanças climáticas já haviam sido motivo de discussões na Convenção sobre a Mudança do Clima em 1992, mas com pouco efeito em relação aos países signatários.

É importante salientar que os principais opositores em relação às metas do Protocolo de Kyoto foram China, Estados Unidos e Rússia. Somente em 2005, com a assinatura da Rússia foi atingido o patamar de 55% dos países signatários. Durante a 15ª Conferência da ONU sobre Clima (COP 15), os resultados alcançados ficaram muito aquém dos objetivos esperados. Um novo acordo vinculante a todos

os signatários não foi concretizado, tendo sido possível somente a assinatura do chamado Acordo de Copenhague. Neste acordo, ratifica-se o compromisso de se limitar o aumento de temperatura em 2°C (IPEA, 2011). Ao final de 2011, em Durban - África do Sul, na 17ª Conferência das partes (COP-17) o protocolo de Kyoto foi estendido até 2017.

Na Rio+20, as questões sobre mudanças climáticas não tiveram tratamento específico, a conferência tratou de Desenvolvimento Sustentável como um todo. Logo, a conferência não resolveu diretamente questões de outros processos formais na ONU, como as convenções e protocolos já em andamento. O Brasil é um dos países que poderia perder com o aquecimento global, colocando em risco a floresta amazônica, portanto precisa mudar de lado nas negociações sob o clima e assumir metas nessas convenções (e não só internamente) se empenhando em convencer a China e Índia a fazer o mesmo (FEARNSIDE, 2009).

Sendo o gás carbônico imprescindível para a manutenção da temperatura e vida na terra o conhecimento e sua influência no clima é muito mais complexo do que estudos parciais ou abordagens primárias podem supor e as soluções passam por discussões políticas entre blocos econômicos.

2.2 Efeito Estufa, Ciclos Geológico e Biológico do Carbono

Da luz solar incidente, 25% são refletidas pelos gases do efeito estufa, 25% são absorvidas e compõe, em conjunto com a emissão de 29% dos processos atmosféricos e 16% da diferença entre a radiação terrestre e o efeito estufa, pouco mais de 70% da emissão de infravermelho que deixa a terra, 45% da luz é absorvida e 5% é refletida pela superfície da terra. Na Figura 1 apresenta-se uma versão simplificada do fenômeno.

O efeito estufa é responsável pela existência da vida na terra. Sem ele, a temperatura na superfície do planeta seria da ordem de - 40°C. Portanto, o objetivo não é eliminar o efeito estufa, mas sim mantê-lo equilibrado de tal forma que a temperatura se mantenha nos níveis adequados a Biota.

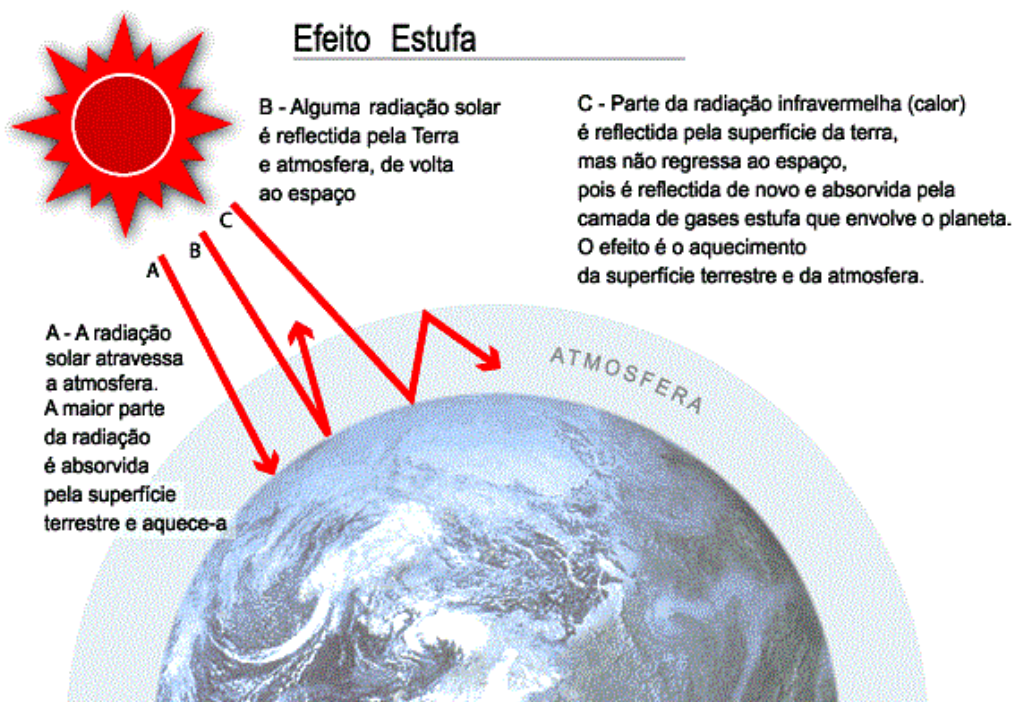
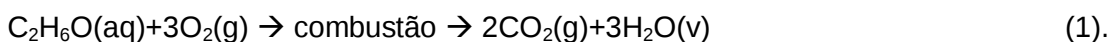


Figura 1: Apresentação esquemática do efeito estufa (PUC MINAS, 2011).

A temperatura média do planeta é de 33°C, sendo que o vapor de água é responsável por 60% e o CO₂ responsável por 21,2% do total, o ozônio acrescenta 2,5°C, o metano 0,8°C, o óxido nitroso e derivados 1,4°C e os demais gases 0,6°C, o crescimento da contribuição do metano foi de 150%, o dióxido de carbono 36% e os óxidos nitrosos 18%, desde o início da era industrial (NOBRE; REID; VEIGA, 2012).

Dos gases do efeito estufa (GEE), a água na forma de vapor existente na atmosfera possui ciclo rápido de renovação e é responsável por 60% a 70% do efeito estufa, detalhado na Figura 2. Segundo HIEB (2006), o vapor de água corresponde a 95%. No entanto, não é incluído nos estudos ambientais, pois as atividades humanas pouco interferem com ele. Porém, a construção de barragens e o uso do etanol como combustível de automóvel (Equação 1), bem como os novos catalisadores instalados nos automóveis, contribuem para a formação do vapor de água.



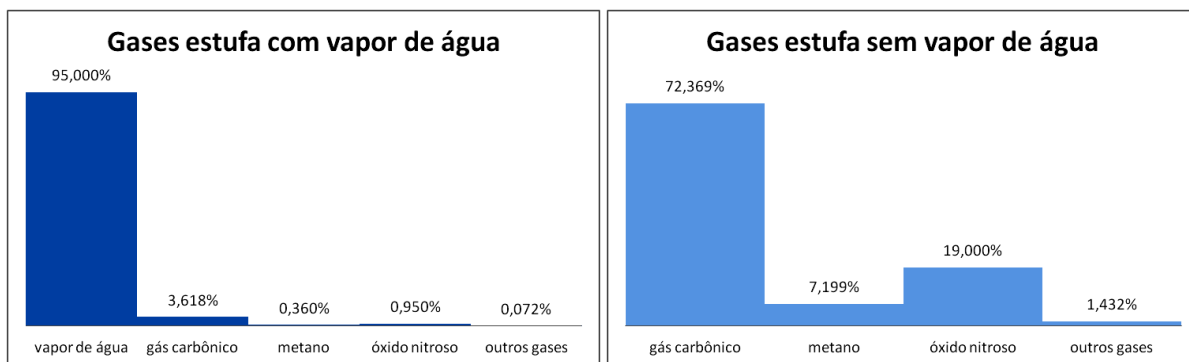


Figura 2: Contribuição para o efeito estufa (fontes naturais e artificiais) (HIEB M; HIEB H, 2006).

Em relação a construção de barragens, existe grande controvérsia a respeito das emissões de CO₂ após a passagem da água pelas turbinas, e que podem contribuir mais para o efeito estufa que cidades como São Paulo (De FRANÇA, 2010).

O segundo fluido em volume é o CO₂, sendo apontado como principal responsável pelo aumento do efeito estufa. Por isso, o ciclo do carbono é fundamental para o entendimento desse processo. Praticamente todas as atividades humanas liberam CO₂ para a atmosfera e apenas a fotossíntese é capaz de retirar este carbono do ar.

O carbono é o quarto elemento mais abundante no universo e é a base da vida que se conhece e circula na terra em um grande ciclo biogeoquímico. Este grande ciclo é composto por dois tipos; o geológico e o biológico. Os três maiores reservatórios de CO₂ na terra, estimativa média entre autores, são o terrestre com cerca de 20.000 Gt, o atmosférico com 750 Gt, e os oceanos com 40.000 Gt. As rochas são os maiores depósitos de carbono e normalmente não são inseridos no cálculo do ciclo do carbono.

O ciclo geológico opera numa escala de tempo de milhões de anos.

O carbono encontra seu caminho para as águas continentais e os oceanos como bicarbonato resultante da carbonatação de rochas ricas em calcário, conforme expresso na Equação 2 (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007).

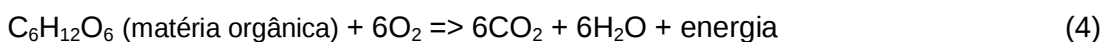
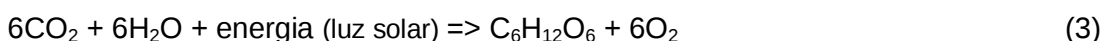


Algumas dessas rochas são arrastadas para o centro da terra através do movimento da crosta terrestre. Neste processo, elas são submetidas a elevadas

temperaturas e pressões e liberam o CO_2 para a atmosfera através de erupções vulcânicas.

O ciclo biológico do carbono é mais rápido, renovando o estoque atmosférico em aproximadamente 20 anos. A fotossíntese e a respiração são as reações opostas que imperam no ciclo global do carbono, sendo predominantemente gasoso, o CO_2 é o principal veículo entre a atmosfera, hidrosfera e a Biota.

Estes dois processos ocorrem conforme as Equações 3 (Fotossíntese) e 4 (Respiração).



De uma forma bastante simplificada, representado em um fluxograma da Figura 3, pode-se observar o processo descrito do ciclo do carbono.

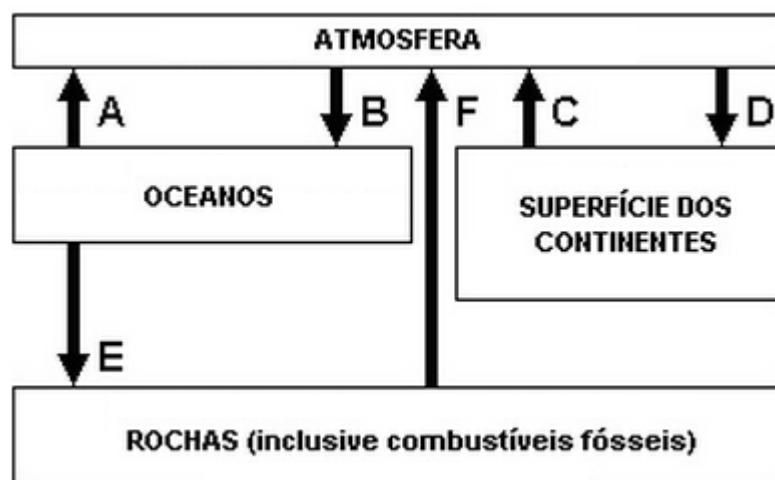


Figura 3: Ciclo do Carbono simplificado. Troca rápida entre a atmosfera e o oceano é representada por A e B, as emissões terrestres (inclusive fabricação de cimento) e absorção pelas florestas são verificadas por C e D, a emissão da queima de combustíveis fósseis é indicada pela letra F, absorção pelo fundo dos oceanos se apresenta pela letra E. (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007).

A queima de combustíveis fósseis e a produção de cimento emitem $5,7 \pm 0,5 \text{ GtC/ano}$, dessas emissões cerca de $2,1 \pm 0,6 \text{ GtC/ano}$ se dissolve nos oceanos; logo existe uma sobra de $3,6 \pm 0,4 \text{ GtC/ano}$, representando cerca de 3% da liberação natural pela respiração da biota (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007).

A biota absorve cerca de 102 GtC/ano de CO_2 durante a fotossíntese, isto representa cerca de 14% do teor total de CO_2 da atmosfera. Em contrapartida a biota devolve anualmente cerca de 30 Gt de carbono à atmosfera. A decomposição

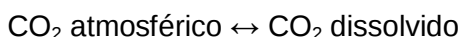
bacteriana de matéria vegetal morta, acrescenta mais 50Gt de carbono ao CO₂ devolvido à atmosfera. Há portanto certo equilíbrio no carbono trocado entre a biota terrestre e a atmosfera, sendo retidas por ano talvez 2Gt de carbono na biota terrestre. Nos oceanos o CO₂, absorvido da atmosfera, em decorrência de processos tanto químicos como biológicos é recebido em solução sob a forma de íons de bicarbonato enquanto os fitoplânctons são sorvedores de dióxido de carbono em decorrência da fotossíntese, cerca de 92GtC/ano é absorvido da atmosfera desta maneira. Das águas superficiais, aproximadamente 90GtC/ano são devolvidas à atmosfera, logo ficam retidas cerca de 2Gt/ano nos oceanos. Sendo assim, sem interferência humana, o carbono na natureza estaria em equilíbrio, sendo que o excedente de carbono que fica armazenado voltaria à natureza pela ação dos vulcões. Entretanto a ação do homem desequilibra este ciclo, desde a revolução industrial. Em outras palavras, desde 1860 (portanto 152 anos até o ano de 2012), os seres humanos lançaram cerca de 175Gt de carbono na atmosfera (SOUSA, 2012).

2.2.1 Oceanos

No oceano aberto os principais transformadores de carbono inorgânico dissolvido, principalmente o dióxido de carbono, são: o fitoplâncton pequeno que recicla o CO₂ na zona próxima a superfície e a luz solar, o plâncton maior gera a maior parte do fluxo de carbono para o fundo do oceano sob forma particulada e orgânica dissolvida (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007), resultando na chamada "bomba biológica". No ambiente litorâneo a importância do fitoplâncton é relevante, principalmente pelas altas concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) proveniente do ambiente terrestre (De FRANÇA, 2010). Os lagos são reconhecidos como importantes acumuladores de matéria orgânica, formados em instalações hidrelétricas também contribuem para o armazenamento de COD (De FRANÇA, 2010). SANTOS *et al.* (2008) admitem que emissão de CO₂ pode ser originada da atmosfera e ser incorporada ao lago do reservatório pelo ciclo natural de carbono de curta duração (MATVIENKO, 2009).

O processo físico, chamado de "bomba física dos oceanos", combina-se com a água para formar o ácido carbônico que, ao reagir com íons carbonato existentes, formam hidrogenocarbonatos (p. ex., bicarbonatos). Devido a esta reação, o dióxido

de carbono é pouco abundante na água do mar. Os níveis de CO_2 na água do mar são, então, tão baixos que o dióxido de carbono atmosférico pode entrar nos oceanos. Este fenômeno é explicado pelo Princípio de Le Chatelier, conforme Equação 5.



Se a água permanece à superfície e aquece quando viaja pelo globo terrestre, o dióxido de carbono voltará rapidamente para a atmosfera. Mas, se a água desce para as profundezas oceânicas, o CO_2 permanecerá mais tempo dissolvido, devido a temperaturas menores e maior pressão (Lei de Henry) permanecendo armazenado por centenas de anos antes que a circulação oceânica o faça subir à superfície de volta a atmosfera. As águas frias descem para o fundo do oceano nas altas latitudes no Oceano Austral e nos Mares do Norte e do Labrador no Oceano Atlântico Norte. Estas zonas representam as principais regiões onde o dióxido de carbono é absorvido pelo oceano através dos processos físicos.

O Brasil é um país importante para as investigações a respeito da liberação de gases de efeito estufa, em seu território se encontra grande parcela dos ecossistemas aquáticos e florestas do planeta, tendo importante papel sobre o fluxo de carbono global (De FRANÇA, 2010; ENRICH-PLAST; PINHO, 2008).

Os oceanos possuem basicamente 35 gramas de sais dissolvidos em cada litro de água, sendo a maior parte cloreto de sódio (NaCl). Salinidade igual a 35 (adimensional).

Os sais na água se dissociam em íons. Maior salinidade corresponde maior condutividade.

Principais íons salinos na água do mar, em massa, são: cloreto (Cl^-) com 55%, sódio (Na^+) com 31%, sulfato (SO_4^{2-}) com 7,7%, magnésio (Mg^{+2}) com 3,7%, Cálcio (Ca^{+2}) com 1,2% e Potássio (K^+) com 1,1%, composição determinada entre a média de autores consultados.

A quantidade de gás que se pode dissolver na água do mar é determinada pela temperatura e salinidade da água. Aumentando-se a temperatura ou a salinidade reduz-se a quantidade de gás que pode ser dissolvido (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007).

A quantidade de gases num dado volume de água permanecerá inalterado, exceto pelo movimento das moléculas desses gases através da água, difusão (processo lento), ou pela mistura da água com outras massas de água que contêm diferentes teores de gases dissolvidos.

Nitrogênio e gases raros ou inertes (argônio, hélio e outros) comportam-se dessa maneira. Suas concentrações são conservativas e somente afetadas por processos físicos. O oxigênio e o dióxido de carbono são gases dissolvidos e não conservativos participando ativamente dos processos químicos e biológicos que modificam suas concentrações, e que podem ser liberados em várias concentrações nos oceanos, e principalmente utilizados pelos organismos.

2.2.2 Inventário de emissões

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo realizou o inventário de emissões de gases do efeito estufa nos setores de energia, processos industriais (incluindo cimento e cal), agropecuária, uso e mudança do uso da terra, resíduos sólidos e efluentes líquidos. A Figura 4 apresenta o monitoramento dos últimos 18 anos no estado.

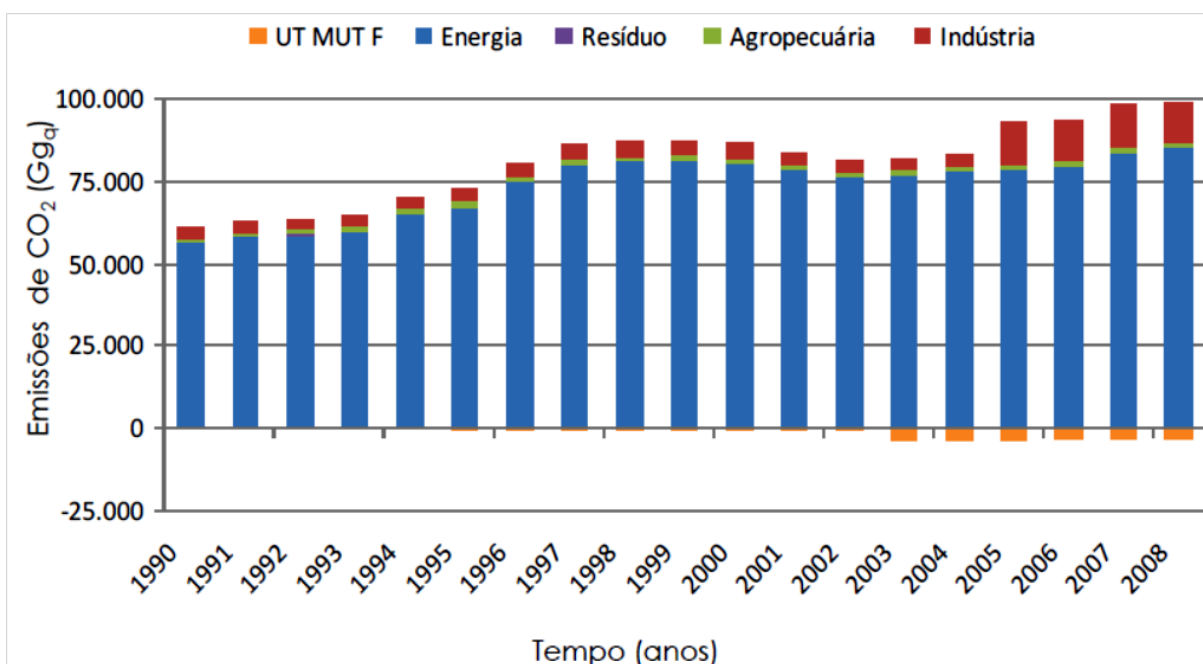


Figura 4: Total de emissões anuais de gás carbônico por setor no estado de São Paulo (CETESB, 2011a).

O setor industrial reduziu, entre os anos de 2005/2008, as emissões em 1,4%, em compensação o setor de energia aumentou as emissões, no mesmo período, em 1,5%, enquanto o setor agropecuário permaneceu com o mesmo percentual. Nos trabalhos publicados verifica-se o aumento de 6% no total de emissões. A participação do estado de São Paulo em relação às emissões brasileiras pode ser verificada na Figura 5, onde o setor industrial contribui com 26,4% do CO₂ equivalente (CETESB, 2011a; CETESB, 2011b; CETESB, 2011c; CETESB, 2011d; CETESB, 2011e; CETESB, 2011f; CETESB, 2011g; CETESB, 2011h; CETESB, 2011i; CETESB, 2010a; CETESB, 2010b; CETESB, 2010c; CETESB, 2010d; CETESB, 2010e; CETESB, 2010f; CETESB, 2010g; CETESB, 2010h; CETESB, 2010i; CETESB, 2010j).

Segundo MORAIS (2007), o desenvolvimento e expansão de setores como transportes, siderurgia, extração de minério e petróleo contribuiu decisivamente para o aumento das emissões de CO₂ no período de 1990 e 2003.

O setor automobilístico apresentou expansão no período de 2008 a 2011, (APÊNDICE 1). Porém, segundo informações do engenheiro Paulo César da CETESB (2012), e CETESB (2011h) a taxa de emissões de poluentes de veículos automotores apresentou redução significativa no período de 1990 a 2008 no estado de São Paulo. O APÊNDICE 1 apresenta uma tendência de crescimento em 2012 de, no mínimo 111.000 veículos/mês, valor de 2009, no estado de São Paulo (DETRAN/SP, 2012). Segundo informações da CET (2012), existem cerca de 100.000 veículos circulando diariamente pelas ruas do município de Santos, de uma frota licenciada de 272.139 veículos (dez/2010).

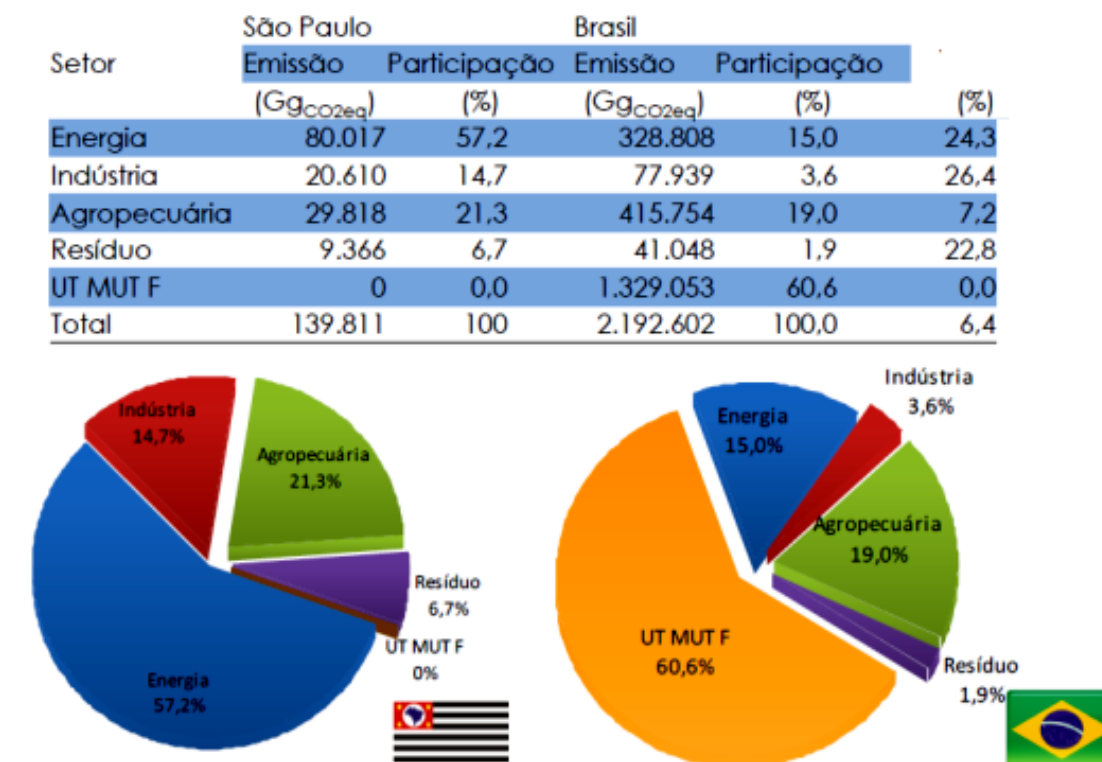


Figura 5: Emissões de GEE do Brasil e do Estado de São Paulo em 2005 (CETESB, 2010j).

A produção de cimento total do estado, em 2005, apresentou 6,4% das emissões de CO_{2eq} (gás carbônico equivalente) brasileiro. Comparando com o PIB (Produto Interno Bruto) no período, São Paulo contribuiu significativamente (33%) e o total de 0,14tCO_{2eq} para cada R\$1.000,00 produzido, emitindo menos que a média nacional de 0,72tCO_{2eq} para cada R\$1.000,00 (CETESB, 2011a).

2.2.3 Programa Nacional de Redução de Emissões de GEE

O Programa Brasileiro GHG Protocol, lançado em 2008, cujo objetivo principal é a elaboração e publicação de inventários corporativos de GEE (Gases do Efeito Estufa) tem como principais atividades: desenvolver metodologias e ferramentas para capacitar empresas e organizações, promover intercâmbio de informações entre instituições públicas e privadas e o registro público de emissões de GEE em um banco de dados nacional. No biênio 2008/2009, foram publicados 23 inventários e foram elaboradas as especificações do programa. Em 2010, foram publicados as especificações e o lançamento do registro público de emissões de GEE, 35 novos inventários foram publicados e iniciados os foros setoriais de discussão. Em 2011, mais 70 inventários foram publicados e a criação dos grupos de trabalhos temáticos.

Como principal realização foi definida as metodologias para disposição, tratamento e descarte de resíduos e ferramentas de cálculo de emissões.

Os inventários corporativos buscam determinar as emissões diretas e indiretas, para se mensurar os impactos climáticos da operação de uma organização. A Análise de Ciclo de Vida (ACV) considera todas as atividades de um produto/serviço ao longo de sua vida (conceito do berço ao túmulo e pegada de carbono do produto). A construção civil, através da CSI, apresenta uma iniciativa para o cimento sustentável (WBCSD) na redução das emissões do setor, na busca de combustíveis alternativos (queima de pneus, p.ex.), aumento da eficiência produtiva e participa do Programa Brasileiro GHG Protocol no inventário das emissões de GEE que compõem a cadeia produtiva de suas organizações e o acompanhamento da discussão de protocolo setorial (KISS, 2011).

2.3 Técnicas de Tratamento de Gases

Basicamente quatro tecnologias físico-químicas de controle são usadas para componentes gasosos: absorção, adsorção, condensação e incineração (combustão) e uma biológica: biofiltração. A escolha da tecnologia de controle depende do(s) componente(s) (ou gases) que devem ser removidos, a eficiência de remoção requerida, as características de fluxo do gás, e as características específicas do local. Absorção, adsorção, condensação são técnicas de recuperação enquanto a incineração envolve a destruição do componente (RODRIGUES, 2002).

Adsorção é a ligação de moléculas ou partículas a uma superfície (por polaridade, forma e massa molar – força motriz). Os adsorventes mais comuns são: os ativados de carbono, gel de sílica e alumina, possuindo enormes áreas de superfície por unidade de peso. Carvão ativado é o padrão universal para a purificação e remoção de vestígios de contaminantes orgânicos de fluxos de líquidos e vapores. Utiliza-se carvão ativado para controlar e ou recuperar as emissões de componentes gasosos, promovendo a aderência do gás à superfície porosa do carvão ativado, alcançando por meio desse processo de remoção, eficiência de 95% a 99%. Adsorção de carbono é usada nos casos em que os componentes orgânicos recuperados são valiosos. Por exemplo: a adsorção de carbono é frequentemente usada para recuperar percloroetileno (C_2Cl_4), um composto utilizado no processo de limpeza a seco e desengraxe de metais. A técnica clássica para se obter a

capacidade de adsorção de um fluido em um sólido, é que emprega a denominada curva de ruptura “breakthrough curve”. Consiste basicamente em fixar uma concentração de entrada (C_0) do fluido em uma coluna com o sólido na forma de partículas, e analisar a concentração do fluido na saída (C) em função do tempo (RODRIGUES, 2002; MC CABE; SMITH; HARRIOTTI, 2005; MORAES Jr., D.; MORAES, M. S., 2012).

A absorção é um processo no qual um gás, não necessariamente poluente, é retido em um líquido por solubilidade (força motriz). A água é o líquido mais usado como absorvente, o fluxo de gás passa através do líquido que absorve o gás. Absorção é comumente usado para recuperar produtos ou para purificar fluxos de gás que têm altas concentrações de compostos orgânicos. A escolha de equipamentos depende do custo, características do gás a ser absorvido, espaço ocupado pelo equipamento, concentração do gás, etc. Os tipos de equipamentos de absorção de gás incluem torres de “spray”, colunas de enchimento, câmaras de “spray” e absorvedor de alto contato. A coluna de recheio (enchimento) é a mais utilizada para a absorção de gases. O absorvente tem uma coluna cheia com uma substância inerte (não reativo), tais como plástico ou cerâmica, o que aumenta a área de superfície do líquido para a interface líquido gás. O material inerte ajuda a maximizar a disposição de absorção da coluna. Além disso, a entrada do gás e líquido em extremidades opostas da coluna faz com que a mistura seja mais eficiente por razão do fluxo contracorrente através da coluna. Em geral, podem alcançar eficiências de remoção de 95%. Um problema potencial com a absorção é a geração de águas residuais, demudando um problema de poluição do ar para a poluição da água. No caso do gás carbônico (CO_2) os absorventes mais eficazes são: água, metanol e polietileno glicol (RODRIGUES, 2002; MC CABE; SMITH; HARRIOTTI, 2005).

A concentração de saturação ou de equilíbrio de um gás dissolvido em um líquido é uma função da pressão parcial do gás adjacente ao líquido. Esta relação é dada pela Lei de Henry (Equação 6) (TCHOBANOGLOUS, 1991).

$$P_g = H \cdot x_g \quad (6)$$

Sendo:

P_g a pressão parcial do gás em atm;

H a constante de Henry;

$0,104 \cdot 10^4$ atm/fração molar a 10°C, CO₂;

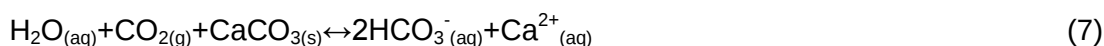
$0,142 \cdot 10^4$ atm/fração molar a 20°C, CO₂;

$0,186 \cdot 10^4$ atm/fração molar a 30°C, CO₂;

x_g a fração molar do gás dissolvido.

2.4 Carbonatação

As rochas calcárias representam o maior reservatório mundial de carbono, com uma superfície estimada de 12% de todo o planeta. Os processos de dissolução de carbonato consome o CO₂ para produzir íons bicarbonato e outros, agindo como um dissipador para o gás carbônico. Estudos sugerem que estes processos geoquímicos podem contribuir para captura de 3 a 8% do saldo anual de carbono em ecossistemas carbonatados, como mostra a Equação 7 (SERRANO-ORTIZ *et al.*, 2010).



No concreto a carbonatação acontece pela penetração do dióxido de carbono nos poros superficiais umedecidos, comumente chamados “frente de carbonatação”. A reação química entre o CO₂ dissolvido na água e os produtos de hidratação do cimento, tais como o hidróxido de cálcio, resultam em carbonato de cálcio e água, Equação 8, (CHUN; NAIK; KRAUS, 2007). Nesta reação o pH do concreto, valor próximo ou igual a 12, diminui – podendo chegar a 8 ou 7, este efeito da carbonatação dá lugar a uma diminuição do diâmetro dos poros devido a precipitação do carbonato, conseqüentemente absorvendo menos CO₂. Os principais fatores que influem no processo de carbonatação são sua porosidade, quantidade e tipo de cimento, adensamento, tempo de cura e a relação água cimento, bem como as condições ambientes. (GARCIA *et al.*, 2010).



Concretos com aproximadamente 30 anos de idade, mas porosidade e tratamento superficial diferentes apresentaram resultados de penetração da frente de carbonatação significativas, ANEXO 1 e Figura 6. Foi verificado que a porosidade superficial, consumo de cimento e condições de exposição são determinantes na

captura do gás carbônico. O concreto dos postes de iluminação da Praia de Santos (Figura 1 ANEXO 1) apresentaram carbonatação indicada pela estatística descritiva e teste t, sendo verificado o pH de $10,58 \pm 0,08$ a 5mm de profundidade da superfície e pH $11,58 \pm 0,11$ a 25mm de profundidade (próximo ao pH controle), mostrando a existência de carbonatação diferenciada que variou com a profundidade do furo, para controle foi utilizado o pH do cimento. O concreto da Figura 6, após aplicação de fenolftaleína apresentou coloração levemente carmim (indicando pH levemente alcalino), em apenas um pequeno trecho de 18mm e profundidade de 24mm da superfície.

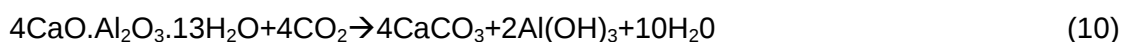
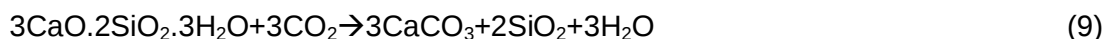


Figura 6: Concreto com idade acima de 30 anos, condições de exposição atmosférica sem proteção de revestimento. Teste de fenolftaleína.

Além de calcita, existem outros materiais na pasta de cimento que podem contribuir significativamente para a absorção do CO_2 , como o aluminato de cálcio e silicatos de cálcio (HASELBACH, 2009; LAGERBLAD, 2005).

CHUN; NAIK; KRAUS (2007) apresentaram em seu estudo, o cálculo estequiométrico da hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio na reação com o CO_2 , Equações 9 e 10. A influência da cura, também foi demonstrada. O concreto curado na câmara de CO_2 mostrou aproximadamente a mesma resistência à compressão e uma resistência mais baixa à abrasão (perda de massa), o concreto curado na sala de secagem, sem carbonatação suficiente, mostrou a menor

resistência à compressão e à abrasão (maior perda de massa), concluindo que a cura inicial satisfatória antes da exposição a uma condição acelerada de carbonatação, pode ter melhor resultado em relação à resistência e à abrasão do concreto carbonatado.



Um ano típico de construção nos Estados Unidos da América do Norte, absorve 200.000 toneladas de dióxido de carbono, estima-se que esse mesmo concreto terá absorvido em 100 anos 2,1 milhões de toneladas de CO₂. Os resultados são significativamente diferentes para concretos com ou sem materiais cimentícios suplementares (revestimento de argamassa, p. ex.). Sendo este cálculo referente a revisão bibliográfica publicada nos EUA (GAJDA; MILLER, 2000). Após o exame de mil amostras de concreto de todo os EUA e entrevistas com especialistas, o cálculo foi refeito, apresentando resultados de 274.000 toneladas de CO₂ absorvidos da atmosfera no primeiro ano de construção e 69,2 milhões de toneladas de gás carbônico absorvidos nos últimos 50 anos (GAJDA, 2001).

Segundo GARCIA *et al.* (2010) a absorção de CO₂ no concreto através do tempo não ficou devidamente comprovada, houve significativa diferença na idade da construção e quantidade em massa de cimento na comparação entre obras civis (pontes, viadutos, etc.) e edificações. A quantidade em massa de CO₂ absorvido em edificações, em um período de 50 anos, variou de 2,8 a 4,3kg/m³, a profundidade de carbonatação variou de 21,2mm a 24,7mm, o consumo de cimento foi de 300kg/m³ de concreto. Em relação a obras civis, em um período de 100 anos, variou de 2,9 a 5,1kg/m³, a profundidade de carbonatação variou de 15 a 20mm, sendo o consumo de cimento de 400kg/m³ de concreto. O experimento apresentou descarbonatação do concreto com diferenças não significativas, as edificações variaram de 2,3% a 3,6% e as obras civis variaram de 1,8% a 3,2%. Na África do Sul 90 pontes foram vistoriadas, com idade entre 11 e 76 anos, a profundidade de carbonatação variou de 0,3mm/ano a 0,7mm/ano. Os resultados variaram em função da localidade, devido a precipitação das chuvas, umidade relativa do ar e o tipo de cimento. Estruturas recentes carbonataram mais do que as obras civis mais antigas (ALEXANDER; MACKECHNIE; YAM, 2007). Estudo realizado na Colômbia por URIBE-RAMIREZ (2010) com corpos de prova cilíndricos em ambiente controlado,

expondo por 28 dias o concreto a uma temperatura de 30°C, 5% de CO₂ em volume e umidade relativa do ar em 65%, obteve 0,34% a 1% de absorção do dióxido do carbono no processo de reação química da cura do cimento.

Um concreto de classe 30, dosado em central (no mesmo dia), com abatimento de tronco cone (“Slump test”) de 10 ± 2 cm, com relação água/cimento de 0,60 e consumo de cimento igual a 300kg/m³ foi estudado por CAFANGE (2011), moldando corpos de prova de 10cm x 20cm e submetidos à cura acelerada por imersão em tanque com água a 35°C $\pm$ 5°C, entre 1 e 3 dias, seguida de cura a temperatura ambiente, no mesmo tanque entre 3 e 7 dias, após esse período a cura foi feita por três métodos diferentes. Os resultados há 203 dias apresentaram penetração de 4mm e 5mm de profundidade de carbonatação em todos os métodos de envelhecimento. O resultado indica que em longo prazo o microclima da região onde se encontra a estrutura não influi na absorção do gás carbônico. Resultado semelhante foi obtido com adição de escória de alto forno e cimento branco e cinza, a profundidade de carbonatação para ambos aumentou com o aumento no teor de escória, porém a absorção capilar diminuiu como consequência da diminuição do diâmetro dos poros (BARIN, 2008).

2.5 Cimento

O clínquer do cimento Portland é constituído por: óxido de cálcio (CaO) - 60 a 70%; sílica (SiO₂) - 20 a 25%; alumina (Al₂O₃) - 2 a 9%; óxido de ferro III (Fe₂O₃) - 1 a 6%; óxido de magnésio (MgO) - 0 a 2%. Esses produtos naturais são processados em britadores e moinhos e dispostos em silos, conforme ilustra a Figura 7.

A fabricação do clínquer pode ser dividida em quatro tipos de processos: via úmida, via semiúmida, via semisseca e via seca, dependendo da umidade das matérias-primas. Os fornos via seca garantem maiores eficiências energética e de combustíveis, bem como menor emissão de poluentes, principalmente o CO₂.

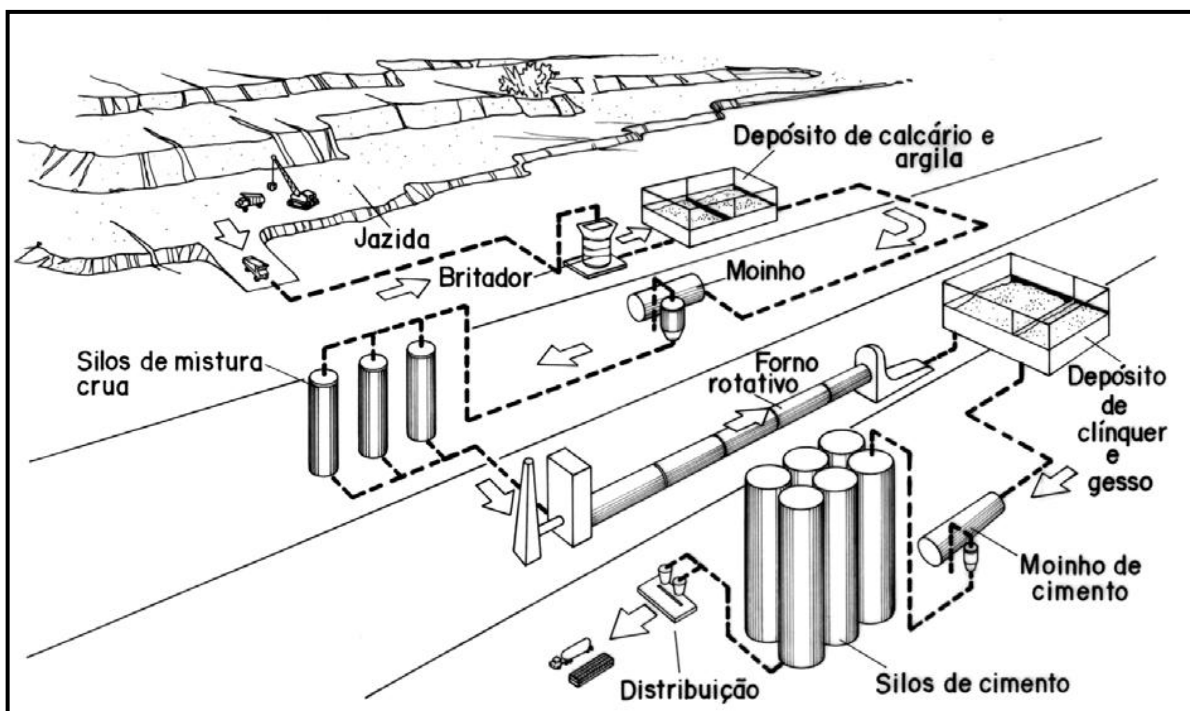


Figura 7: Esquema da Fabricação de Cimento. (A.B.C.P., 2011)

Dosados a partir da proporção total de calcário necessário para a formação de sulfatos de cálcio e a cal livre (eventual), determinam-se as proporções da cal necessária para a formação do ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), aluminato tricálcico (C_3A) e silicato bicálcico (C_2S) (BAUER, 1995).

O cálculo pode ser feito de acordo com o sistema de equações a seguir:

$$\%C_3S = 4,07 \times \%CaO - 7,60 \times \%SiO_2 - 6,72 \times \%Al_2O_3 - 1,43 \times \%Fe_2O_3 - 2,85 \times \%SO_3 \quad (11)$$

$$\%C_2S = 4,07 \times \%CaO - 7,60 \times \%SiO_2 - 6,72 \times \%Al_2O_3 - 1,43 \times \%Fe_2O_3 - 2,85 \times \%SO_3 \quad (12)$$

$$\%C_3A = 2,65 \times \%Al_2O_3 - 1,69 \times \%Fe_2O_3 \quad (13)$$

$$\%C_4AF = 3,04 \times \%Fe_2O_3 \quad (14)$$

Os componentes principais na formação do clínquer apresentados na Figura 8, são: o silicato tricálcico (alita) ($3CaO.SiO_2$ ou C_3S) responsável pela resistência em todas as idades, na proporção de 20 a 65% do produto final, o silicato bicálcico (belita) ($2CaO.SiO_2$ ou C_2S) importante no processo de endurecimento.

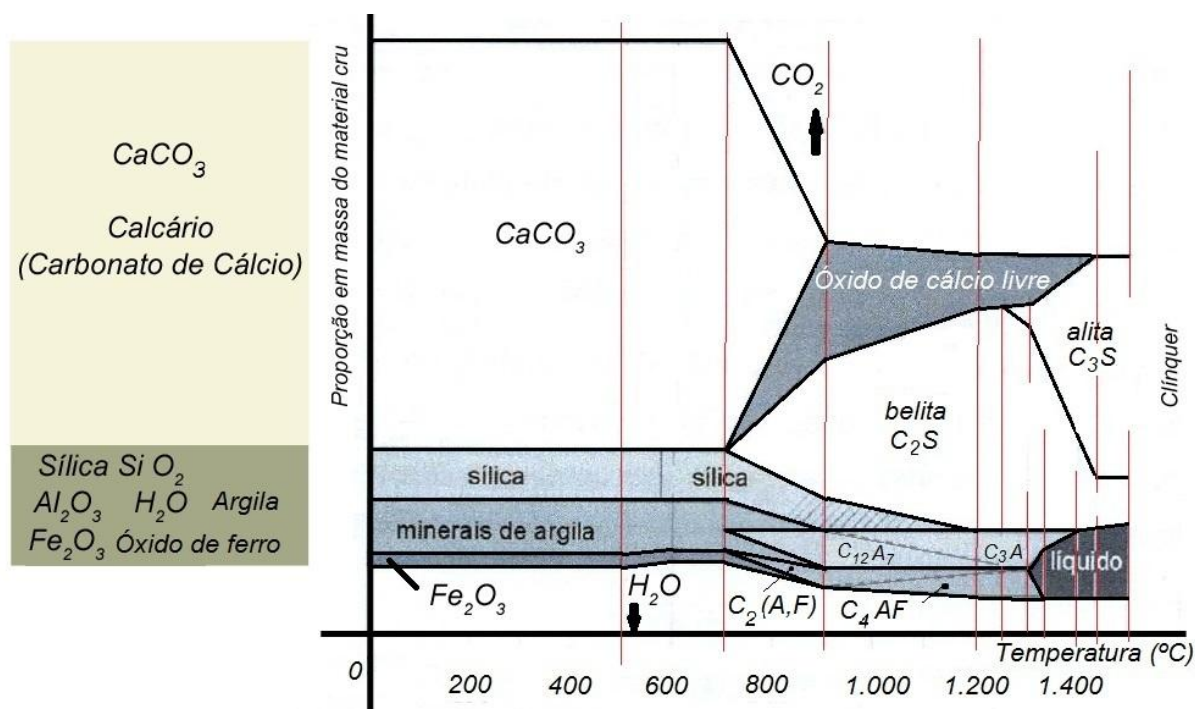


Figura 8: Principais componentes do material cru e clínquer do cimento Portland.
(TELES et al., 2010)

Para determinadas temperaturas, durante a fase de produção do clínquer, apresentada na Figura 8, existem várias alterações físico-químicas na matéria-prima, a saber:

$T > 100^{\circ}\text{C}$ - evaporação da água livre;

$100^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$ - saída da água adsorvida;

$700^{\circ} < T < 900^{\circ}\text{C}$ - Formação de óxido de cálcio (CaO) com a retirada de CO_2 ;

$T \approx 1260^{\circ}\text{C}$ - fase líquida que resulta da combinação do óxido de cálcio com o óxido de alumínio e o óxido de ferro (III);

$1260^{\circ}\text{C} < T < 1450^{\circ}\text{C}$ - formação de Alita (silicato tricálcico).

A emissão de CO_2 para a atmosfera vem tanto do processo de fabricação do clínquer, como também, da queima de combustíveis para gerar altas temperaturas no forno rotativo horizontal, apresentado na Figura 7.

2.5.1 Produção e Tipos de cimentos brasileiros

O Brasil, em 2009, foi o 4º (quarto) maior consumidor de cimento do mundo (51Mt), o maior produtor e consumidor da América Latina, importando cerca de 150kt do produto (SNIC, 2010).

O mercado nacional dispõe de 8 opções tendo como referência o cimento Portland comum (CP I), subdivididos em 11 tipos básicos de cimento disponíveis. São eles:

1. Cimento Portland Comum (CP I), sendo: CP I – Cimento Portland Comum e CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição;
2. Cimento Portland Composto (CP II), sendo: CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória; CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana e CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler;
3. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III);
4. Cimento Portland Pozolânico (CP IV);
5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI);
6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
8. Cimento Portland Branco (CPB);

São diferenciados pela proporção de clínquer, sulfatos de cálcio, material carbonácio e de adições (escórias, pozolanas e calcário), acrescentadas no processo de moagem. O próprio Cimento Portland Comum (CP I) pode conter adição (CP I-S), neste caso, de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou fíler calcário e o restante de clínquer. O Cimento Portland Composto (CP II- E, CP II-Z e CP II-F) tem adições de escória, pozolana e filer, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I-S. Já o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) contam com proporções maiores de adições: escória, de 35% a 70% (CP III), e pozolana de 15% a 50% (CP IV). Tornando o cimento brasileiro um produto de baixa emissão de CO₂ (SNIC, 2011).

- Cimento Portland Comum CP I e CP I-S (NBR 5732) muito adequado para o uso em construções de concreto em geral quando não há exposição a sulfatos do

solo ou de águas subterrâneas. Também é oferecido ao mercado o Cimento Portland Comum com Adições CP I-S, com 5% de material pozolânico em massa, recomendado para construções em geral, com as mesmas características.

- Cimento Portland CP II (NBR 11578) é modificado para gerar baixo calor de hidratação numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Seu uso é mais indicado no lançamento de grande volume de concreto e a reduzida superfície de exposição que reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. O Cimento Portland CP II-Z (com adição de material pozolânico) é empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais, bem como, para produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados. O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável. O Cimento Portland Composto CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno), tem uma composição intermediária entre o cimento portland comum e o cimento portland com adições (alto-forno e pozolânico), possui baixo calor de hidratação e boa resistência para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos, já o Cimento Portland Composto CP II-F (com adição de material carbonático - fíler), pode ser utilizado no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solocimento, dentre outros.

- Cimento Portland de Alto Forno CP III (com escória - NBR 5735), apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, e resistência a sulfatos. Vantagens no uso para obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, bases de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos. O uso de escória (70% do clínquer) confere a este tipo de cimento, Tabela 1, baixa emissão de CO₂ em sua fabricação.

Tabela 1: Efeito da substituição do clínquer por adições em diferentes cimentos brasileiros (JOHN; ANGULO; AGOPYAN, 2005).

Cimento	Adição %	Emissões (kg/t de cimento)				Efeito estufa total (t CO ₂ equivalente)
		NOx	SOx	CO ₂	Partículas	
CP II E	34	1,22	0,19	565	0,13	1.093
CP III	70	0,55	0,09	256	0,06	496
CP IV	50	0,93	0,15	428	0,10	828
CP I	0	1,85	0,30	855	0,19	1.655

- Cimento Portland CP IV (com pozolana - NBR 5736) especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta baixo calor de hidratação.

- Cimento Portland CP V ARI - (Alta Resistência Inicial - NBR 5733) com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente, é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Pode ser utilizado no preparo de concreto e argamassa, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. Essa propriedade é conseguida pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

- Cimento Portland CP (RS) - (Resistente a sulfatos - NBR 5737) boa resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. Pode ser usado em concreto de alto desempenho, obras de recuperação estrutural e industriais, concretos projetado, armado e protendido, elementos pré-moldados de concreto, pisos industriais, pavimentos, argamassa armada, argamassas e concretos submetidos ao ataque de meios agressivos, como estações de tratamento de água e esgotos, obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas.

- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) - (NBR 13116) é designado por siglas e classes de seu tipo, acrescidas de BC, por exemplo: CP III-32 (BC) é o Cimento Portland de Alto- Forno com baixo calor de hidratação. Este tipo de cimento tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento.

- Cimento Portland Branco (CPB) (NBR 12989) se destaca pela coloração, e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, resistências similares às dos demais tipos de cimento. Já o não estrutural não tem indicações de classe e é aplicado, por exemplo, em rejuntamento de azulejos e em aplicações não estruturais. Pode ser utilizado nas mesmas aplicações do cimento cinza. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, utilizando o caulim no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78% (A.B.C.P., 2011).

2.5.2 Emissões de gases estufa

Segundo (SNIC, 2011; CETESB, 2010b) aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação/descarbonatação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno.

Na Figura 9 o 2º Inventário Brasileiro de Gases de Efeito Estufa, elaborado e publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia em 2010, referente ao período de 1990 a 2005, apontou a indústria do cimento no Brasil como responsável por 1,4% do total de CO₂, percentual considerado baixo quando comparado à média mundial do setor, de aproximadamente 5 a 7% (SNIC, 2010). Estudo utilizando a metodologia setorial da “Cement Sustainability Initiative” e do IPCC (2007), abordagem Tier 3 (CETESB, 2010b), realizado no mesmo período, apresentou uma contribuição de 8% de CO_{2eq} da indústria do cimento no estado de São Paulo, que concentra 15% da produção nacional.

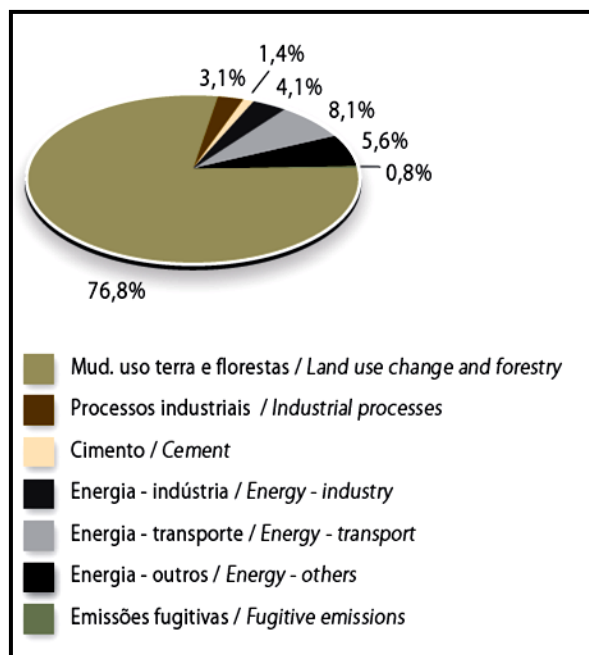
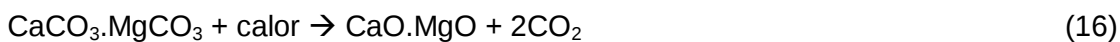


Figura 9: Distribuição da produção de dióxido de carbono (1,6 Gt) no Brasil em 2005 (SNIC, 2010).

2.6 Cal

Tradicionalmente possui muitas utilidades, sendo derivada principalmente dos calcários, dolomitos e conchas calcárias. Obtida da calcinação em fornos rudimentares ou em fornos de alta tecnologia e produção volumosa, conforme se apresenta nas Equações 15 e 16. O fluxograma apresentado na Figura 10 (GUIMARÃES, 1998), representa o refinamento da tecnologia envolvida na fabricação do mais popular aglutinante para argamassas.



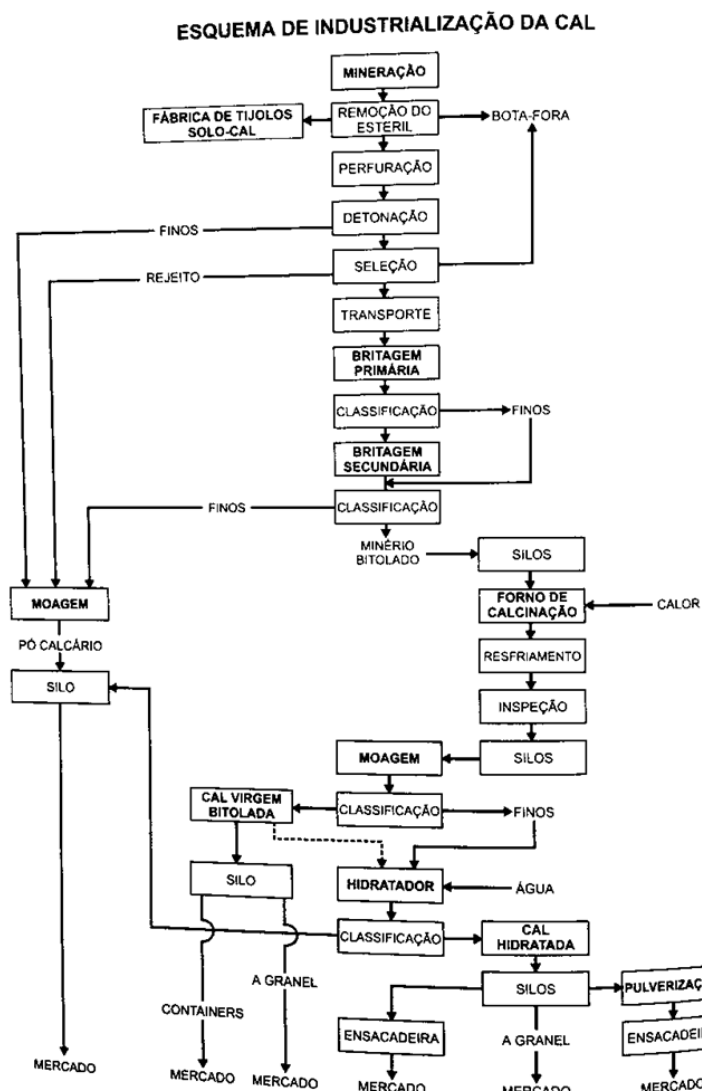
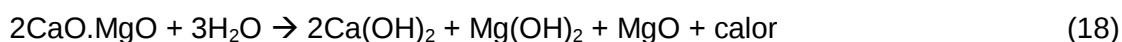
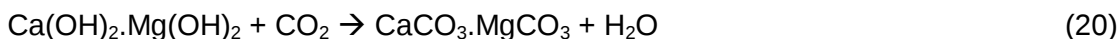


Figura 10: Esquema de industrialização da Cal (GUIMARÃES, 1998).

A cal, em seu processo de hidratação, apresenta reação química exotérmica significativa de 272kcal/kg (cales altas em cálcio) e de 211kcal/kg (cales dolomíticas), transformando-se em hidróxido de cálcio ou hidróxido de magnésio e cálcio (cal dolomítica), conforme apresentado nas Equações 17 e 18 (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2007).



No processo de cura das argamassas a base de cal, Equações 19 e 20, o dióxido de carbono é reabsorvido, transformando a cal hidratada em CaCO_3 ou $\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$ (cal dolimítica) novamente (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2007).



2.6.1 Produção e Tipos de cales brasileiras

No Brasil as reservas de rochas calcárias, de dolomitos e de conchas calcárias são superiores a 40 bilhões de toneladas (GUIMARÃES, 1998). Os estados de maior produção são: Minas Gerais, São Paulo e Paraná.

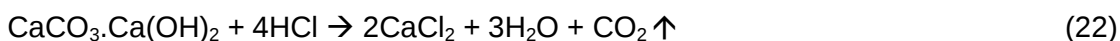
De acordo com a A.B.P.C. (Associação Brasileira dos Produtores de Cal) a produção brasileira apresentou um crescimento de 4,8% no biênio 2006/2007, (Tabela 2) e uma retração nos últimos meses de 2008, representando uma perda de 93t na produção, a retração do mercado se deveu a crise mundial – principalmente nos Estados Unidos da América.

Tabela 2: Produção da cal brasileira de 2005 a 2008 – (A.B.P.C., 2012).

Discriminação		Unidade	2005	2006	2007	2008
Produção	Calcário Bruto	1.000t	80.380	87.586	99.035	100.000
	Cal	1.000t	6.500	7.057	7.393	7.300

2.6.2 Retenção de gás carbônico pela Cal

PAIVA; GOMES e OLIVEIRA (2007), estudaram a capacidade de retenção de seis tipos de cales oferecidas no mercado de construção na região metropolitana do Recife, obtendo através da reação com ácido clorídrico, diluído em 50% - Equações 21 a 22, os valores de CO₂ variaram de 2 a 20,8%.



Em virtude do processo de cura das argamassas, pintura e revestimentos a base de cal depender da concentração de gás carbônico, a cal é comumente chamada de um produto ecológico, além de vasto campo de aplicações em processos industriais, sociais, agropecuários, etc.

2.6.3 Emissões de gases estufa

As emissões de gás carbônico provenientes do processo de produção de cal ocorrem durante a transformação da rocha calcária em cal virgem, conforme apresentado nas Equações 15 e 16. As estimativas das emissões de CO₂ de 1990 a 2008 no estado de São Paulo, Tabela 3, verifica-se um aumento de 51% nas emissões de CO₂ das cales dolomítica e magnesiana, do ano de 2008 em relação a 1990. Para a produção de cal calcítica, nota-se uma redução na emissão de 14%, devido à desativação da Cosipa em 2006 – hoje Usiminas, com influência direta sobre o clima da região (CETESB, 2011b).

Tabela 3: Estimativas das emissões de gás carbônico na produção de cal (CETESB, 2011b).

Ano	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana	Total
GgCO ₂ .ano ⁻¹				
1990	253	79	125	457
1991	250	86	136	472
1992	288	82	129	499
1993	314	85	134	533
1994	320	91	143	554
1995	335	103	163	601
1996	349	115	181	645
1997	407	171	270	848
1998	397	165	261	823
1999	339	99	156	594
2000	414	156	246	816
2001	384	154	243	781
2002	412	150	236	798
2003	419	150	237	806
2004	437	171	269	877
2005	395	153	241	789
2006	211	154	243	608
2007	222	162	256	640
2008	222	163	257	642

2.7 Resíduos de construção civil

Urbanização acelerada com 80% (IBGE, 2010) da população em área urbana e novos instrumentos jurídicos, tais como: Estatuto das Cidades, Política Nacional de Saneamento Básico e Legislação Nacional e Estadual de Resíduos Sólidos, geram mais de 250 milhões de toneladas anuais de agregados e cerca de 100 milhões de toneladas de resíduos tornando-se um entrave (para outros uma oportunidade) para o avanço da construção sustentável. A melhoria e a adoção de novos sistemas e equipamentos, aliado ao ambiente construído terá que ser transformado e a gestão dos resíduos, inevitável em qualquer processo, terá que estar presente. Segundo (PINTO, 2011), 80% em massa do total gerado pela construção civil corresponde aos resíduos do tipo classe A (ANEXO 2). Na Tabela 4 a média de 60% dos resíduos sólidos urbanos é de restos de materiais de construção.

Tabela 4: Geração de Resíduos x Cidade (PINTO, 2005).

Município	Fonte	Geração Diária (t.)	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos
São Paulo	I&T* – 2003	17.240	55%
Guarulhos	I&T - 2001	1.308	50%
Diadema	I&T - 2001	458	57%
Campinas	PMC**- 1996	1.800	64%
Piracicaba	I&T - 2001	620	67%
São José dos Campos	I&T - 1995	733	67%
Ribeirão Preto	I&T - 1995	1.043	70%
Jundiaí	I&T - 1997	712	62%
São José do Rio Preto	I&T - 1997	687	58%
Santo André	I&T - 1997	1.013	54%

* I&T – Gestão de resíduos

**PMC – Prefeitura Municipal de Campinas

Dados divulgados pela Prefeitura de São Paulo mostram que 2,5 imóveis são demolidos por dia e 600 edifícios são lançados (em média) todos os anos. Foram demolidos de 2008 a outubro de 2010, somente na cidade de São Paulo, 2.692 imóveis gerando em média 0,5t/dia de resíduos de demolição.

2.7.1 Características

Resíduos da Construção Civil – São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307, 2002).

2.7.2 Legislação

De acordo com a Resolução CONAMA 307/2002 (Anexo 02), têm-se:

CLASSE A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e do processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios fios etc.) produzidas nos canteiros de obras; (PMS, 2012).

A Figura 11 apresenta a evolução do número de cidades com gestão de resíduos após a promulgação da Resolução nº. 307/2002.

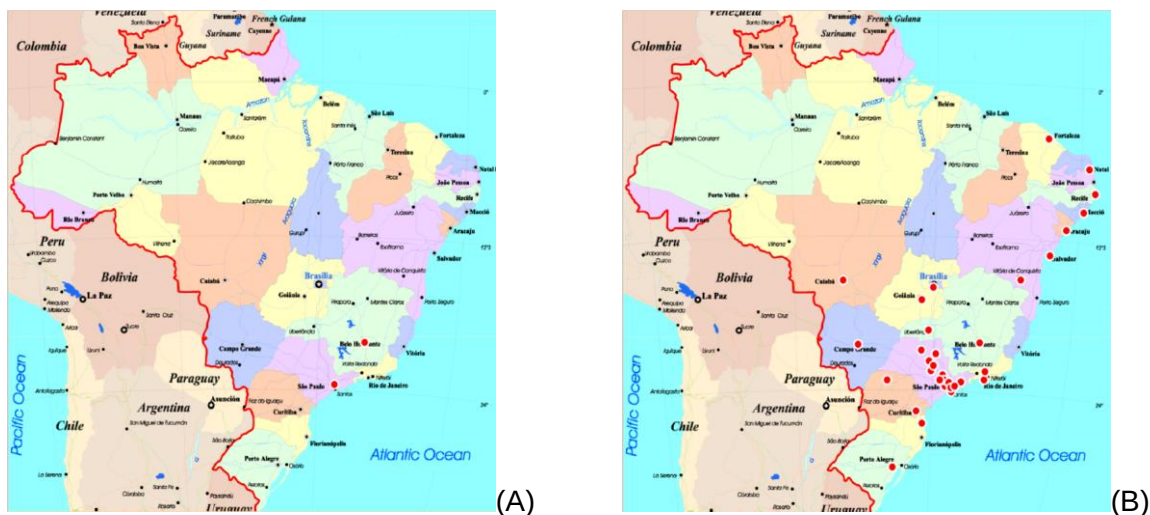


Figura 11: (A) Cidades com gestão de resíduos antes da Resolução CONAMA 307/2002 e (B) após a promulgação da Resolução (PINTO, 2011).

De forma precisa, e atendendo aos preceitos da LEI Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; estabelecendo no capítulo II, artigo 3º, inciso XII; a logística reversa como instrumento para ações, procedimentos e meios destinados

a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para destinação final ambientalmente adequada.

Determina, também, o fechamento de “lixões” até 2014 e disciplina o gerenciamento de resíduos urbanos, perigosos e industriais.

DECRETO Nº 7.404, DE 23 DE DEZEMBRO DE 2010. Regulamenta a LEI no 12.305, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa.

LEI Nº 13.798, DE 9 DE NOVEMBRO DE 2009, Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC. Seção X, artigo 12 - VI, promovendo projetos próprios ou incentivando projetos de terceiros na habitação sustentável e de eficiência energética, redução de perdas, qualidade e desempenho dos produtos, uso de materiais reciclados e de fontes alternativas e renováveis de energia.

DECRETO Nº 55.947, DE 24 DE JUNHO DE 2010, Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. SEÇÃO II - Instituí o Programa Estadual de Construção Civil Sustentável, implementado pela Secretaria do Meio Ambiente, com a finalidade de implantar, promover e articular ações e diretrizes que visem à inserção de critérios sociais e ambientais, compatíveis com os princípios de desenvolvimento sustentável, nas obras e nas contratações de serviços de engenharia efetivadas pelo Poder Público.

LEI COMPLEMENTAR Nº. 288, DE 18 DE DEZEMBRO DE 1997, Regulamenta o exercício da atividade de locação de serviço de remoção, transporte e destinação de entulho através de "caçambas". Entre outras providências regulamenta o cadastramento de cada equipamento na Companhia de Engenharia de Tráfego (CET).

Em janeiro de 2003 a Prefeitura de Santos encerra as atividades no "Lixão" da Alemoa e inicia as atividades do Aterro Sanitário Controlado do Sítio das Neves, na Área Continental de Santos. Atendendo aos municípios de Santos, Guarujá, Cubatão, Mongaguá, Bertioga, Praia Grande, Ilha Comprida e Itanhaém.

LEI COMPLEMENTAR 792/2013, Institui o Programa Municipal de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção Civil - PMGRSCC. O programa estabelece diretrizes, critérios e procedimentos técnicos para a destinação do RCD e

propõe ações para o beneficiamento ou reciclagem, visando reduzir o impacto ambiental e ampliar a vida útil dos aterros sanitários. A nova Lei cria normas a serem adotadas pelos grandes e pequenos geradores de resíduos, sendo estes últimos classificados quanto a massa, não superior, a 200kg de RCD. A criação de Ecopontos e entrega voluntária para pequenas quantidades é uma das medidas a serem adotadas pela PMS. O Capítulo VI, estabelece regras para a coleta e transporte em caçambas, sendo que suas dimensões máximas são definidas em 2,70m de comprimento e 1,60m de altura, e pés de sustentação com altura mínima de 10cm. A Lei complementar, também, estabelece que o período máximo de permanência em via pública deve ser de 3 dias, podendo ser prorrogada por 12h, sendo a fiscalização subordinada ao CET.

A partir de 2003, o Comitê do Meio Ambiente do SINDUSCON/SP (COMASP), Visando atender à Resolução CONAMA nº. 307/2002 iniciou o Programa de Gestão Ambiental de Resíduos em Canteiros de Obra, que compreende o desenvolvimento e implantação de metodologia para a gestão de resíduos em canteiros de obras de 11 construtoras da cidade de São Paulo. O objetivo é capacitar os grupos participantes, para o correto gerenciamento dos resíduos nos canteiros, incluindo a redução da geração, segregação, reuso, correta destinação que possibilite a reciclagem. Os grupos participantes são formados por representantes da cadeia produtiva, dentre eles, construtoras, fabricantes, aplicadores, entidades, pesquisadores, órgãos públicos, além de representantes do COMASP.

2.7.3 Normas Técnicas

O COMASP participa nas comissões CE:0213005 e CE:0213006 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) responsáveis pela elaboração das normas de resíduos da construção civil, tais como: NBR 15.112 Resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Áreas de Transbordo e Triagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação; NBR 15.113 Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes. Aterros. Diretrizes para projeto, implantação e operação; NBR 15.114 Resíduos sólidos da construção civil. Áreas de Reciclagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação; NBR 15.115 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Execução de camadas de pavimentação e normas de procedimentos, NBR 15.116 Agregados reciclados de resíduos sólidos da

construção civil. Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Requisitos.

2.7.4 Tipos de coleta e empresas na Baixada Santista

Em pesquisas realizadas, foram identificadas 34 empresas de coleta de resíduos de construção e demolição em caçambas distribuídas pela região da Baixada Santista, a Figura 12 indica que a cidade de Santos possui 29% das empresas coletoras de RCD, o que representa 10 (dez) empresas do total.

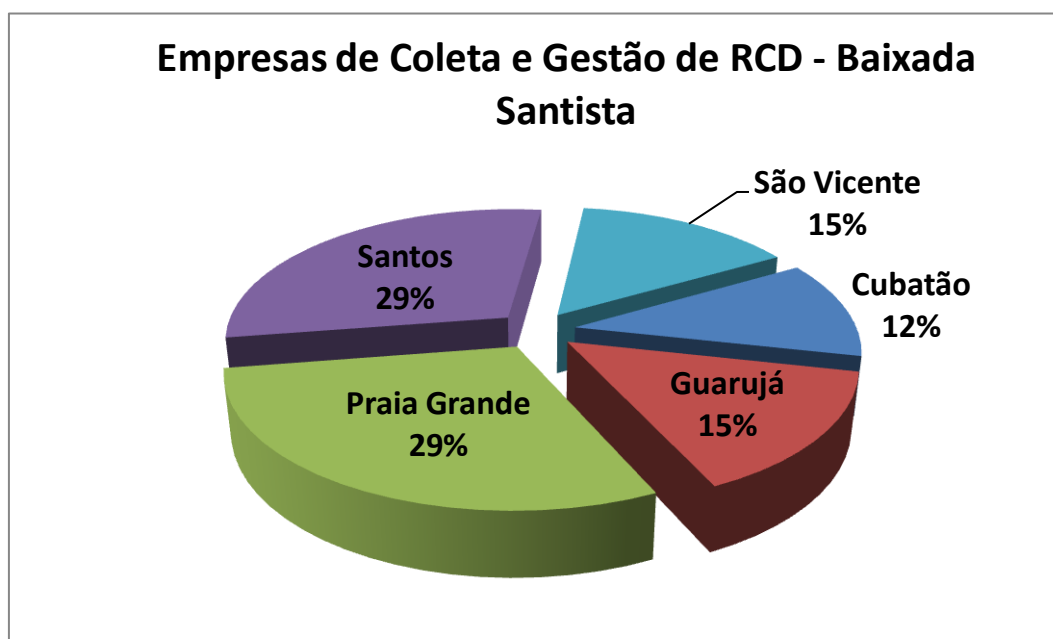


Figura 12: Distribuição percentual das empresas de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Além deste, existe outro sistema conhecido como “carrinheiros”, assim como as caçambas coletoras, também cadastrados no CET do município de Santos. Até julho de 2012 a cidade contava com 250 destes cadastrados. Em uma perspectiva conservadora os técnicos do setor estimam a coleta de 150kg/dia por “carrinheiro” de resíduos sólidos e recicláveis. Atualmente, são coletados menos de 2% do total de lixo reciclável produzido pelos santistas. Municípios que possuem melhor coleta seletiva reciclam 10% de seus resíduos (Belo Horizonte e Curitiba, p. ex.).

O município de Santos possui, na área continental, um local conhecido como “Sítio das Neves”, para depósito e destinação adequada de resíduos, sendo um investimento privado subcontratado pelo serviço de limpeza pública. O percurso rodoviário é de 32km da área insular, com pagamento de pedágio para cada viagem

realizada. Segundo o Eng. Carlos Eizo da (SESERP) Secretaria Municipal de Serviços Públicos, em 2011 foram realizadas 9.000 viagens de resíduos sólidos, num total de 536.000km percorridos a um custo de R\$220.000,00 somente de pedágio. Conforme SESERP (2012) o município produz por dia 450t de resíduos, sendo 42% destes são de matéria orgânica e 58% poderiam ser reciclados ou ser utilizado como matéria prima para indústria (servir de combustível para o forno rotativo na fabricação do clínquer, p. ex.). O sistema de recolhimento de resíduos por caçambas, também, deve dispor o material neste local ou em empresas de reprocessamento e gestão de resíduos, como consequência imediata o preço unitário do equipamento passou de R\$70,00 em 2010, para R\$320,00 em 2012. Em pesquisa junto a construtoras, foi verificado que as empresas que operam no setor de transporte de resíduos através de locação de caminhões e máquinas de terraplenagem, retiram o RCD de grandes geradores a um custo de R\$250,00 para cada 5m³.

Pesquisa realizada junto ao Departamento de Obras Particulares de Santos, mostra o aumento de aprovação de projetos nos últimos 4 (quatro) anos, Figura 13 e Tabela 5, mostrando não haver aumento significativo nas licenças de demolição de imóveis, porém os dados oficiais apresentam um novo patamar a partir de 2006.

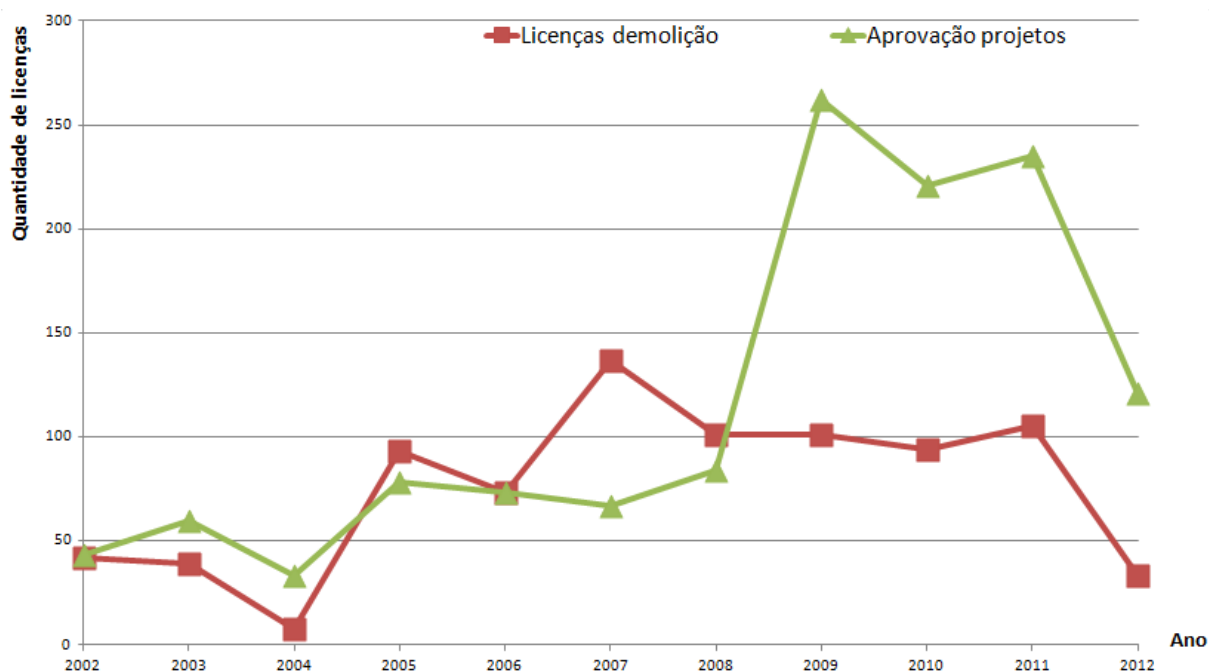


Figura 13: Registro dos últimos 10 (dez) anos com pedidos de licenças para demolição e aprovação de projetos arquitetônicos na Prefeitura Municipal de Santos (julho/ 2012).

Destaque-se o ano de 2007 com o anúncio das prospecções do pré-sal na Bacia de Santos. O mercado de construção já se mantinha aquecido por políticas federais de financiamento de imóveis novos e usados, o setor produtivo, inclusive, vem apresentando uma inversão percentual nos índices de custos de mão de obra e materiais (SINDUSCON/SP, 2012) de 54,24% e 42,99% respectivamente em maio de 2011, sendo que em junho de 2012 estes índices foram de 56,11% e 41,07% respectivamente.

A pressão do custo da mão de obra, aliado a uma legislação mais restritiva, forçaram muitas empresas a adotar mecanismos de reprocessamento de resíduos sólidos no próprio canteiro de obras, aproveitando o material de classe A como agregado para contrapisos, ANEXO 3, obtendo resultados satisfatórios de qualidade.

Comparativamente a Prefeitura do Município de Santos autorizou em dez anos, Tabela 5, um total de 826 demolições e aprovou 1.277 projetos de construção.

Tabela 5: Quantidade de licenças de demolição e aprovação de projetos arquitetônicos, até de julho/2012. (DAMIN; SANTOS; MORAES JÚNIOR, 2012) .

Prefeitura Municipal de Santos		
ano	Licenças demolição	Aprovação projetos
2002	42	43
2003	39	60
2004	8	33
2005	93	78
2006	73	73
2007	137	67
2008	101	84
2009	101	262
2010	94	221
2011	105	235
2012	33	121
totais	826	1277

Levantamento realizado junto ao Deconte (Departamento de Controle do Uso e Ocupação do Solo e Segurança de Edificações), identificou nos últimos 3 (três) anos uma tendência de queda na quantidade de reformas com acréscimo de áreas de construção. Em 2009 foram realizadas 22.884m², em 2010 esse número foi de 12.570m² e em 2011 o patamar foi de 11.280m². Um indicativo que esses números oficiais não representam grande parte das reformas gerais realizadas na cidade é o

número de intimações e atendimentos em edifícios apresentados na Lei de Autovistoria de edificações (Lei complementar 441, de dezembro de 2001) adotada pelo município. A Seção de Inspeção de Estruturas da Prefeitura de Santos cadastrou, a partir de fevereiro de 2011 até junho de 2012, um total de 3.400 Laudos elaborados por engenheiros e arquitetos contratados pelos condomínios da cidade. Uma amostra aleatória em 570 pareceres foi analisada para se verificar a necessidade de “obras de reforma, serviços, demolições, etc.”. O total de reformas e/ou serviços representou 54,2% e 46,3% nos anos de 2012 e 2011 respectivamente, ou seja, 282 edificações plurihabitacionais ou comerciais devem sofrer ou estão realizando reparos e/ou reformas, representando 49,5% da amostra.

Esses dados não são representativos como base para um estudo, visto que estimativas oficiais (PMS, 2012), apresentam valores de resíduos sólidos superiores a 150kg/m^2 construído ou 1 m^3 por semana para cada habitante, com 672t/dia em todo o município ou 1,6kg/hab por dia, considerando-se os resíduos orgânicos, recicláveis, volumosos e de saúde. Para o cálculo, a população de Santos foi estimada em 419 mil habitantes (IBGE, 2010) e os resíduos coletados no mesmo ano.

No cálculo desta taxa o quantitativo de resíduos cuja responsabilidade é do gerador não foi computado, bem como os oriundos de grandes geradores.

Em relação ao processamento do RCD os dados apresentados na Tabela 6 pela Gerenciadora de Resíduos Foccus, apresentam valores crescentes a cada ano, os dados referem-se ao material recolhido bruto pela empresa ou entregue pelo cliente no local. Após a coleta se executa a triagem e separação do material, bem como a classificação.

Tabela 6: Coleta de RCD antes da triagem de resíduos.
(Fonte: Foccus Gerenciadora de Resíduos)

Foccus Gerenciamento de Resíduos		
Ano	Resíduo Concreto em toneladas	Resíduo misto em toneladas
2009	6.000	50.000
2010	12.000	90.000
2011	14.000	120.000

Resíduo Misto, constituído de argila, argamassa, pedras, tijolos e cerâmicas.

Segundo o responsável pela empresa o resíduo de concreto é o produto mais comercializado, o problema se apresenta em relação ao produto misto, Figura 14, praticamente inaproveitável para reuso na construção.



Figura 14: Resíduo misto chegando à Foccus Gerenciadora de Resíduos.

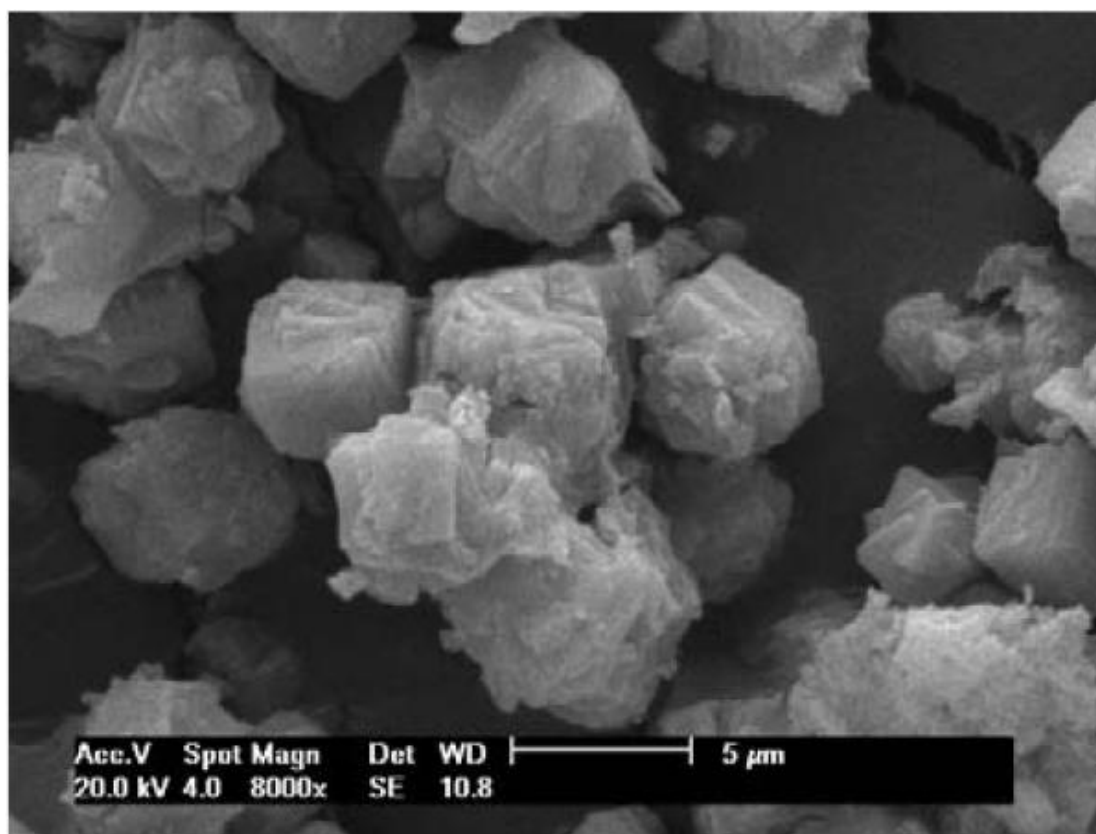
2.7.5 Captura de dióxido de carbono por RCD

A captura ou “sequestro” de CO_2 pelo RCD é uma possibilidade de uso para o material misto, bem como a capacidade de retenção de água para uso na agricultura.

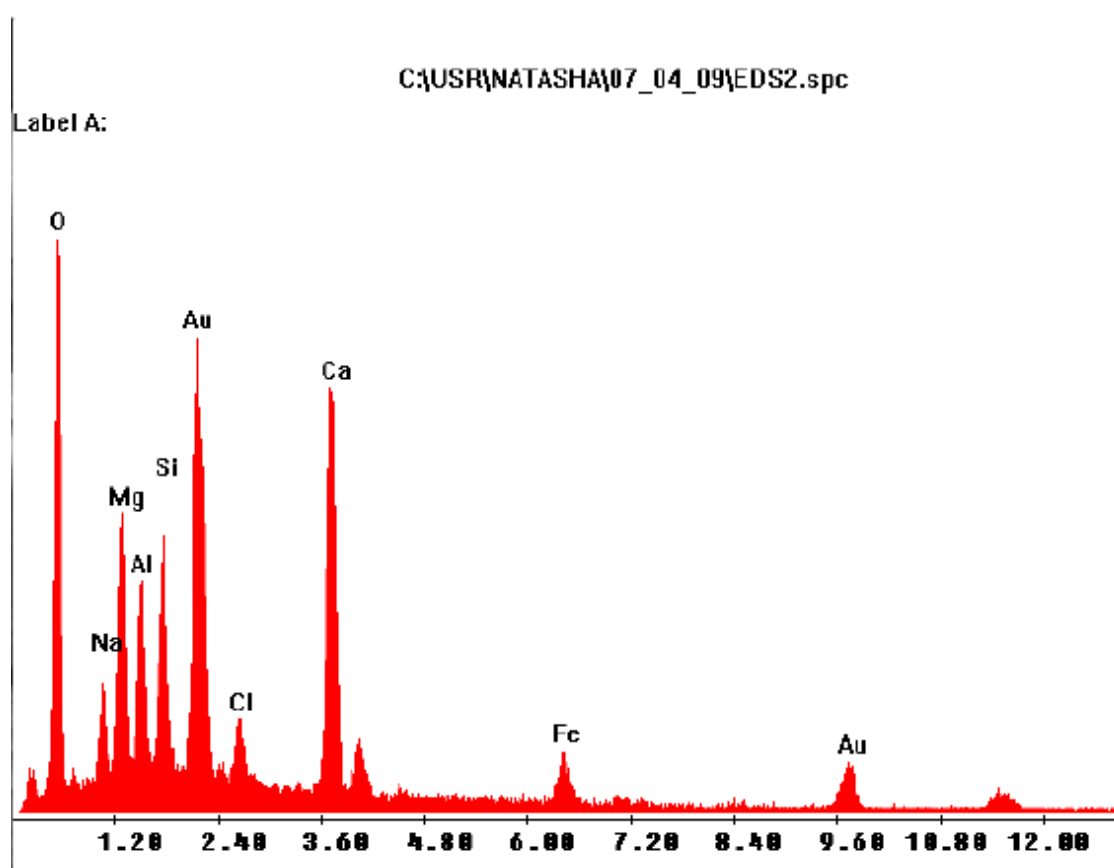
O desempenho do concreto como barreira para agentes causadores de corrosão está relacionado com a sua porosidade e a influência do volume de vazios no transporte de água para reação com CO_2 . Concretos com adição de escória siderúrgica apresentaram volume total de poros maior que os concretos sem escória de mesmo traço (mistura), mas o diâmetro dos poros foi menor. Mesmo com poros menores, os concretos com escória, por apresentarem menor reserva alcalina, sofrem maior carbonatação que os concretos sem escória, fato este observado após

a exposição em estação de envelhecimento natural. A temperatura ideal para o sequestro de CO_2 pelo RCD foi verificada em 30°C , apresentando a absorção máxima de CO_2 entre 10,56% e 9,14% em massa (GUPTA; BHAVYA; NEMAR, 2011).

Utilizando o método de carbonatação indireta, KUNZLER *et al.* (2009) mostraram o potencial de carbonatação do RCD obtendo, em média, uma redução de cálcio na amostra de 545mg/L para 0,37mg/L, verificando a diminuição da quantidade de cálcio depois da reação do gás carbônico na solução lixiviada de ácido clorídrico, a Figura 15 mostra a formação do carbonato de cálcio.



(a)



(b)

Figura 15: Micrografia eletrônica (a) e análise em EDS (b) do carbonato de cálcio, em amostra de RCD. (KUNZLER *et al.*, 2009)

Resíduos de concreto em suspensão na água do mar absorveu 1,5g de CO_2 por litro em 1 (uma) hora, em uma concentração de 100g/L de concreto moído. O cálcio contido no concreto, também, foi dissolvido em água do mar onde foram cultivadas algas que fixaram CaCO_3 na biomassa (TAKANO; MATSUNAGA, 1995). Os dois fatores que mais influenciam a taxa de reação da carbonatação são o tamanho da partícula e a temperatura (HUIJGEN; WITKAMP; COMANS, 2005; HUIJGEN; COMANS, 2003).

PEREIRA *et al.* (2010) analisaram o resíduo de concreto de construção e observaram grande variação de componentes, a concentração de cálcio (Ca^{2+}) representou 41,4% em média. Nos testes de lixiviação do concreto em solução de extração de HCl (ácido clorídrico), com variação de concentração de 0,15 a 0,90 mol/L, Figura 16, nota-se que não houve variação significativa na extração de Ca^{2+} . Tornando o RCD uma fonte de armazenamento de CO_2 na forma de carbonatos.

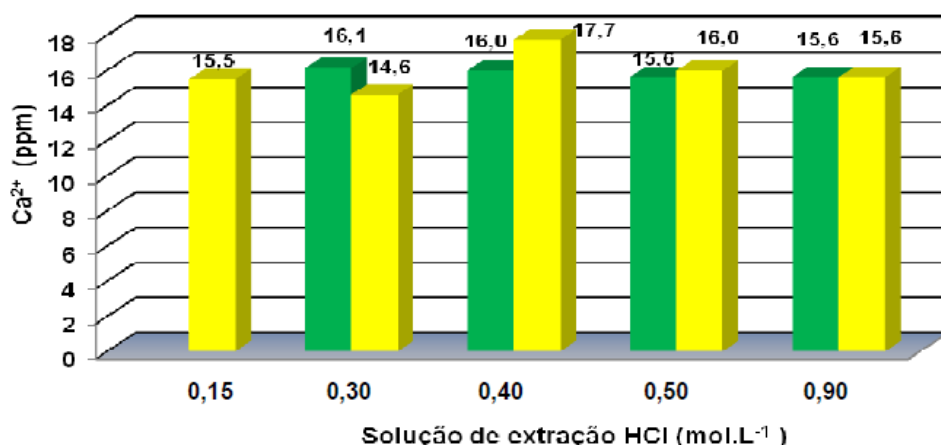


Figura 16: Extração de cátion Cálcio em função da variação de solução de ácido clorídrico. (PEREIRA *et al.*, 2010)

A utilização de silicato de cálcio (CaSiO_3) foi verificado em concretos a base de cimento portland, o experimento buscou sequestrar dióxido de carbono no concreto e simultaneamente aumentar sua resistência. O teste foi realizado com uma concentração de 100% de gás carbônico para simular os gases recuperados na combustão, com uma pressão de 0,5MPa à temperatura ambiente por um período de 2h. A medição se deu pelo ganho de massa direta, alcançando de 9% a 16% de captura de CO_2 (SHAO; MIRZA; WU, 2006; SHAO; ZHOU; MONKMAN, 2006).

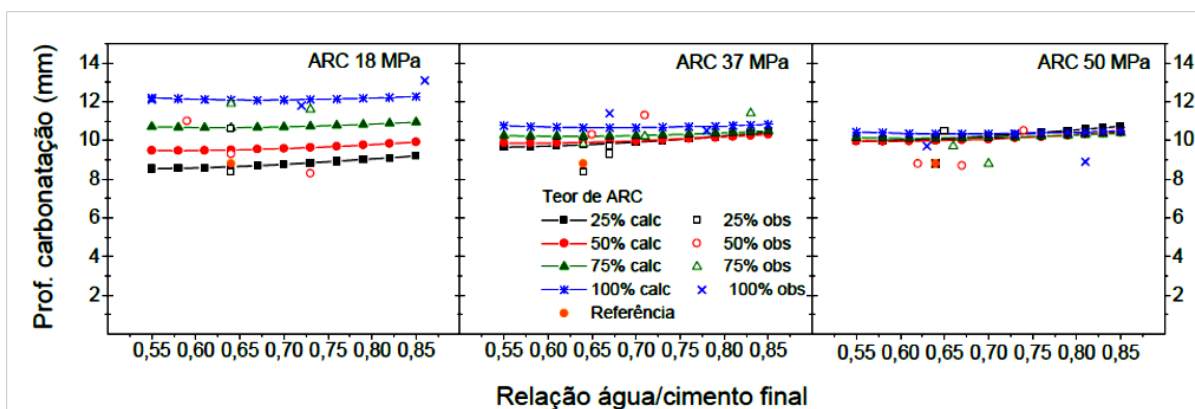
KATSUYAMA *et al.* (2005), desenvolveu um processo para a produção de carbonato de cálcio (CaCO_3) a partir de resíduos de cimento utilizando CO_2

pressurizado. Na somatória da captura de CO_2 atmosférico por resíduos devem-se levar em conta, também, outros materiais que podem contribuir para esse fim.

A escória de Aciaria, segundo NIENCZEWSKI; LIGABUE; DULLIUS (2008) poderia armazenar 1,74 milhões de toneladas de CO_2 /ano, a capacidade de extração de cálcio foi testada entre 70% e 80%, em solução de HCl (ácido clorídrico) – variando a concentração de 0,3 a 1,2mol/L (NIENCZEWSKI, 2009).

A carbonatação em concretos com agregados reciclados foi observada, Figura 17, o consumo de cimento (maior resistência do concreto) e o aumento do fator água cimento são determinantes para a profundidade de carbonatação. Resultado semelhante ocorre com o concreto de agregados comuns (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

A relação entre o consumo de ARC (Agregado Reciclado de Concreto) e o aumento no fator a/c (água/cimento) é determinante no aumento da profundidade de carbonatação, principalmente nos concretos de resistência 18MPa e 37MPa, porém, não foi significativo em relação ao concreto de 50MPa.



Prof. = Profundidade; ARC = Agregado reciclado de concreto.

Figura 17: Profundidade de carbonatação para concretos com idade de 147 dias, uso de agregado reciclado. (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

A possibilidade de uso dos resíduos de concreto como mecanismo para crédito de carbono, pela captura de CO_2 diretamente do meio ambiente, tem uma estimativa de custo de operação de US\$8/t- CO_2 . O potencial pode ser ampliado com a troca de resíduos como matéria-prima entre indústrias e uma fonte de captura segura de gás carbônico (STOLAROFF; LOWRY; KEITH, 2005).

Pelo fato de não se encontrar em literatura nenhum estudo realizado utilizando coluna de adsorção, o presente trabalho visa avaliar a eficiência do

resíduo de construção civil quando empregado como material adsorvente/absorvente em uma coluna de adsorção de gás carbônico.

Valendo-se de métodos analíticos e após ensaios de análise gravimétrica térmica, difração de raio-X e espectroscopia de fluorescência de raio-X, GUPTA e NEMAR (2012), verificaram que a amostra de resíduo de demolição e construção possuía elementos como CaCO_3 (carbonato de cálcio), SiO_2 (quartzo), K_2SO_4 (sulfato de potássio), CaO (óxido de cálcio), MgO (óxido de magnésio) e CaSO_4 (sulfato de cálcio) estabelecendo um potencial de sequestro de CO_2 de 23,62% em massa seca. Outros resíduos foram verificados e apresentaram valores expressivos.

III. MATERIAL E MÉTODO

Conforme citado, a retenção do CO₂ no resíduo de construção de produtos cimentícios depende da área de absorção ou adsorção, da porosidade, do teor de umidade, da concentração do gás carbônico e óxido de cálcio livre, da idade da mistura com cimento ou cal, do tipo de cimento (com adições de escória de alto forno ou não) e do tempo de exposição.

A amostra de campo, coletada em partes aleatórias da fonte de produção e armazenamento de RCD da Foccus - Gestão de resíduos, foi colhida de acordo com a NBRNM 26:2009, obtendo-se uma amostra representativa, destinada à execução de ensaio de agregado - segundo a NBRNM 27:2001 e levada ao laboratório de materiais de construção da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), onde se procedeu aos testes descritos nos itens 3.1 e 3.2 deste método. Tal procedimento foi necessário para classificação do tipo de resíduo em estudo.

Após estes procedimentos outra parte da mesma amostra de RCD foi analisada no Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA. Para tanto foi desenvolvida em laboratório, o conjunto para o experimento em bancada descrito, a partir do item 3.4.

3.1 Umidade das amostras

A relação entre a massa de água contida no agregado e sua massa seca expressa em %, foi obtida de acordo com a Equação 23.

$$w(\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad (23)$$

Sendo:

w a umidade do agregado (%); Mh a massa da amostra úmida (g); Ms a massa de agregado seco(g).

O agregado foi seco em estufa a 100°C por 5 (cinco) horas até sua massa se tornar constante em duas medidas consecutivas. Sendo a massa úmida obtida previamente.

3.2 Granulometria

A NBRNM 248:2003, define granulometria como a proporção relativa das massas de grãos de agregados de tamanhos diferentes expressa em percentagem da massa retida nas diversas peneiras, os resultados são utilizados para o traçado da curva granulométrica.

A dimensão máxima característica do agregado foi determinada pela malha de abertura nominal da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5%.

Para determinação do módulo de finura foi efetuada a soma das percentagens retidas acumuladas, em massa de agregado, em todas as peneiras da série normal, dividida por 100.

Para o ensaio foram utilizados: balança, resolução de 0,1% da massa da amostra; estufa; agitador mecânico com peneiras, tampa e fundo; bandejas de alumínio.

A série de peneira para agregado graúdo, em ordem decrescente foi 75mm; 37,5mm; 19mm e 9,5mm da série normal e 63mm; 50mm; 31,5mm; 25mm; 12,5mm e 6,3mm da série intermediária. A série de peneira para agregado miúdo, em ordem decrescente foi 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600 μ m; 300 μ m e 150 μ m (NBR 7211, 2009).

Para o ensaio formou-se duas amostras de acordo com a NBR NM27 (2001). Foram secas a 100°C. As massas foram determinadas à temperatura ambiente, colocadas no conjunto de peneiras e agitadas; determinando-se a massa retida em cada peneira. A diferença do somatório foi inferior a 0,3% da massa inicial.

Para cada amostra, foram calculadas: a percentagem retida em cada peneira com precisão de 0,1%; percentagem média retida e acumulada com precisão de 0,1%; módulo de finura com aproximação de 0,01. As duas amostras tiveram a mesma dimensão máxima característica. As amostras não diferiram mais de 4% entre peneiras de mesma abertura.

3.3 Teste de fenolftaleína e peagômetro

Em testes de campo, os postes da praia de Santos (ANEXO 1) e laje de concreto (Figura 6), para determinação da espessura superficial de carbonatação, foi utilizado indicador de solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico. A mudança de cor da superfície do concreto indicou a mudança de pH.

Esta solução apresenta coloração vermelho-carmim a partir de pH 9,5; permanecendo incolor em valores de pH 8,3. Coloração de tons intermediários indicará valores de pH entre 8 e 9,5.

A solução foi aplicada sobre a superfície do material objeto do estudo, seco e isento de poeira. O teste foi realizado sobre uma fratura fresca (desbaste da superfície, Figura 6).

Para a medida da espessura de carbonatação, foi efetuado um corte ortogonal ao pedaço fraturado da peça, que recebeu a aplicação de fenolftaleína.

Após um ou dois minutos o indicador alterou a cor da superfície. Mediu-se, pelo menos, dez pontos diferentes e calculou-se a média, bem como a profundidade máxima encontrada. Regiões críticas como cantos, quinas e ao redor dos agregados graúdos, também, foram analisados.

Em laboratório, para medida potenciométrica, foi utilizado um peagômetro. De cada amostra foi pesado 0,08 g de RCD (precisão de $\pm 0,001$ g) sendo adicionados 25 mL de água destilada com o auxílio de uma proveta de 50 mL, sob agitação em tubo de ensaio tamponado.

Os resíduos cimentícios não carbonatam-se a uma mesma velocidade, sendo que a mesma depende do consumo de cimento utilizado, a porosidade do material, o tipo de cimento, a umidade relativa do ambiente, etc.

Para a determinação da velocidade de carbonatação utilizou-se a primeira lei de Fick, Equação 24.

$$X(\text{mm})=K.t^{0,5} \quad (24)$$

Sendo: X a capa carbonatada em mm; t o tempo em anos ou meses; K a constante de carbonatação da amostra.

O valor de K foi determinado conhecendo-se a espessura de carbonatação e a idade do componente examinado. Uma vez conhecido K, pode-se estimar a velocidade de avanço da frente de carbonatação, e portanto, o tempo que tardará para que todo RCD retenha CO₂ (PERDRIX, 1992).

3.4 Análise de variância e estatística paramétrica

Para a elaboração do tratamento estatístico dos resultados, foram executados – em média, 6 (seis) ensaios para cada duas variáveis (C/Co e t).

O tratamento de resultados previu a utilização da estatística paramétrica na elaboração de curvas de tendência dos dados, bem como o coeficiente de determinação de Pearson, também chamado de R², obtendo-se uma verificação do ajustamento de um modelo estatístico, como a Regressão linear, em relação aos valores observados. O R² varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto mais próximo de 1 (um) o R², mais ajustado é o modelo em relação à amostra.

A estatística ANOVA (analise of variance), ou análise de variância, foi utilizada para a análise destes e sua interpretação. Em uma Anova são comparadas as médias de grupos diferentes. Calculam-se dois componentes de variância, se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada dos dados pertencentes a cada grupo individual (MQG) pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos. A hipótese nula sempre será rejeitada quando F calculado for maior que F *crítico*

Para o traçado das curvas de tendência, cálculo do coeficiente de determinação (R²) e análise de variância foi utilizado o aplicativo Microsoft Excel 2007.

3.5 Massa absorvida pela Lei de Henry

A quantidade máxima de CO₂ retida em uma amostra de RCD foi obtida pelo produto do volume de água na amostra (item 3.1) pela concentração de saturação do dióxido de carbono no líquido (item 2.3, Lei de Henry).

3.6 Massa retida por adsorção

A massa retida de CO₂ por adsorção foi determinado experimentalmente. Colocou-se a amostra de RCD com granulometria e umidade quantificada em uma coluna. Foi construído um sistema para misturar o dióxido de carbono puro contido em um cilindro de gás com ar sintético, também, armazenado em outro cilindro de gás, para fornecer uma concentração de entrada (Co) na coluna, conforme Figura 18 e Figura 19. Os rotâmetros foram aferidos pelo bolhômetro, ANEXO 4.

As concentrações de entrada (Co) e de saída (C) foram determinadas borbulhando por um difusor, Figura 20, o gás em um copo de acrílico com 100 mL de água destilada por 40 segundos (a saturação ocorreu em 600 segundos – ANEXO 5). O copo de acrílico ficava parcialmente submerso em água a 20°C, fornecida por um banho termostatizado. A concentração do gás dissolvido na água do copo foi obtida por titulação com NaOH 0,01N (Equações 25, 26 e 27)

A massa de gás carbônico foi obtida com o uso da Equação 25:

$$m_{CO_2} = \frac{N_{NaOH} \times V_{NaOH} \times Eq_{CO_2}}{1.000} \quad (25)$$

Sendo: m_{CO₂} a massa de dióxido de carbono (g); N_{NaOH} a normalidade do NaOH (mol/L); V_{NaOH} o volume da solução de soda gasto na titulação (mL); Eq_{CO₂}, o equivalente do CO₂ (g/mol)

$$m_{CO_2} = \frac{0,01N \times V_{NaOH} \times (44/2)}{1.000} \quad (26)$$

$$C = \frac{m_{CO_2}}{100mL} \quad (27)$$

Sendo: 100mL a quantidade de água no copo de acrílico padrão do ensaio.

As curvas da relação entre a concentração de saída (C) e a de entrada (Co) em função do tempo fornecem o tempo de saturação. A vazão máxima de CO₂ que entrou na coluna foi calculada pelo balanço de massa, contemplando a vazão de gás carbônico concentrado e de ar sintético oriundas dos cilindros de gás. O produto do tempo de saturação pela vazão máxima de CO₂ indicou a massa de gás adsorvida na amostra de RCD.



Figura 18: Bancada de ensaio desenvolvida no Laboratório de Operações Unitárias, para determinação de quantidade de dióxido de carbono adsorvida pelo RCD.

O CO_2 borbulhou na água (100mL) com 6 gotas de fenolftaleína, em banho termostatzado (20°C) e foi titulado com NaOH 0,01N (Figura 19). O difusor, para borbulhamento, foi construído em acrílico nas oficinas do Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta e apresentado em detalhe na Figura 20.

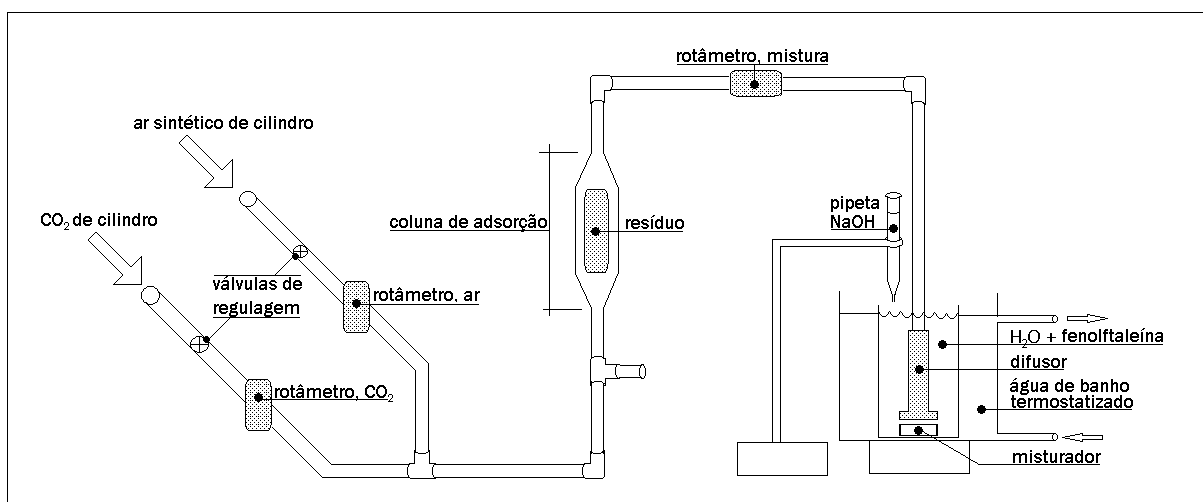


Figura 19: Desenho esquemático da unidade experimental para obtenção da massa de gás carbônico retida na amostra de RCD por adsorção.

A ilustração da Figura 19 indica as entradas de CO_2 e ar sintético percolando pelos rotômetros. A mistura entrou na coluna de adsorção percolando pelo recheio de RCD, sendo que a vazão na saída foi verificada por outro rotâmetro.



Figura 20: Difusor para dissolução do gás carbônico em água.

IV. RESULTADOS e DISCUSSÃO

4.1 Umidade, granulometria e pH

Foram recebidos no laboratório de materiais de construção da UNISANTA, em dois lotes de 15kg de resíduo de construção e demolição, obtidos de acordo com a NBRNM 26 (2009).

Os lotes identificados como resíduo misto (mistura de argila, argamassa, tijolos e cerâmica), foram imediatamente verificados com relação à umidade do material, obtendo-se os seguintes resultados, calculados pela Equação 23.

Lote 1:

Tara da cápsula 161 = 26,74g

Mh (amostra úmida + tara) = 110,29g

Ms (amostra seca + tara) = 93,57g

w = 25,09%

Lote 2:

Tara da cápsula 131 = 25,85g

Mh (amostra úmida + tara) = 112,02g

Ms (amostra seca + tara) = 99,24g

w = 17,4%

Os lotes foram verificados em relação ao pH, através do ensaio com peagômetro, foram testados 3 (três) amostras de granulometrias diferentes, conforme ilustra a Tabela 7. Média de três ensaios por amostra (n=3)

Tabela 7: Resíduo Misto, resultado de pH entre faixas granulométricas diferentes

Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0,15mm e 0,30mm	1,18mm e 2,36mm	4,75mm e 9,5mm
pH = 11,67	pH = 11,40	pH = 7,5

Os resultados indicaram que o agregado de maior diâmetro possuiu menor pH, cerca de 35,73% em relação à amostra 1. Foi verificado, entre as peneiras 0,15mm e 0,30mm, o mesmo pH do cimento portland.

O ensaio de granulometria do resíduo misto na Tabela 8, tomada à média de duas amostras (n=2), indicou o percentual retido em cada peneira.

Tabela 8: Ensaio de granulometria do resíduo misto (n=2).

PENEIRAMENTO		P _h = 2000,0g		P _s =1974,0g
Peneira(mm)	Peso retido (g)	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida	% Retida Acumulada
9,52	48	48	2,4	2,4
6,35	92	140	4,7	7,1
4,75	97	237	4,9	12,0
2,36	210	447	10,6	22,6
2,00	100	547	5,1	27,7
1,18	210	757	10,6	38,3
0,60	355	1112	18,0	56,3
0,42	203	1315	10,3	66,6
0,30	112	1427	5,7	72,3
0,15	306	1733	15,5	87,8
Fundo	241	1974	12,2	100,0

P_h = peso úmido e P_s = peso seco.

O traçado da curva granulométrica do resíduo misto, Figura 1, do APÊNDICE 2, a partir da Tabela 8, indica que até a 4,75mm o agregado se apresenta utilizável para uso na construção civil.

O estudo apresentado no ANEXO 3, mostra que as resistências obtidas no uso de agregado reciclado são compatíveis com resultados de misturas de agregado comum e cimento para utilização como contrapiso. Sendo este o uso mais comum dos RCD.

Após secagem ao ar, dentro do laboratório, o material foi peneirado e acondicionado em sacos do tipo “zip-lock” em faixas granulométricas, e levado ao Laboratório de Operações Unitárias em março de 2013.

O ensaio de teor de umidade por faixa granulométrica indicou que o resíduo misto variou de 1,78% a 2,28%, sendo que o maior valor se refere a faixa de granulometria maior, peneiras entre 4,75mm a 2,38mm, como se verifica na Tabela 9.

Tabela 9: Tipo do resíduo misto, separado por faixa granulométrica e umidade.

Granulometria	0,15 - 0,30mm	1,18 - 2,00mm	2,36 - 4,75mm
	Teor de Umidade (%)		
seco	0	0	0
padrão	1,78 66%	1,82	2,28
úmido	(24,6gH ₂ O)	66% (5,5gH ₂ O)	66% (7,6gH ₂ O)

4.2 Massa absorvida pela Lei de Henry

Empregando-se a Equação 6, pode-se escrever para o CO₂ puro e constante a 20°C a Equação 28.

$$x_g = \frac{P_g}{H} = \frac{1 \text{ atm}}{0,142 \times 10^4} = 7,042 \times 10^{-4} \quad (28)$$

A quantidade de matéria (mol) em um litro de água é:

$$n_w = \frac{1000 \text{ g H}_2\text{O}}{\frac{18 \text{ g H}_2\text{O}}{\text{mol H}_2\text{O}}} = 55,6 \text{ mol de H}_2\text{O} \quad (29)$$

Por definição, a fração molar do gás dissolvido é dada por:

$$x_g = \frac{n_g}{n_g + n_w} \quad (30)$$

A substituição dos valores das equações 28 e 29 na equação 30 fornece:

$$7,042 \times 10^{-4} = \frac{n_g}{n_g + 55,6} \quad (31)$$

$$n_g = n_g \times 7,042 \times 10^{-4} + 55,6 \times 7,042 \times 10^{-4} \quad (32)$$

Desprezando-se o produto $n_g \cdot 7,042 \cdot 10^{-4}$ em relação a n_g , tem-se:

$$n_g = 55,6 \times 7,042 \times 10^{-4} = 0,039 \text{ mol/L}_{\text{CO}_2} \quad (33)$$

Observa-se que n_w é bem maior que n_g , ou seja, $55,6 > 0,039$.

A partir do resultado da equação 33 e da massa molar do CO₂ (44g/mol) pode-se obter a concentração de saturação:

$$C_s = 0,039 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1,72 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad (34)$$

No caso de uma massa de amostra de 120g com 1,78% de umidade, pode-se escrever:

$$m_{\text{água}} = \frac{1,78}{100} \times 120 \text{ g} = 2,14 \text{ g de água} \quad (35)$$

Sabendo-se que a densidade da água é praticamente 1.000kg/m³ ou 1g/mL a 20°C, tem-se o volume da água na amostra:

$$V_{\text{água}} = \frac{2,14g}{1g/mL} = 2,14mL = 0,00214L \quad (36)$$

Portanto, a massa máxima de CO₂ puro obtida para a amostra com 0,00214L de água é:

$$m_{\text{absorção,CO}_2} = C_s \times V_{\text{água}} = 1,72 \frac{g}{L} \times 0,00214L = 0,00368g = 3,68mg \quad (37)$$

4.3 Massa retida por adsorção

A massa de CO₂ na entrada (Co) da coluna com 120g de RCD, dada pela equação 25 com o volume de 13,4mL de NaOH 0,01N, determinado na titulação, tem a forma:

$$m_{0,CO_2} = \frac{(N_{NaOH} \times V_{NaOH} \times Eq_{CO_2})}{1.000} = \frac{0,01N \times 13,4mL \times \frac{44}{2}}{1.000} = 0,002948g \quad (38)$$

Foi consumido 13,4mL de NaOH 0,01N na concentração de entrada.

Com o volume do copo de 100mL, tem-se:

$$Co = \frac{m_{0,CO_2}}{100mL} = \left(\frac{0,002948g}{100mL} \right) \times \left(\frac{1.000mL}{1L} \right) = 0,02948g/L \quad (39)$$

No tempo de 40s, com volume de 1,1mL (Tabela 1 do APÊNDICE 3, granulometria de 0,30 a 0,15mm) a concentração C é:

$$m_{40,CO_2} = \frac{0,01N \times 1,1mL \times 44/2}{1.000} = 0,000242g \quad (40)$$

$$C = \frac{m_{40,CO_2}}{100mL} = \frac{0,000242g}{100mL} \times \frac{1.000mL}{1L} = 0,00242g/L \quad (41)$$

Portanto:

$$\frac{C}{Co} = \frac{0,00242}{0,02948} = 0,082089552 \quad \text{Ver Tabela 1 do APÊNDICE 3} \quad (42)$$

A equação da curva da figura 1 do APÊNDICE 4, faixa granulométrica de 0,15 a 0,30mm, com C/Co de 0,5 forneceu o tempo de saturação de 134,68s.

O balanço global de massa (W, massa por unidade de tempo) no ponto de mistura do duto com CO₂ e do duto de ar sintético (volume de controle Figura 21), fornece:

$$W_{CO_2} + W_{ar} = W_{mistura} \quad (43)$$

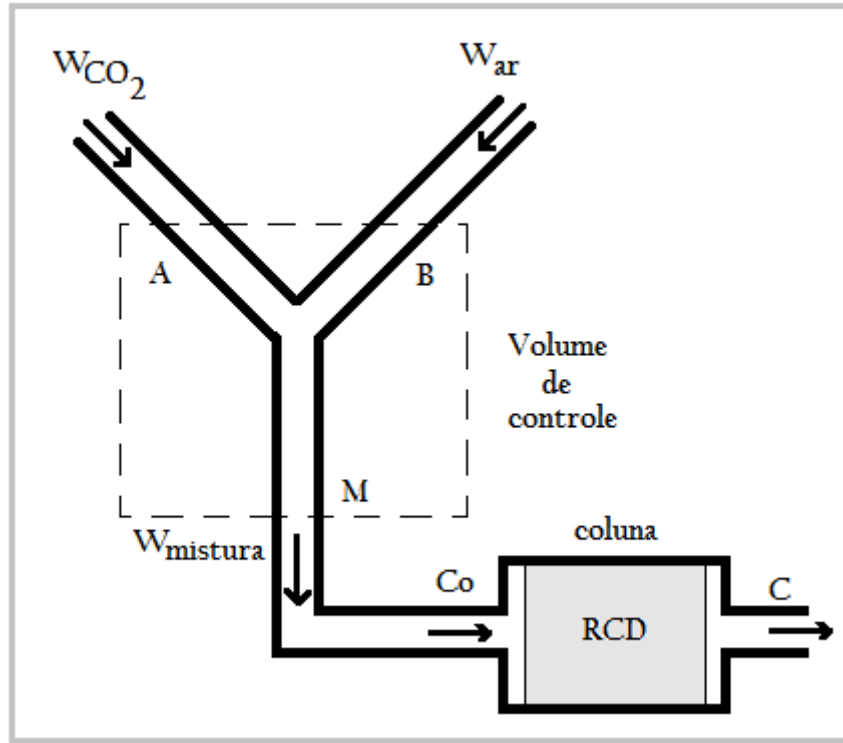


Figura 21: Notação do balanço de massa no ponto da mistura.

Na mesma Figura 21, o balanço para o CO_2 nos A, B e M tem a forma:

$$W_{CO_2,A} + W_{CO_2,B} = W_{CO_2,M} \quad (44)$$

Uma vez que o ar sintético que passa pelo duto B é praticamente isento de CO_2 (concentração menor que 0,5 partes por milhão) a equação pode ser simplificada, da forma:

$$W_{CO_2,A} = W_{CO_2,M} \quad (45)$$

A vazão mássica seca de CO_2 no duto A é dada por:

$$W_{CO_2,A} = \rho_{CO_2,A} \times Q_{CO_2,A} \quad (46)$$

$$W_{CO_2,A} = \frac{P \times M_{CO_2,A}}{R \times T} \times Q_{CO_2,A} \quad (47)$$

No duto A as condições eram: vazão de 0,54mL/s, pressão de 1 atm e temperatura de 25°C (298,15K), portanto:

$$W_{CO_2,A} = W_{CO_2,M} = \frac{1atm \times 44g/mol}{0,082atmL/molK \times 298,15K} \times \frac{1L}{1.000mL} = 0,54mL/s \quad (48)$$

$$W_{CO_2,A} = W_{CO_2,M} = \frac{0,0018g}{mL} \times \frac{0,54mL}{s} = 9,72 \times 10^{-4}g/s \quad (49)$$

Finalmente, com o tempo de 134,68s dado pela curva de ruptura determina-se a massa retida na amostra por adsorção:

$$M_{adsorção,CO_2} = 9,72 \times 10^{-4} \frac{g}{s} \times 134,68s = 0,130909g = 130,91mg \quad (50)$$

$$\frac{M_{adsorçãoCO_2}}{M_{absorçãoCO_2}} = \frac{130,91mg}{3,68mg} = 35,57 \quad (51)$$

A capacidade de adsorção é a relação:

$$capacidade = \frac{0,130909g,CO_2}{120g,amostra} = 0,001091 \frac{g,CO_2}{g,RCD} = \frac{1,1kg,CO_2}{1.000kg \text{ de RCD de } 0,30 \text{ a } 0,15mm} \quad (52)$$

A razão entre a concentração imediata e inicial (C/Co), para os resíduos seco e padrão (umidade de 1,78%), indicam que após 360s os valores estabilizaram, conforme ilustra a Figura 22, sendo que o valor para o padrão úmido se manteve abaixo de 0,6.

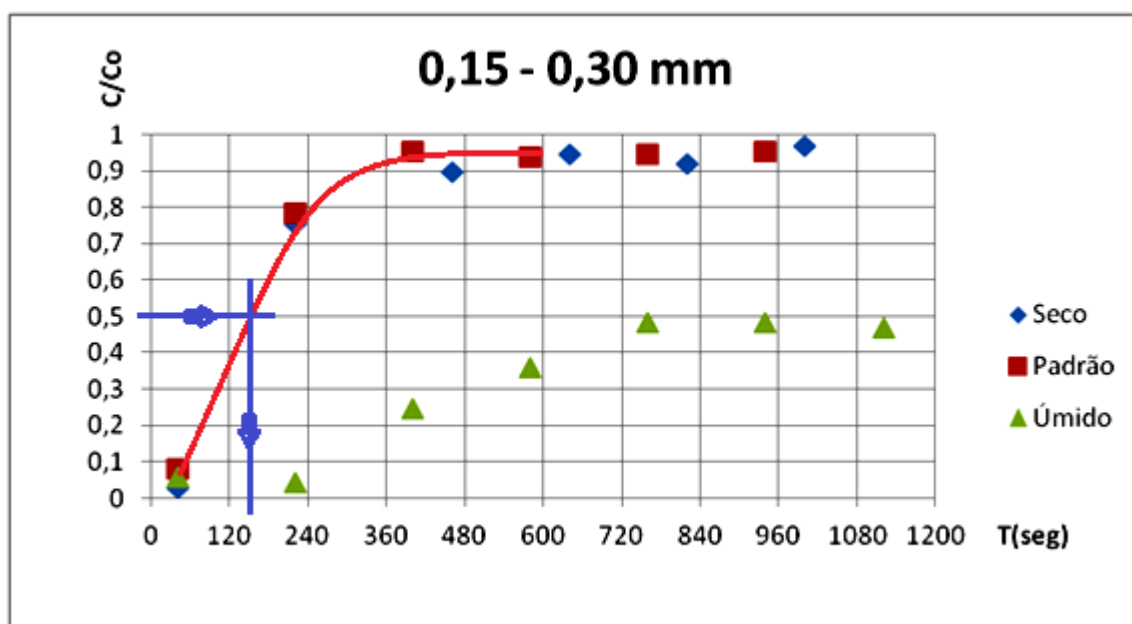


Figura 22: Relação de C/Co de resíduo misto, entre abertura de malha 0,30mm a 0,15mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.

Os resultados do resíduo misto padrão e seco foram submetidos a análise de variância de um fator, Tabela 10.

A análise de variância indica que a razão (F) é menor que a razão crítica ($F_{crítico}$), portanto não há diferença significativa entre o teste no material padrão ou seco. O teste aplicado para o resíduo misto úmido (66% de umidade) indicou diferença significativa entre as amostras, sugerindo que a absorção de CO_2 na água é menor que a adsorção no RCD.

Tabela 10: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco e padrão.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Seco	6	4,514925	0,752488	0,131108
padrão	6	4,664179	0,777363	0,120459

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001856	1	0,001856	0,014759	0,905713	4,964603
Dentro dos grupos	1,257834	10	0,125783			
Total	1,25969	11				

O ensaio foi repetido, com outra amostra, para se verificar o tempo em que se daria a relação unitária entre a concentração instantânea e inicial de CO_2 , conforme se verifica na Figura 23.

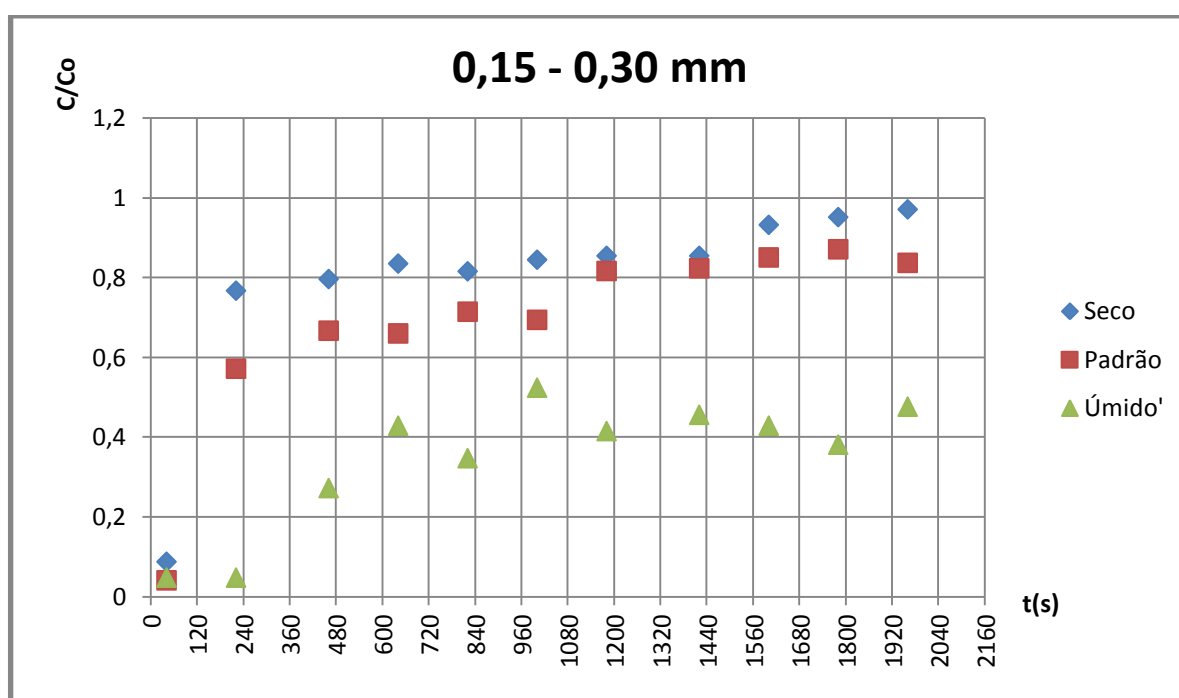


Figura 23: Curva C/Co em função do tempo, indicando estabilidade no resíduo após 600s.

O resíduo úmido registra razão entre C/Co abaixo de 0,6 e após 1.200s não apresenta variações significativas, sugerindo que os carbonatos criados, mostrado na Equação 7, atuaram tamponando os poros. O ensaio foi encerrado após 1920s, em virtude de todas as medições das amostras, seco, úmido e padrão não apresentarem variações significativas nas leituras.

A relação de C/C_0 para o resíduo misto entre as peneiras de 1,18mm a 2,00mm, indicada no APÊNDICE 3, indica estabilidade após 360s de ensaio, manteve-se praticamente estável em relação a adsorção, como mostra a Figura 24.

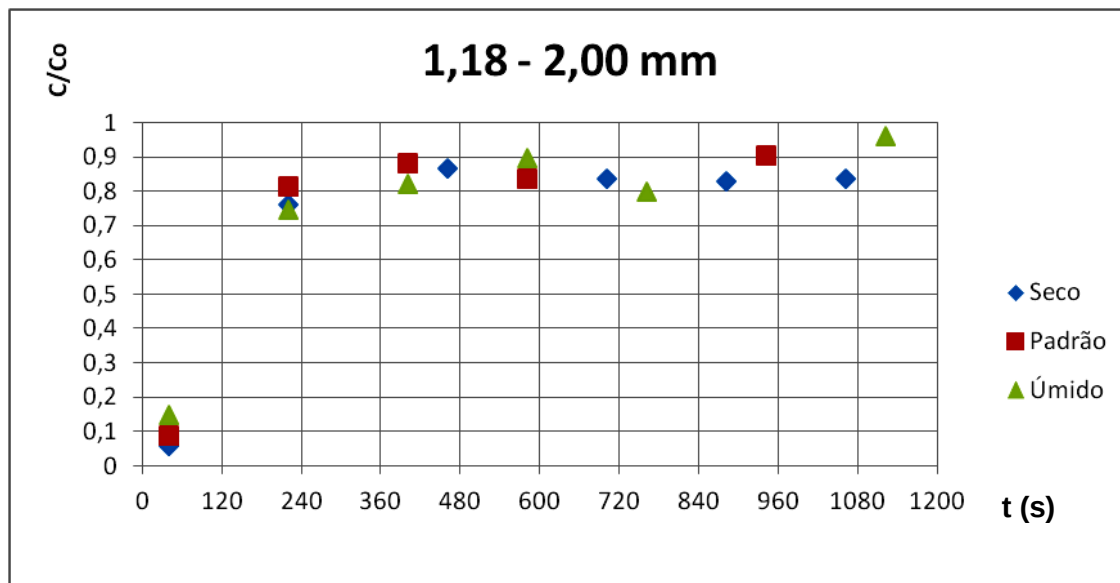


Figura 24: Relação de C/C_0 de resíduo misto, entre abertura de malha 1,18mm a 2,00mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.

Ao se aplicar o teste de variância em relação aos três graus de umidade, foi verificado que não houve diferença significativa entre as amostras, em relação a razão entre a concentração imediata (C) e a concentração inicial (C_0) de gás carbônico com o tempo, conforme se apresenta na Tabela 11. A variação entre grupos foi menor que a variação dentro dos grupos.

A granulometria maior do RCD apresenta menor área de retenção de água pelo agregado, sugerindo que a retenção de CO_2 por adsorção é maior do que por absorção.

Tabela 11: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco, padrão e úmido, entre abertura de malha 1,18mm a 2,00mm

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Seco	6	4,186567	0,697761	0,098903
Padrão	6	4,552239	0,758706	0,11318
Úmido	6	4,455224	0,742537	0,095205

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,011961	2	0,005981	0,058388	0,943497	3,68232
Dentro dos grupos	1,536441	15	0,102429			
Total	1,548402	17				

A razão (F) se manteve menor que a razão crítica (*F crítico*), para um valor de $p < 0.05$.

Os resultados apresentados na Figura 25 indicam para a amostra entre as peneiras 2,36mm e 4,75mm estabilidade nas medições após 600s de ensaio.

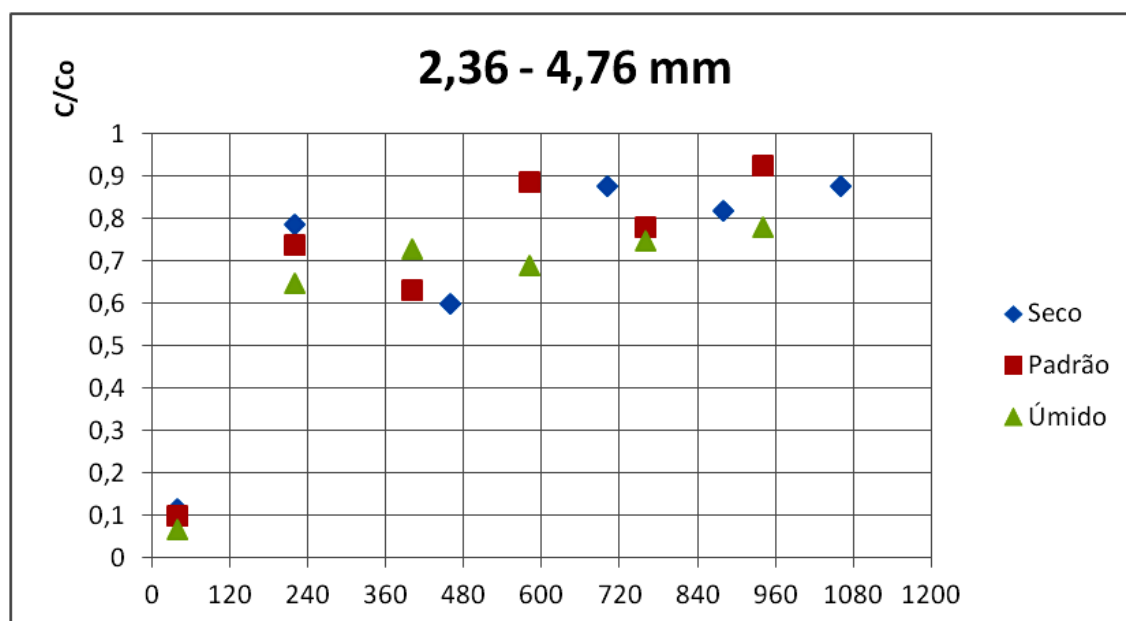


Figura 25: Relação de C/Co de resíduo misto, abertura de malha 2,36mm a 4,75mm - seco, padrão e úmido, tabelas apresentadas no APÊNDICE 3.

Os resultados das 3 (três) faixas de umidade do resíduo, Figura 24 e Figura 25 apresentaram relação de C/Co próximas a 0,8 - após 4min (240s) de ensaio, indicando que 20% da relação entre as concentrações inicial e final no período, ficou retido por adsorção no resíduo. Resultado próximo ao encontrado por GUPTA e NEMAR (2012) utilizando metodologia analítica.

Análise de variância para as amostras da figura 25, com abertura de malha entre 2,36mm a 4,75mm, Tabela 12, entre o resíduo misto padrão com 2,28% de umidade, resíduo seco e úmido a 66% do volume da coluna de recheio com 7,6g de água retida na amostra, apresentou o resultado entre grupos inferior ao valor encontrado dentro do grupo (SQ) e a razão (F) foi menor que a razão crítica ($F_{crítico}$), indicando não haver diferença significativa na adsorção em relação a variação de umidade.

Tabela 12: Teste de Variância ANOVA de fator único para o resíduo misto seco, padrão e úmido para 2,36mm a 4,75mm.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Seco	6	4,07377	0,678962	0,08695
Padrão	6	4,057377	0,67623	0,091286
Úmido	6	3,655738	0,60929	0,073036

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,018685	2	0,009343	0,111544	0,895187	3,68232
Dentro dos grupos	1,25636	15	0,083757			
Total	1,275046	17				

V. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A capacidade de adsorção/absorção do resíduo de menor diâmetro é compatível com o maior valor de pH registrado e decrescente em relação à granulometria.

Verifica-se, no APÊNDICE 4, que todas as amostras padrão e úmida apresentam curva de ruptura do tipo polinomial. Na amostra seca, a curva de melhor ajuste foi logarítmica, conforme verificado por MC CABE; SMITH; HARRIOTTI (2005).

A relação de 35,57 entre a massa adsorvida e absorvida pelo RCD demonstra que a água no RCD é responsável por uma pequena parte da retenção de CO_2 . A fixação do CO_2 no RCD é praticamente resultante da operação unitária denominada de adsorção, definida como a retenção de um gás ou líquido em um sólido por polaridade, massa molar ou forma, seguida ou não de reação química.

A capacidade de adsorção de gás carbônico foi verificada em aproximadamente 1kg de CO_2 em 1.000kg de RCD com diâmetro granulométrico entre 0,30 a 0,15mm. Com o aumento da granulometria houve uma redução da capacidade de adsorção, possivelmente pela redução da área de exposição do agregado (maior granulometria).

Como indicativo da importância dos resultados, supondo que na cidade de Santos tenha 104.000 toneladas por ano de RCD (DAMIN; SANTOS; MORAES, 2012) com a granulometria de 0,30 a 0,15mm seria adsorvido 104 toneladas de CO_2 .

Importante ressaltar que o CO_2 “sequestrado” pelo material original, mesmo depois da moagem e redução da granulometria do RCD, não foi liberado para o meio ambiente, sugerindo a permanência como carbonatos e bicarbonatos.

Aliado aos resultados obtidos no resíduo de construção e demolição haveria ainda, contribuindo para mitigação das emissões de gás carbônico pela fabricação do cimento e da cal, a carbonatação do concreto em pisos, contrapisos e estruturas, as argamassas de revestimento com base cimentícia, bem como a incorporação da escória de alto forno na fabricação do cimento.

Sugestões de trabalhos futuros:

Realizar inventário de emissões de GEE por tipo de resíduo em relação à queima no forno rotativo da fabricação de cimento, verificando a eficácia do processo;

Repetir o mesmo experimento deste trabalho em resíduo de concreto, investigando o quantitativo de gás carbônico adsorvido ou absorvido;

Verificar os resultados obtidos neste experimento utilizando registrador eletrônico de CO₂;

Identificar em teste de campo e condições ambientais a capacidade de retenção de CO₂ no RCD.

Validar, através de reação com soda cáustica os resultados de adsorção/absorção encontrados no leito de resíduo misto (tijolos, cerâmicas, argamassas).

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.B.C.P. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do Cimento Brasileiro**. Acesso em 15 de outubro de 2011. Disponível em: <http://abcp.com.br/conteudo/?p=166>.

A.B.P.C. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. Acesso em 12 de setembro de 2012. Disponível em: www.abpc.org.br/.

A.B.N.T. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15112:2004. **Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação**.

_____. NBR 15.113:2004. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes. Aterros. Diretrizes para projeto, implantação e operação**.

_____. NBR 15.114:2004. **Resíduos sólidos da construção civil. Áreas de Reciclagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação**.

_____. NBR 15.115:2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Execução de camadas de pavimentação e normas de procedimentos**.

_____. NBR 15.116:2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Requisitos**.

_____. NBR NM 248:2003. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**.

_____. NBR NM 27:2001. **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**.

_____. NBR NM 26:2009. **Agregados – Amostragem**.

_____. NBR 7211:2009. **Agregados para concreto – Especificação**.

_____. NBR 5732:1991. **Cimento Portland Comum**.

_____. NBR 11578:1991. Versão corrigida:1997. **Cimento Portland composto** - Especificação. Esta versão corrigida da ABNT NBR 11578:1991 incorpora a Errata 1 de 30/04/1997.

_____. NBR 5735:1991. **Cimento Portland de alto-forno**.

_____. NBR 5736:1991 Versão Corrigida:1999. **Cimento Portland pozolânico**.

_____. NBR 5733:1991. **Cimento Portland de alta resistência inicial.**

_____. NBR 5737:1992. **Cimentos Portland resistentes a sulfatos.**

_____. NBR 13116:1994. **Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação.**

_____. NBR 12989:1993. **Cimento Portland branco - Especificação.**

ALEXANDER, M.G; MACKECHNIE, J.R; YAM, W. Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, Issue 10, pp. 750-59. 2007

BARIN, D. S. **Carbonatação e Absorção Capilar em Concretos de Cimento Portland Branco com Altos Teores de Adição de Escória de Alto Forno e Ativador Químico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. PPGEC. Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2008

BAUER, L. A. F. **Materiais para construção.** Volume 1. 5ª edição. Rio de Janeiro. 435p. 1995.

BEGON, M; TOWNSEND, C. R; HARPER, J. L.; Tradução: Adriano Sanches. **Ecologia de Indivíduos a Ecossistemas.** 4ª edição. Porto Alegre. Artmed. 752p. 2007.

BIELLO, D. **Cement from CO₂: A Concrete Cure for Global Warming?** Scientific American. Postado em 07 de agosto de 2008. Disponível em <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=cement-from-carbon-dioxide>>. Acesso em 28 de janeiro de 2012.

CAFANGE, D. M. P. **Estudo de Métodos e Medidas Auxiliares para o Controle da Resistência à Carbonatação de Concretos Estruturais de Cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo. 2011

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia. UFG; Co-edição São Paulo: Pini, 1997.

CASTRO, B. M; BRANDINI, F. P; WAINER, I. E.K.C; DOTTORI, M. O mar de amanhã, com as mudanças climáticas de hoje. **Ciência e Cultura.** [online]. 2010, vol.62, n.3, pp. 40-42. ISSN 0009-6725.

CET – COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO, Santos, SP. **[mensagem pessoal]**. Mensagem recebida por damin@unisantabr em março de 2012.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **[mensagem pessoal]**. Mensagem recebida por damin@unisantabr em fevereiro de 2012.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário de Emissões Antrópicas de GEE Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo 1990 a 2008.** Junho de 2011a.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de GEE Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. Relatórios de Referência. Processos Industriais e Uso de Produtos. **Emissões na Produção de Cal.** fevereiro de 2011b.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. Relatórios de Referência. Agropecuária. **Emissões na Calagem.** janeiro de 2011c.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Processos Industriais e Uso de Produtos. **Emissões na Produção Metalúrgica.** março de 2011d.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Processos Industriais e Uso de Produtos. **Emissões de GEE no Setor de Espumas.** outubro de 2010a.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. 1º Relatório de Referência do Estado de São Paulo de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa de 1990 a 2008. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Associadas aos Processos Industriais: Produtos Minerais, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010b.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa Associadas ao Transporte Aéreo do Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010c.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa Associadas ao Transporte Ferroviário do Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010d.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa Associadas ao Transporte Aquaviário no Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** fevereiro de 2011e.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário**

das Emissões de Gases de Efeito Estufa pela Combustão e Fugitivas de Petróleo no Estado de São Paulo, 1990 a 2008. outubro de 2010e.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa na Indústria Química no Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** fevereiro de 2011f.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissão Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa Associados aos Processos Industriais: do Setor de Vidro no Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010f.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissão Atmosféricas dos Gases de Efeito Estufa Associadas aos Processos Industriais: da Produção de Papel e Celulose do Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010g.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissão de CO₂ por Queima de Combustíveis no Estado de São Paulo no período entre 1990 a 2008: Abordagem Setorial (Botton-up).** janeiro de 2011g.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissão de CO₂ por Queima de Combustíveis no Estado de São Paulo no período entre 1990 a 2008: Abordagem de referência (top Down).** outubro de 2010h.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissão de Metano pelo Cultivo de Arroz Irrigado por Inundação do Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** outubro de 2010i.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa ao Transporte Rodoviário no Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** fevereiro de 2011h

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Estimativa de Emissão dos Gases de Efeito Estufa na Queima de Resíduos Agrícolas no Estado de São Paulo, 1990 a 2008.** janeiro de 2011i.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. PROCLIMA - Programa de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo. **Inventário de Referência dos Gases de Efeito Estufa no Setor de Resíduos e Efluentes do estado de São Paulo.** outubro de 2010j.

CHUN, Y. NAIK, T. R. KRAUS, R. N. **Carbon Dioxide Sequestration in Concrete in Different Curing Environments**. International Conference on Sustainable Construction Materials and Tchnologics, Coventry, UK, Jun 2007.

COMISSÃO EUROPEIA – AMBIENTE – ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS – CAPTURA E ARMAZENAMENTO. **Captura e Armazenamento de Carbono uma nova e prometedora tecnologia para combater alterações climáticas**. Postado em 01 de dezembro de 2011. Disponível em <http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/news11_pt.htm>. Acesso em 16 de janeiro de 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução Nº 307**, de 5 de julho de 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução Nº 348**, de 16 de agosto de 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução Nº 431**, de 25 de maio de 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução Nº 448**, de 18 de janeiro de 2012.

DAMIN, O. C. B; SANTOS, A. R; MORAES JÚNIOR, D. Aplicação da Estatística Paramétrica na avaliação de resíduos de construção e demolição (RCD) no Município de Santos, Brasil. **UNISANTA - Science and Technology**, p. 39 - 42 , Vol. 1, Nº 1, 2012.

DECRETO Nº 7.404, DE 23 DE DEZEMBRO DE 2010. **Regulamenta a LEI nº 12.305, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa**.

DECRETO Nº 55.947, DE 24 DE JUNHO DE 2010, **Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas**.

De FRANÇA, J. F. **Estado da Arte das Pesquisas em Mudanças Climáticas no Estado do Paraná**. Curitiba. Março de 2010

DEL PINO, J. C; KRÜGER, V; FERREIRA, M. **Poluição do Ar**. Disponível em: <<http://www.iq.ufrgs.br/aeq/html/publicacoes/matdid/livros/pdf/poluicao.pdf>>. Acesso em abril de 2011.

DETRAN-SP. **Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Regional. Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.detran.sp.gov.br/>>. Acesso em: junho de 2012.

ENRICH-PLAST, A; PINHO, L. Ciclo do Carbono em Ecossistemas Aquáticos Continentais Brasileiros. **Oecologia Brasilienses**. 12(1). pp. 03-05. 2008

EUROPA – EU WEBSITE. **Armazenagem Geológica do dióxido de Carbono**. Disponível em:

<http://europa.eu/legislation_summaries/environment/.../l28201_pt.htm>. Acesso em 18 de janeiro de 2012.

FEARNSIDE, P. M. A Vulnerabilidade da Floresta Amazônica Perante as Mudanças Climáticas. **Oecologia Brasilienses**. 13(5). pp. 609-618. 2009

FONTOURA, M. L. F; MONTENEGRO, P. M. **Iniciativa de sustentabilidade do cimento contribuição da prática do co-processamento**.. Palestra. SEMA – Workshop Avanços da tecnologia de coprocessamento de resíduos. Curitiba. PR. 30 de junho de 2009a

FONTOURA, M. L. F; MONTENEGRO, P. M. **Mudanças Climáticas e processos de assegurarão do inventário de GEE na Votorantim Cimentos**. Palestra. FIEP – Workshop Inventário de emissões de GEE. Curitiba. PR. 28 de abril de 2009b

GAJDA, J. **Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement Concrete**. Portland Cement Association. Research & Development Information. PCA R&D nº 2255a. 2001

GAJDA, J; MILLER, F. M. **Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: A Literature Review and Estimation of CO₂ Absorption by Portland Cement Concrete**.. PCA R&D Serial nº 2255. Portland Cement Association. 2000. 30 p.

GARCIA, I. G; PERDRIX, C. A; RÁBADE, M. P; PERIS, P. M; AGÜI, J. C. L; BARBUDO, M. A. S. Estudio Del Efecto sumidero de CO₂ de los Materiales de Base cemento. **Cemento Hormigón**. Nº 939. Jul/ago 2010. PP. 70-83

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. PINI, 1998.

GUPTA, A; BHAVYA, M; NEMAR, A. K. CO₂ Sequestration Potential of Construction and Demolition Alkaline Waste Material in Indian Perspective. **World Academy Engineering and Tecnology** 78. pp. 947-952. 2011

GUPTA, A; NEMAR, A. K. **CO₂ Sequestration by Alkaline Wastes for Potential Application in the Landfill Environment**. International Conference on Environmental and Computer Science. IPCBEE. Vol. 19. pp. 24-28. 2011.

GUPTA, A; NEMAR, A. K. Assessment of mineral sequestration of landfill CO₂ achievable using alkaline waste residues. **European Journal of Scientific Research**. ISSN 1450-216X. Vol. 73. nº 4. pp. 480-488. 2012

GUSTAVSSON, L; PINGOUD, K; SATHRE, R. Carbon dioxide balance of Wood substitution comparing concrete and Wood-framed Buildings. In Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Volume 11, Number 3, pp.667-691. **SpringerLink**. 2006

HAMILTON, T. **A Concrete Fix to Global Warming**. Technology Review – A Publication of MIT. Publicado em 23 de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/Energy/21117/>>. Acessado em 12 de novembro de 2011.

HASELBACH, L. **Potential for Carbon Absorption in Concrete**. J. Envr. Engr. 135(6). pp. 465-472. 2009

HASTENPFLUG, D; MORAES, M. K; DALLA VECCHIA, F; COSTA, E. M; ABREU, J. V. **Carbonatação em Cimentos não Especificados em poços de petróleo**. 19 CEBiMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos do Jordão. S.P. 21 a 25 de nov de 2010

HIEB M; HIEB H. **Water vapor rules the greenhouse system**. 2006. Disponível em: <http://www.geocraft.com/WVFossils/greenhouse_data.html>. Acesso em setembro de 2012.

HUIJGEN, W. J. J; WITKAMP, T G; COMANS, R. N. J. Mineral CO₂ Sequestration by Steel Slag Carbonation. **American Chemical Society**. Environ. Sci. Technol. 39 (24), pp 9676–9682. 2005

HUIJGEN, W.J.J. & COMANS, R.N.J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. **Energy**. ECN-C--03-, 1-52. 2003

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acesso em maio de 2012.

IPCC. Climate Change 2007: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em 30 out 2011.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **O acordo de Copenhague e as decisões de Cancun no contexto da convenção do Clima**. Nº 109. 29 de agosto de 2011.

JOHN, V. M; ANGULO, S. C; AGOPYAN, V. **Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem**. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: maio de 2012.

KATSUYAMA, Y., YAMASAKI, A., IIZUKA, A., FUJII, M., KUMAGAI, K. and YANAGISAWA, Y. Development of a process for producing high-purity calcium carbonate (CaCO₃) from waste cement using pressurized CO₂. **Environmental Progress**, 24: 162–170. doi: 10.1002/ep.10080. 2005

KISS, B. GHG Protocol. **Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de Inventários corporativos e de produtos**. Seminário Internacional Avaliação Ambiental de Edifícios. SINDUSCON. Fundação Getúlio Vargas – FGV. 23 de maio de 2011

KUNZLER, C. ALVES, N. S. M. S. EINLOFT, S. DULLIUS, J. **Armazenamento de CO₂ através de Carbonatação Indireta Utilizando Resíduos de Construção Civil**. X Salão de Iniciação Científica PUCRS. 2009

LAGERBLAD, B. Carbon Dioxide Uptake Concrete life cycle – State of the art. **Swedish Cement and Concrete Research Institute**. Nordic Innovation Centre project. 2005.

LEI COMPLEMENTAR Nº. 288, DE 18 DE DEZEMBRO DE 1997. **Regulamenta o exercício da atividade de locação de serviço de remoção, transporte e destinação de entulho através de "caçambas"**.

LEI Nº 12.305, de 2 de AGOSTO de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

LEI Nº 13.798, de 9 de NOVEMBRO de 2009. **Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC**.

LEI COMPLEMENTAR Nº 792, de 14 de JANEIRO de 2013. Institui o Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil – PMGRSCC, e dá outras providências.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das Conseqüências da Produção de Concreto no Brasil para as Mudanças Climáticas**. Tese de Doutorado apresenta a Escola Politécnica da USP. SP. p. 131 2010

Luz verde para la Ley de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono. **Oilgas: petróleo, petroquímica y gas**, ISSN 0030-1493, Nº. 498, 2010 , pp. 24-25.

MATINELLI JÚNIOR, L. A. **Carbonatação Natural de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2010

MATVIENKO, B. **Uma visão crítica do aquecimento global e perspectiva dos gases de efeito estufa**. Reunião Técnica - Balanço de CO₂ em Reservatórios. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. CETESB. Palestra. Agosto de 2009

MC CABE, W.L; SMITH, J.C; HARRIOTTI P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. McGraw-Hill's. Chemical Engineering Series. 7ª edição. 2005. 1140p.

MONTENEGRO, P. M. SEMA – **Workshop Avanços da tecnologia de coprocessamento de resíduos**. Lactec. Curitiba. 30 de junho de 2009.

MORAES Jr., D.; MORAES, M. S. **Laboratório de operações unitárias II**. Santos. Ed. dos autores. 2012. 535p.

MORAIS, A. F. **Análise Setorial das Emissões de CO₂ no Brasil**. Dissertação de Mestrado em Ciências Econômicas da Universidade Estadual de Maringá. 2007.

NIENCZEWSKI, J. R. **Carbonatação de Escória de Aciaria: Uma alternativa para o sequestro de CO₂**. Dissertação de Mestrado para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Programa de Pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Março de 2009

NIENCZEWSKI, J. R; LIGABUE, R. A; DULLIUS J. E. I. **Carbonatação de Escória de Aciaria como Alternativa para o Sequestro de CO₂**. III Mostra de Pesquisa da Pós-graduação. PUCRS. 2008

NOBRE, C. A; REID, J; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP. Rede Clima/INPE. 2012. 44p.

PAIVA, S. C; GOMES, E. A. de O; OLIVEIRA, R. A de. Controle de Qualidade da Cal para Argamassas Metodologias Alternativas. **Revista Ciências & Tecnologia**. Ano 1. n. 1. Dezembro 2007

PEREIRA, E; LIGABUE, R; EINLOFF, S; KUNZLER, C; DULLIUS, J. **Aplicação de Resíduos Industriais no Sequestro de CO₂ e seu Auxílio na Mitigação das Mudanças Climáticas**. XI Salão de Iniciação Científica. PUCRS. 09 a 12 de agosto de 2010.

PEREIRA, T; LIBÓRIO, J. **Concreto com menos cimento reduz impacto ambiental**. Escola de engenharia de São Carlos. Agência USP em maio de 2011. disponível em:
<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=concreto-menos-cimento-impacto-a%E2%80%A6>> . Acesso: julho de 2012.

PERDRIX, M. del C. A. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. 1º ed. São Paulo: Pini, 1992.

PINTO, T. de P. **Panorama geral da gestão de resíduos da construção**. Seminário: A Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Gestão dos Resíduos da Construção Civil. 2011

PINTO, T. de P. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil – A experiência do SindusCon-SP**. SP. 2005.

PMS - PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTOS. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Santos**. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2012.

PUC MINAS, **Esquema gráfico do efeito estufa**. Disponível em: <www.pucminas.br>. Acesso em: 11 de dezembro de 2011.

QUÍMICA. SECRETARIA DA EDUCAÇÃO. **Cimento Ecológico Remove Gás Carbônico do Ar**. Postado em 28 de out de 2011. Disponível em: <<http://www.quimica.seed.pr.gov.br>>. Acesso em: 15 de nov de 2011.

QUINTO, A. C. **Cimento alternativo é desenvolvido na USP**. Agência USP. Site Inovação Tecnológica. Postado em 07 de outubro de 2010. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?atigo=cimento-alternativo-magnesiano>>. Acesso em 25 de abril de 2011.

RODRIGUES, C. C. **Contribuição ao estudo do tratamento do Gás Amoníaco por Adsorção em Leito Fixo de Carvão Ativado**. Tese de Doutorado. PPG em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. 2002

ROSAS, C. A. Sumideros de carbono: Solucion a la mitigacion de lós efectos del cambio climático. **Revista Científica Y Técnica de Ecología Y Medio Ambiente**. Ano XI. Nº 3. 2002.

SANTOS, M. A. ROSA, L. P. MATVIENKO, B. dos SANTOS, E. O. ROCHA, C. H. E. D. SIKAR, E. SILVA, M. B. JUNIOR, A. M. P. B. Emissões de Gases de Efeito Estufa por Reservatórios de Hidrelétricas. **Oecologia Brasilienses**. 12(1). pp. 116-129. 2008

SATO, N. M. N. **Análise da Porosidade e de Propriedades de Transporte de Massa em Concretos**. PCC USP. BT 216. 20 p. 1998

SERRANO-ORTIZ, P. CUEZVA S. KOWALSKI, A. S. SÁNCHEZ-MORAL, S. Cuantificatiión y procedência de los intercâmbios de CO₂ em um ecosistema carbonatado mediante ;a técnica de eddy covariance y El análisis de los isótopos estables de carbono. **Revista Científica Y Técnica de Ecología Y Medio Ambiente** 19(3). Pp. 41-51. sept 2010

SESERP – Secretaria de Serviços Públicos do Município de Santos. **[mensagem pessoal]**. Mensagem recebida por d.min@globo.com em setembro de 2012.

SHAO, Y; MIRZA, M. S; WU, X. CO₂ sequestration using calcium-silicate concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**. Volume 33. Number 6. Jun 2006

SHAO, Y; ZHOU, X; MONKMAN, S. **A New CO₂ Sequestration Process via Concrete Products Production**. in: EIC Climate Change Technology, 2006 IEEE. pp. 1-6

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **PRESSKIT**. 2011.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório da Indústria do Cimento**. 2010.

SINDUSCON/SP. **Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br/>>. Acesso em fevereiro de 2012.

SOARES, M. B. **Análise de Adsorção de CO₂ em Resíduo de Construção Civil**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química. **Orientador**: Dr. Deovaldo de Moraes Júnior. 2012.

SOUSA, N. J. Efeito Estufa. **Influência das queimadas da Amazônia sobre o efeito estufa**. Acesso em 11 de janeiro de 2012. Disponível em: <<http://www.floresta.ufpr.br/~lpf/efeitoestufa.html>>

STOLAROFF, J. K; LOWRY, G. V; KEITH, D. W. Using CaO and MgO-rich industrial waste streams for carbon sequestration. ScienceDirect. **Energy Conversion & Management**. Vol. 46. pp. 687-699. 2005

TAKANO, H; MATSUNAGA, T CO₂ fixation by artificial weathering of waste concrete and coccolithophorid algae cultures. **Energy Conversion and Management**. Volume 36. pp. 697-700. 1995

TECHNOLOGY REVIEW – **A Publication of MIT**. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/news/410499/a-concrete-fix-to-global-warming>>. Postado em julho de 2008. Acesso em: 20 de fevereiro de 2012.

TCHOBANOGLIOUS, G., METACALF & EDDY. **Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse**. 3 ed. Bostom: McGraw Hill. 1991.

TELES, M. LOPES, M. de L. COUTINHO, J. S. BEGONHA, A. **Aula 4 de Materiais de Construções 2**. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. Disponível em: <<http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano3/mc2/>>. Acesso em: 01 de agosto de 2012.

URIBE-RAMIREZ, A. M. **Concrete carbonation as a sink for Carbon Dioxide: Results for simulated field curing conditions**. Masters of Science. In the School of Energy, Environmental, Biological, and Medical Engineering Of the College of Engineering and Applied Sciences. B.S., Escuela de Ingenieria de Antioquia. Medellin. Colombia, Aug 2010

VILA, A; MONTÓN, R. A fondo. **Revista Greenpace**. Vol. 2. 2008a.

WERLE, A. P; KAZMIERCZAK, C. de S; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em Concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**. Vol. 11. N. 2. pp. 213-228. Porto Alegre. R. S. junho de 2011

ZAELKE, D; YOUNG, O; ANDERSEN, S. O. **Scientific Synthesis of Calera Carbon Sequestration and Carbonaceous By-Product Applications (2011)**. Disponível em: <<http://www.igsd.org/climate/documents/>>. Acesso em: julho de 2012.

ANEXO 1: Análise Estrutural e Patológica dos Postes de Iluminação das Praias de Santos; Trabalho de Conclusão de Curso, concluído em 2012. Autores: Fernanda P. Halite R. Santos; Jonas Luiz da Silva; Marcelo Regis P. Dias, Salvador R. de Medeiros. **Orientadores:** Dr. Silvio José V. Vicente e **Eng. Orlando Carlos Batista Damin**. Prêmio Dr. Milton Teixeira no Congresso Brasileiro de Iniciação Científica – 3º lugar na área de engenharia no COBRIC 2012. Publicado em: http://cursos.unisanta.br/civil/arquivos/postes_praia_unisanta.rar

Pág. 35 do trabalho.

Uma vez que o teste com fenolftaleína apresenta menor sensibilidade e tem caráter qualitativo (carbonatação ou não carbonatação), optou-se pela realização do outro teste com caráter quantitativo. Para tanto, foram realizadas as medições de pH, cujos resultados são apresentados na Figura 1 do ANEXO 1. Todas as amostras semelhantes foram agrupadas sendo apresentadas suas médias e desvios-padrão (barra).

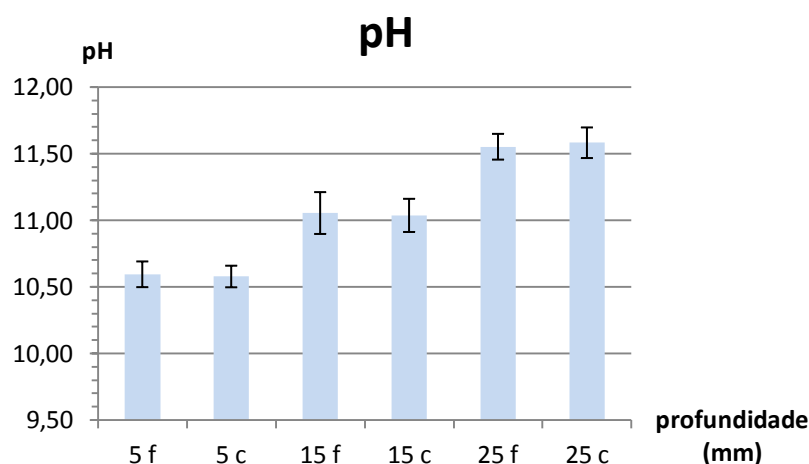


Figura 1 do ANEXO 1: Medições de pH e respectivos desvios-padrão (n = 9)
 (5f = frente do poste para o mar a 5 mm; 5c = costa do poste para o mar a 5 mm; 15f = frente do poste para o mar a 15 mm; 15c = costa do poste para o mar a 15 mm; 25f = frente do poste para o mar a 25 mm; 25c = costa do poste para o mar a 25 mm)

Através da Figura 1 do ANEXO 1, há indícios de que o grau de carbonatação depende da profundidade, mas não depende da posição relativa em relação ao mar (frente ou costa).

Visando verificar se as médias obtidas eram estatisticamente iguais ou diferentes, foi aplicado o teste t de Student com significância de $p = 0,05$ (Tabela 1 do ANEXO 1).

Tabela 1 do ANEXO 1: Resultados do teste t (carbonatação)

Amostra	Média $\pm$ dp
5 f ^a	10,59 $\pm$ 0,10
5 c ^a	10,58 $\pm$ 0,08
15 f ^b	11,05 $\pm$ 0,16
15 c ^b	11,04 $\pm$ 0,12
25 f ^c	11,55 $\pm$ 0,10
25 c ^c	11,58 $\pm$ 0,11

Diferentes letras sobrescritas indicam diferenças estatisticamente significativas ($p = 0,05$) (5f = frente do poste para o mar a 5 mm; 5c = costa do poste para o mar a 5 mm; 15f = frente do poste para o mar a 15 mm; 15c = costa do poste para o mar a 15 mm; 25f = frente do poste para o mar a 25 mm; 25c = costa do poste para o mar a 25 mm)

A análise estatística mostra a existência de carbonatação diferenciada que variou em função da profundidade do furo, mas não variou em função da posição (frente ou costa) do furo. As amostras 5f e 5c não mostraram diferença estatisticamente significativa entre ($p = 0,697$), o mesmo ocorrendo entre as amostras 15f e 15c ($p = 0,794$) e 25f e 25c ($p = 0,557$). Por outro lado, a comparação entre amostras com diferentes profundidades apresentou sempre diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$).

Diante dos resultados obtidos, podemos concluir que a estrutura de concreto dos postes/torres em estudo apresenta leve carbonatação, sendo o grau desta patologia inversamente proporcional à profundidade de amostragem (amostras superficiais apresentam grau mais acentuado de carbonatação).

ANEXO 2: Definições estabelecidas pela Resolução CONAMA nº. 307/2002.

Geradores – São pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

Transportadores – São as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

Agregado reciclado – É o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

Gerenciamento de resíduos – É o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

Reutilização – É o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;

Reciclagem – É o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;

Beneficiamento – É o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;

Aterro de resíduos da construção civil – É a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente;

Áreas de destinação de resíduos – São áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos. Os resíduos da construção civil deverão ser classificados da seguinte forma:

CLASSE A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

CLASSE B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; *(alterado pela Resolução CONAMA nº. 431/2011 de 25 de maio de 2011).*

CLASSE C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; *(alterado pela Resolução CONAMA nº. 431/2011).*

CLASSE D – São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros. Bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde *(texto alterado pela Resolução nº. 348 de 16 de agosto de 2004).*

Os resíduos da construção civil, após triagem, deverão ser destinados das seguintes formas *(nova redação dada pela Resolução 448/12 de 18 de janeiro de 2012):*

CLASSE A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros; *(nova redação dada pela Resolução 448/12)*

CLASSE B – Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

CLASSE C – Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

CLASSE D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas. *(nova redação dada pela Resolução 448/12)*

ANEXO 3: Utilização de resíduos da construção civil para execução de contrapiso em edifício de 28 pavimentos no município de Santos – SP;
 Autores: Vander Saturnino e Raoni Bezerra, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. **Orientador: Eng. Orlando Carlos Batista Damin.**
 Trabalho classificado para o Congresso Nacional de Iniciação Científica – CONIC 2012. Trabalho classificado para o Congresso Brasileiro de Iniciação Científica – COBRIC 2012.

Tabela 1 do ANEXO 3 Resistência a compressão de 3 a 28 dias da argamassa de contrapiso

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO - 1:7 (CIMENTO : RESÍDUO)						
DATA	CP Nº	fck	ÁREA (cm²)	CARGA (Kgf)	σ ruptura (Kgf/cm²)	σ ruptura (MPa)
13 de julho de 2012	1	fc3	19,635	4600	234,28	23,43
	2		19,635	4200	213,90	21,39
17 de julho de 2012	4	fc7	19,635	5450	277,57	27,76
	5		19,635	5210	265,34	26,53
	6		19,635	5460	278,08	27,81
24 de julho de 2012	7	fc14	19,635	6500	331,04	33,10
	8		19,635	5140	261,78	26,18
	9		19,635	5740	292,34	29,23
31 de julho de 2012	10	fc21	19,635	6130	312,20	31,22
	11		19,635	6660	339,19	33,92
7 de agosto de 2012	12	fc28	19,635	5140	261,78	26,18
	13		19,635	7110	362,11	36,21

Traço em volume de cimento e agregado. Resistência característica aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias em cilindros de corpo de prova de 10cm x 20cm.

As resistências obtidas são compatíveis com resultados de misturas de agregado comum e cimento para utilização como contrapiso.

ANEXO 4: Bolhômetro.

O equipamento, ilustrado na Figura 1 do ANEXO 4, foi desenvolvido no Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA. Sendo utilizado para aferir os rotâmetros de vazão baixa. Consiste em uma bureta de 50mL (Laborglas®), 2 seringas preenchidas com uma mistura de detergente e água, na proporção de 1 para 1 em volume, um sistema de válvulas e mangueiras de silicone para a passagem de ar, proveniente de um compressor de ar e um kitassato de 500mL (Laborglas®) para a coleta da mistura de água e sabão ao final do processo. Na bureta, escolheu-se um intervalo (0 a 30mL) e cronometrou-se o tempo de escoamento de uma bolha neste intervalo, assim foi obtida a vazão real do rotâmetro em mL/s.

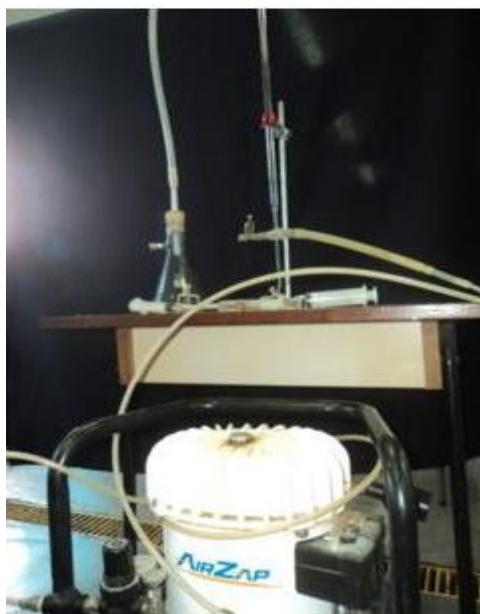


Figura 1 do ANEXO 4: Detalhe do Bolhômetro criado no Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta (SOARES, 2012)

ANEXO 5: Análise de Adsorção de CO₂ em Resíduos de Construção Civil;
 Autor: Marcel Batalha Soares, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso de
 Engenharia Química. **Orientador: Professor Dr. Deovaldo de Moraes Júnior;**

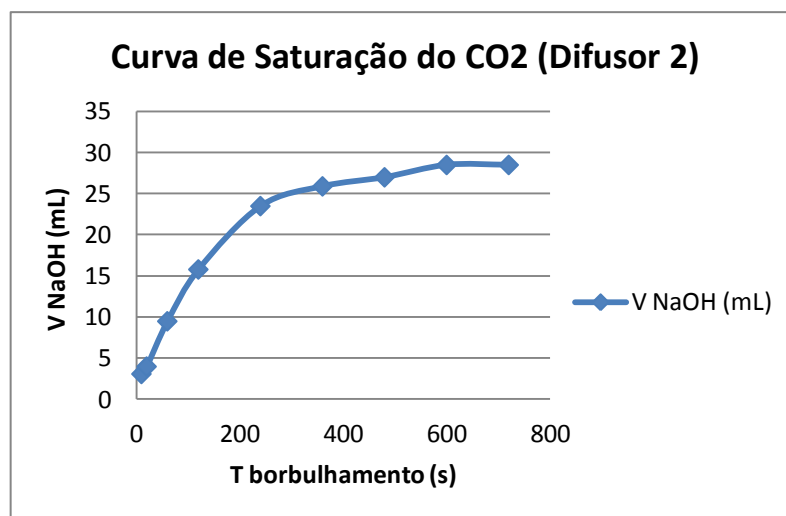


Figura 1 do ANEXO 5: Curva de Saturação do Gás Carbônico com uso de difusor 2.

Tabela 1 do ANEXO 5: Valores experimentais da concentração de gás carbônico

V ₂ (mL/s)	V ₃ (mL/s)	P _{man} (atm)	T (K)	V _{NaOH} (mL)	C _{CO2, 3} (g/L)
0,46	3,45	0,266	295,15	2,2	0,064
0,84	3,83	0,259	295,15	3,9	0,103
1,62	4,61	0,252	295,15	4,2	0,161
2,65	5,64	0,242	295,15	5,7	0,207
3,54	6,53	0,232	295,15	6,2	0,230
4,35	7,34	0,232	295,15	9,3	0,250
5,23	8,22	0,232	295,15	10,3	0,270

ANEXO 6: Conversão de peneiras Mesh x mm;

Tabela 1 do ANEXO 6: Abertura de peneiras Mesh

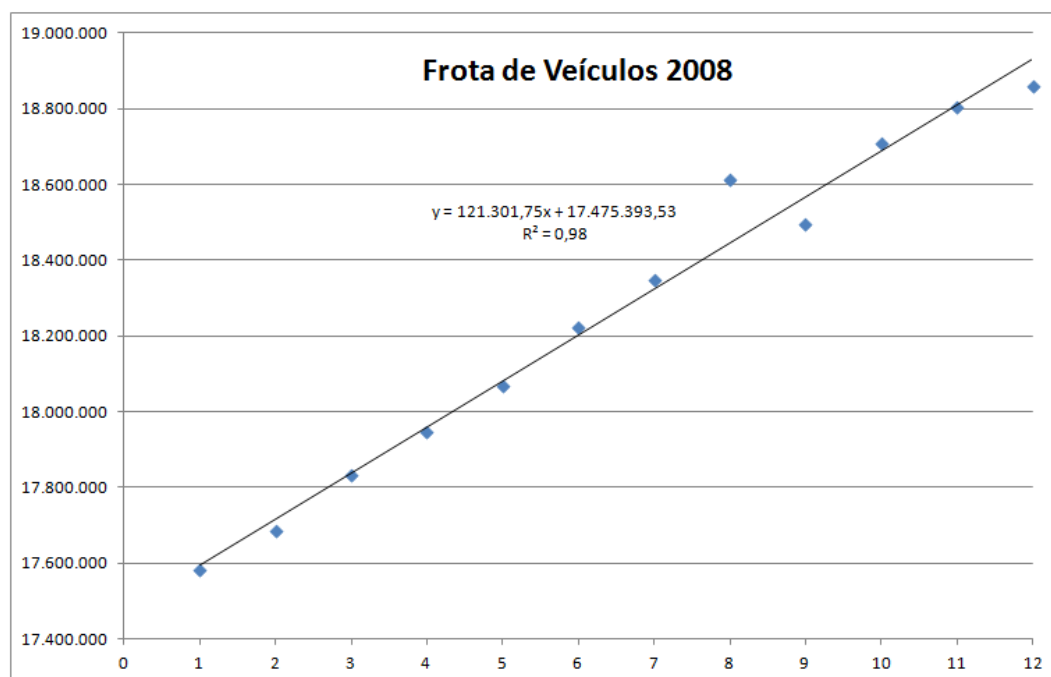
Mesh (peneira)	Abertura in	Abertura mm	Mesh (peneira)	Abertura in	Abertura mm
1	1,00	25,4	18	0,0394	1,00
7/8	0,875	22,6	20	0,0331	0,841
3/4	0,750	19,0	25	0,0278	0,707
5/8	0,625	16,0	30	0,0234	0,595
0,530	0,530	13,5	35	0,0197	0,500
1/2	0,500	12,7	40	0,0165	0,420
7/16	0,438	11,2	45	0,0139	0,354
3/8	0,375	9,51	50	0,0117	0,297
5/16	0,312	8,00	60	0,0098	0,250
0,265	0,265	6,73	70	0,0083	0,210
1/4	0,250	6,35	80	0,0070	0,177
3 1/2	0,223	5,66	100	0,0059	0,149
4	0,187	4,76	120	0,0049	0,125
5	0,157	4,00	140	0,0041	0,105
6	0,132	3,36	170	0,0035	0,088
7	0,111	2,83	200	0,0029	0,074
8	0,0937	2,38	230	0,0025	0,063
10	0,0787	2,00	270	0,0021	0,053
12	0,0661	1,68	325	0,0017	0,044
14	0,0555	1,41	400	0,0015	0,037
16	0,0469	1,19			

Observações:

Algumas vezes é usada a convenção de "-" para passagem e "+" para bloqueio. Exemplo: um material granulado -10+100 significa que passa tudo através de uma peneira de 10 mesh (partículas menores que 2 mm) e nada passa através de uma de 100 mesh (partículas maiores que 0,149 mm).

APÊNDICE 1: Venda de veículos automotores no estado de São Paulo; 2008 a 2011.

JANEIRO	17.583.419
FEVEREIRO	17.685.584
MARÇO	17.833.855
ABRIL	17.946.147
MAIO	18.069.860
JUNHO	18.224.712
JULHO	18.349.245
AGOSTO	18.612.835
SETEMBRO	18.495.820
OUTUBRO	18.706.791
NOVEMBRO	18.803.055
DEZEMBRO	18.857.936



JANEIRO	18.945.204
FEVEREIRO	19.032.069
MARÇO	19.163.320
ABRIL	19.251.148
MAIO	19.383.543
JUNHO	19.499.430
JULHO	19.595.566
AGOSTO	19.720.984
SETEMBRO	19.837.127
OUTUBRO	19.945.140
NOVEMBRO	20.062.531
DEZEMBRO	20.143.576

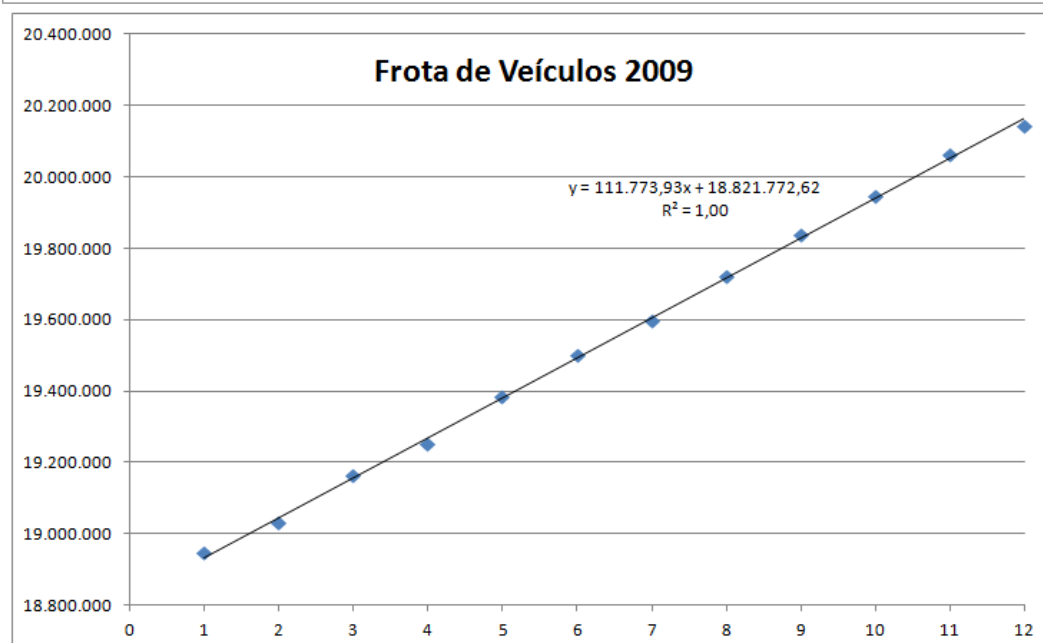
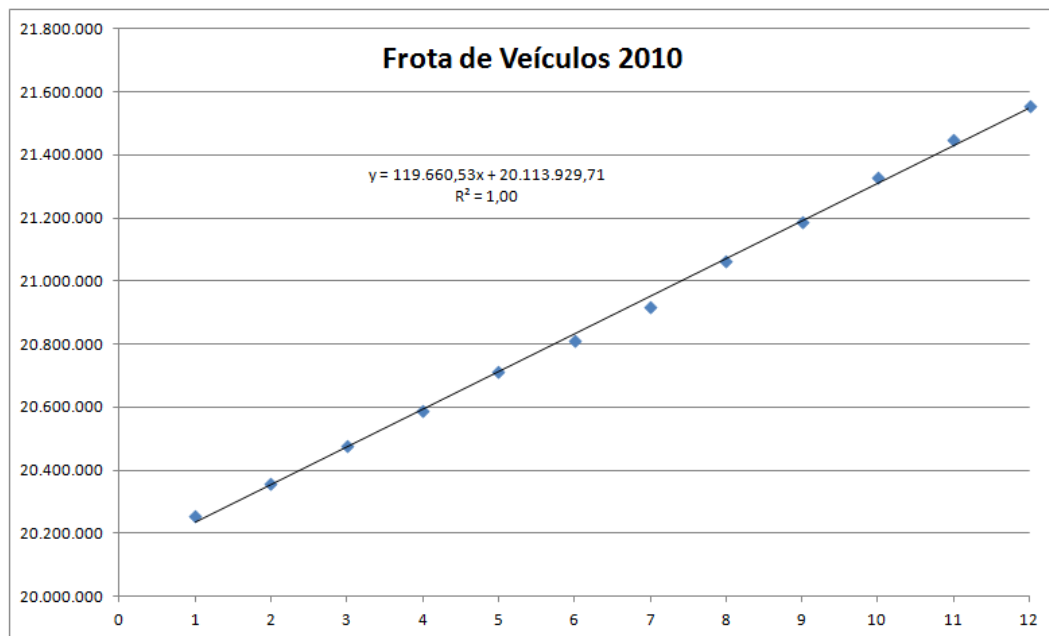


Figura 1 do APÊNDICE 1: Frota de veículos em função dos meses (2008 e 2009).

Fonte: Detran/SP

JANEIRO	20.255.878
FEVEREIRO	20.355.977
MARÇO	20.476.504
ABRIL	20.589.997
MAIO	20.710.515
JUNHO	20.809.385
JULHO	20.919.988
AGOSTO	21.065.116
SETEMBRO	21.188.977
OUTUBRO	21.327.852
NOVEMBRO	21.446.379
DEZEMBRO	21.554.110



JANEIRO	21.672.779
FEVEREIRO	21.786.464
MARÇO	21.890.207
ABRIL	21.998.419
MAIO	22.147.710
JUNHO	22.258.155
JULHO	22.402.744
AGOSTO	22.514.883
SETEMBRO	22.628.268
OUTUBRO	22.758.153
NOVEMBRO	22.876.627
DEZEMBRO	22.983.332

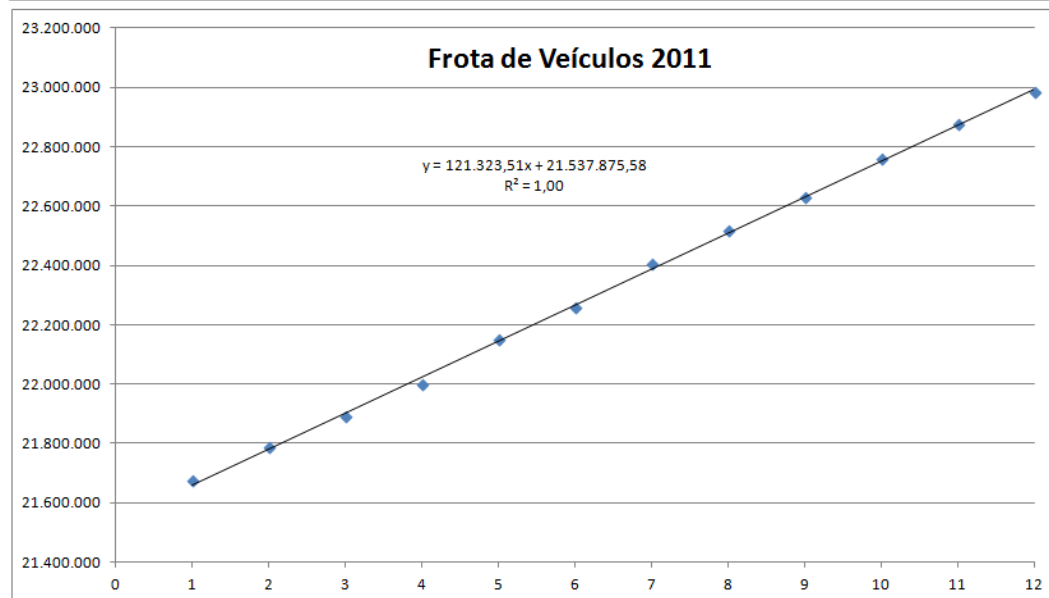


Figura 2 do APÊNDICE 1: Frota de veículos em função dos meses (2010 e 2011).
Fonte: Detran/SP

APÊNDICE 2: Curva granulométrica das amostras de resíduos de construção.

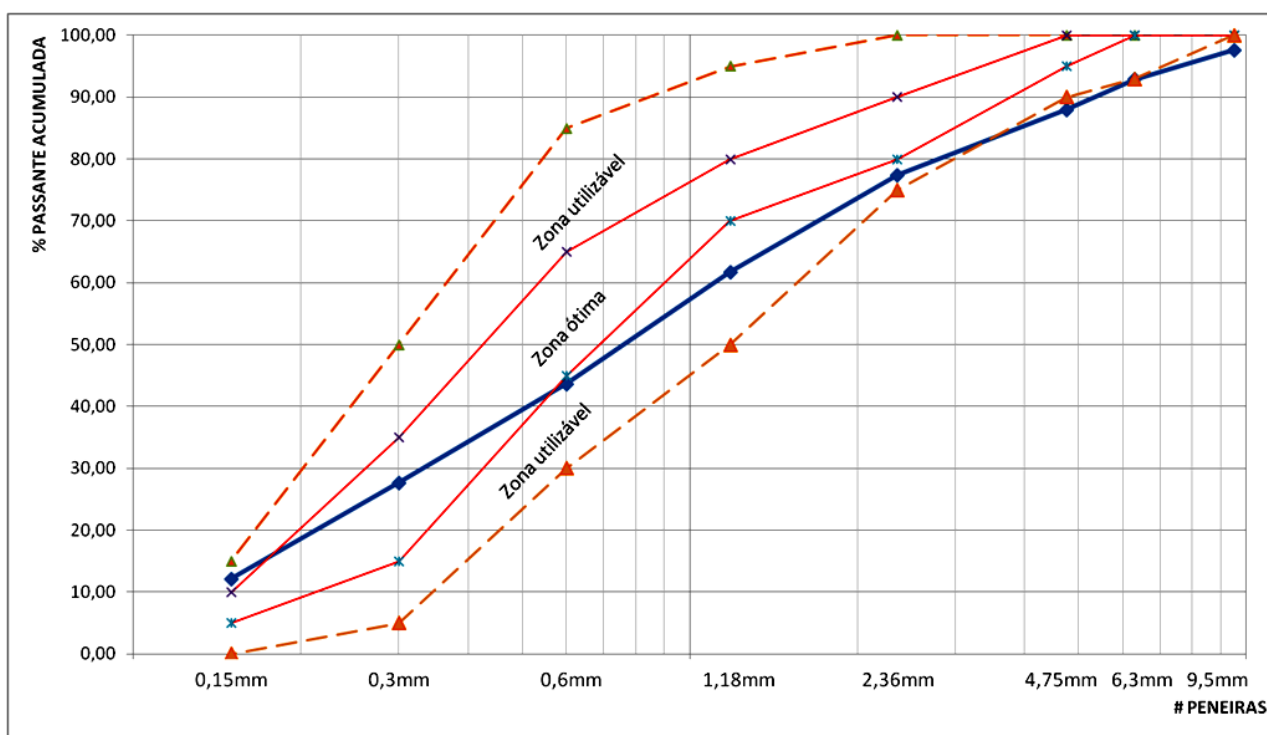


Figura 1 do APÊNDICE 2: Curva granulométrica de amostra de resíduo misto enviada pela empresa Foccus Gerenciadora de Resíduos. (n=2).

A curva granulométrica foi determinada a partir da média de duas amostras (n=2) do mesmo lote enviado.

Ensaios realizados em 05 de março de 2013.

A classificação do material de acordo com a NBR 7211 (2009) é: agregado miúdo: 0,0075mm a 4,8mm e agregado graúdo de 4,8mm a 50mm.

Todos os lotes foram classificados como agregado miúdo.

APÊNDICE 3: Resultados dos ensaios de adsorção de CO₂ dos resíduos de Construção Civil.

Granulometria: 0,30mm a 0,15mm.

Tabela 1 do APÊNDICE 3: Resíduo misto padrão com 1,78% de umidade.

PADRÃO			
Granulometria : 0,30-0,15mm			
T (s)	V NaOH (mL)	C (g/L)	C/Co
40	1,1	0,00242	0,082089552
220	11,6	0,0231	0,78358209
400	24,4	0,02816	0,955223881
580	37	0,02772	0,940298507
760	49,7	0,02794	0,947761194
940	12,8	0,02816	0,955223881
1,78% de umidade			

Tabela 2 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto seco com 0% de umidade.

SECO			
Granulometria : 0,30-0,15mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	0,4	0,00088	0,029851
220	10,5	0,02222	0,753731
460	22,5	0,0264	0,895522
640	35,2	0,02794	0,947761
820	47,5	0,02706	0,91791
1000	13	0,0286	0,970149

Tabela 3 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto úmido com 66% de umidade

ÚMIDO			
Granulometria : 0,30-0,15mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	0,8	0,00176	0,059701493
220	1,4	0,00132	0,044776119
400	4,7	0,00726	0,246268657
580	9,5	0,01056	0,358208955
760	16	0,0143	0,485074627
940	22,5	0,0143	0,485074627
1120	28,8	0,01386	0,470149254
66% de umidade = 24,6gH ₂ O			

Granulometria : 2,00-1,18mm

Tabela 4 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto seco, 0% de umidade.

SECO			
Granulometria : 2,00-1,18mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	0,8	0,00176	0,059701
220	11	0,02244	0,761194
460	22,6	0,02552	0,865672
700	33,8	0,02464	0,835821
880	44,9	0,02442	0,828358
1060	11,2	0,02464	0,835821

Tabela 5 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto padrão, 1,82% de umidade.

PADRÃO			
Granulometria : 2,00-1,18mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	1,2	0,00264	0,089552239
220	12,1	0,02398	0,813432836
400	23,9	0,02596	0,880597015
580	35,1	0,02464	0,835820896
760	48,9	0,03036	1,029850746
940	12,1	0,02662	0,902985075
1,82% de umidade			

Tabela 6 do APÊNDICE 3: Resíduo Misto Úmido, 66% de umidade.

ÚMIDO			
Granulometria : 2,00-1,18mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	2	0,0044	0,149253731
220	12	0,022	0,746268657
400	23	0,0242	0,820895522
580	35	0,0264	0,895522388
760	45,7	0,02354	0,798507463
940	14	0,0308	1,044776119
1120	26,9	0,02838	0,962686567
66% de umidade = 5,5gH ₂ O			

Granulometria : 4,75-2,36mm

Tabela 7 do APÊNDICE 3: Resíduo misto seco, 0% de umidade.

SECO			
Granulometria : 4,75-2,36mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	1,4	0,00308	0,114754
220	11	0,02112	0,786885
460	18,3	0,01606	0,598361
700	29	0,02354	0,877049
880	39	0,022	0,819672
1060	49,7	0,02354	0,877049

Tabela 8 do APÊNDICE 3: Resíduo misto padrão, 2,28% de umidade.

PADRÃO			
Granulometria : 4,75-2,36mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	1,2	0,00264	0,098360656
220	10,2	0,0198	0,737704918
400	17,9	0,01694	0,631147541
580	28,7	0,02376	0,885245902
760	38,2	0,0209	0,778688525
940	49,5	0,02486	0,926229508
2,28% de umidade			

Tabela 9 do APÊNDICE 3: Resíduo misto úmido, 66% de umidade

ÚMIDO			
Granulometria : 4,75-2,36mm			
T (s)	V NaOH (ml)	C (g/L)	C/Co
40	0,8	0,00176	0,06557377
220	8,7	0,01738	0,647540984
400	17,6	0,01958	0,729508197
580	26	0,01848	0,68852459
760	35,1	0,02002	0,745901639
940	44,6	0,0209	0,778688525
66% de umidade = 7,6gH ₂ O			

APÊNDICE 4: Curvas de ruptura de CO₂ dos resíduos de Construção Civil.

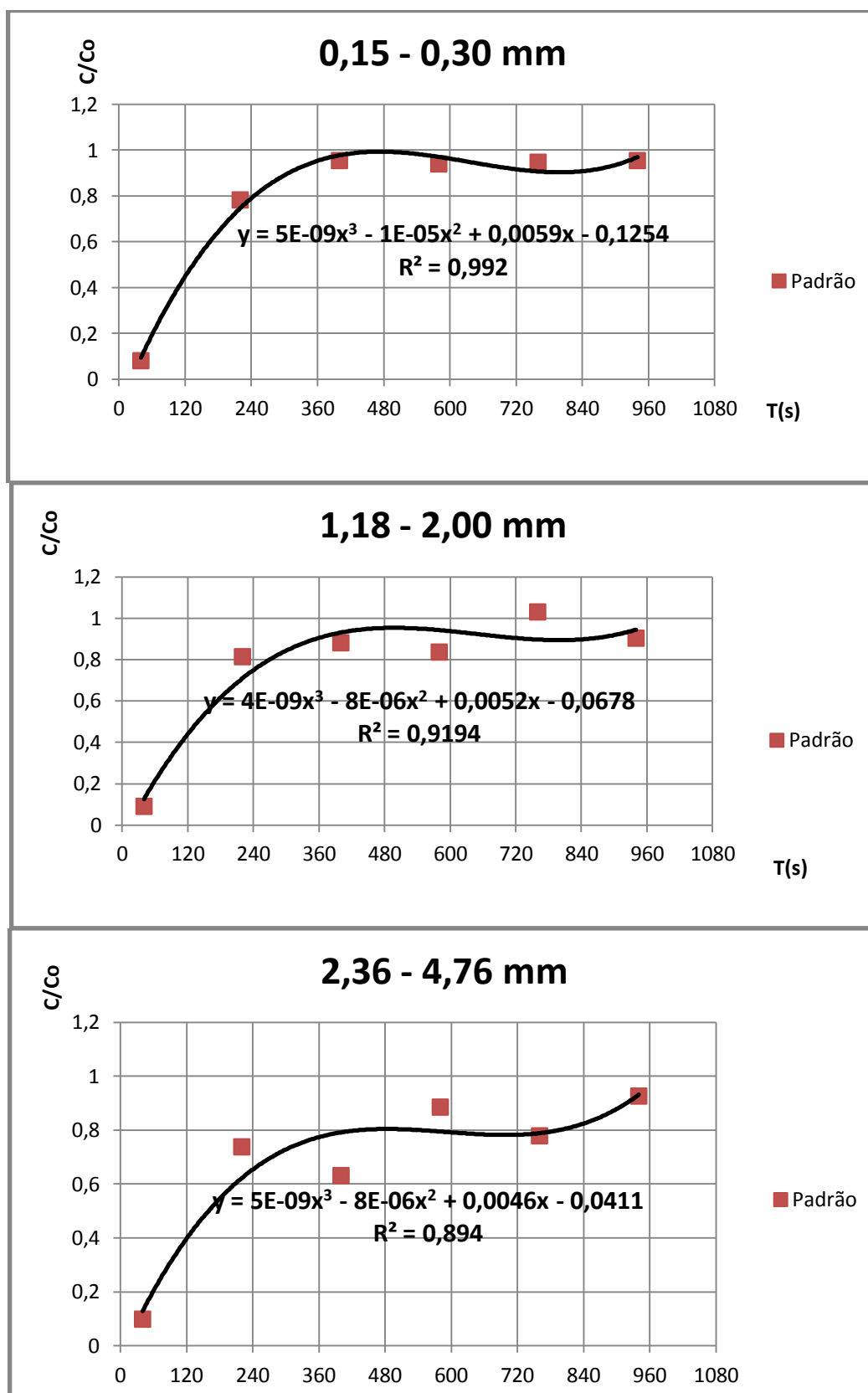


Figura 1 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura de gás carbônico para resíduo do tipo misto, material padrão.

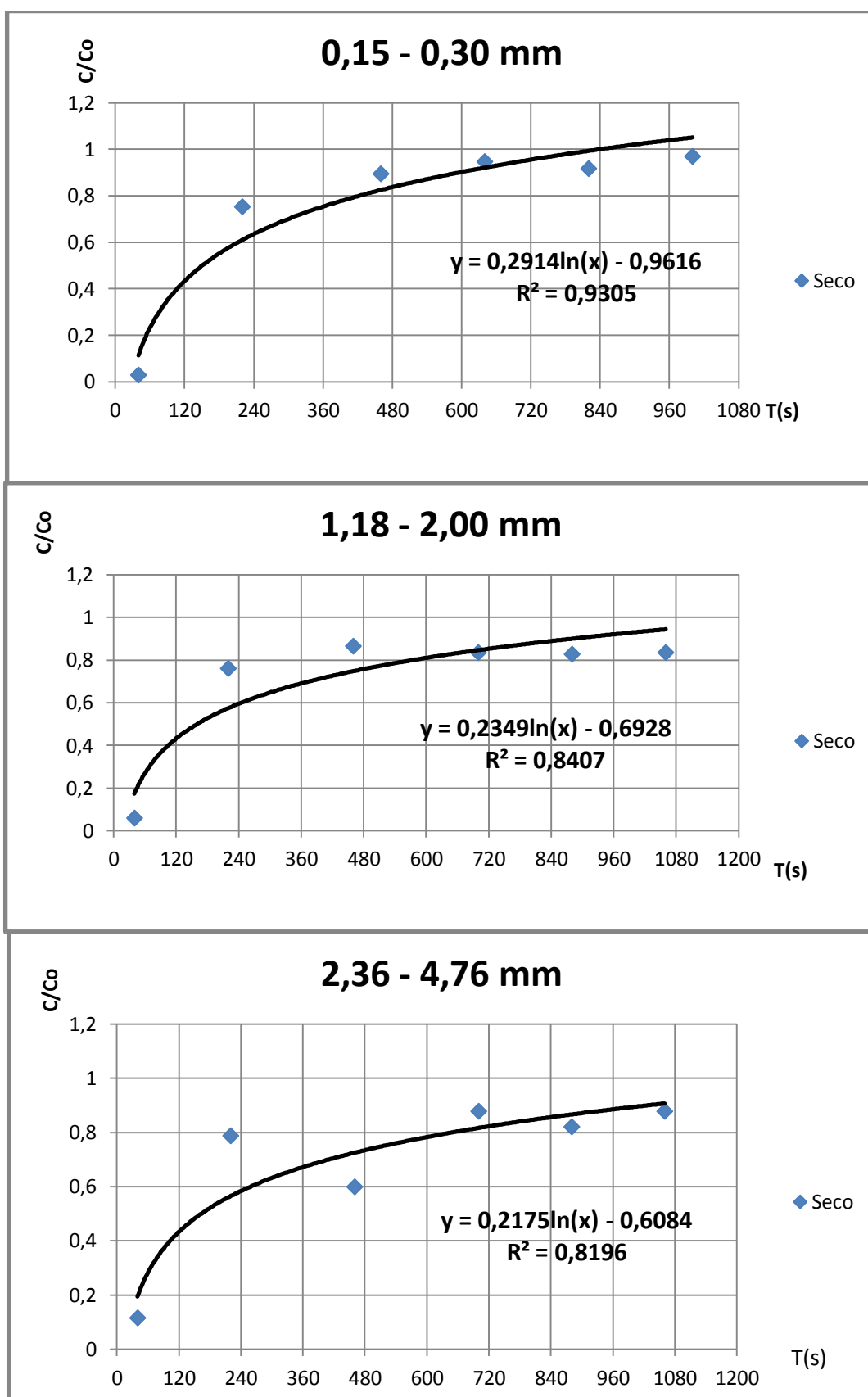


Figura 2 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura de resíduo misto, material seco.

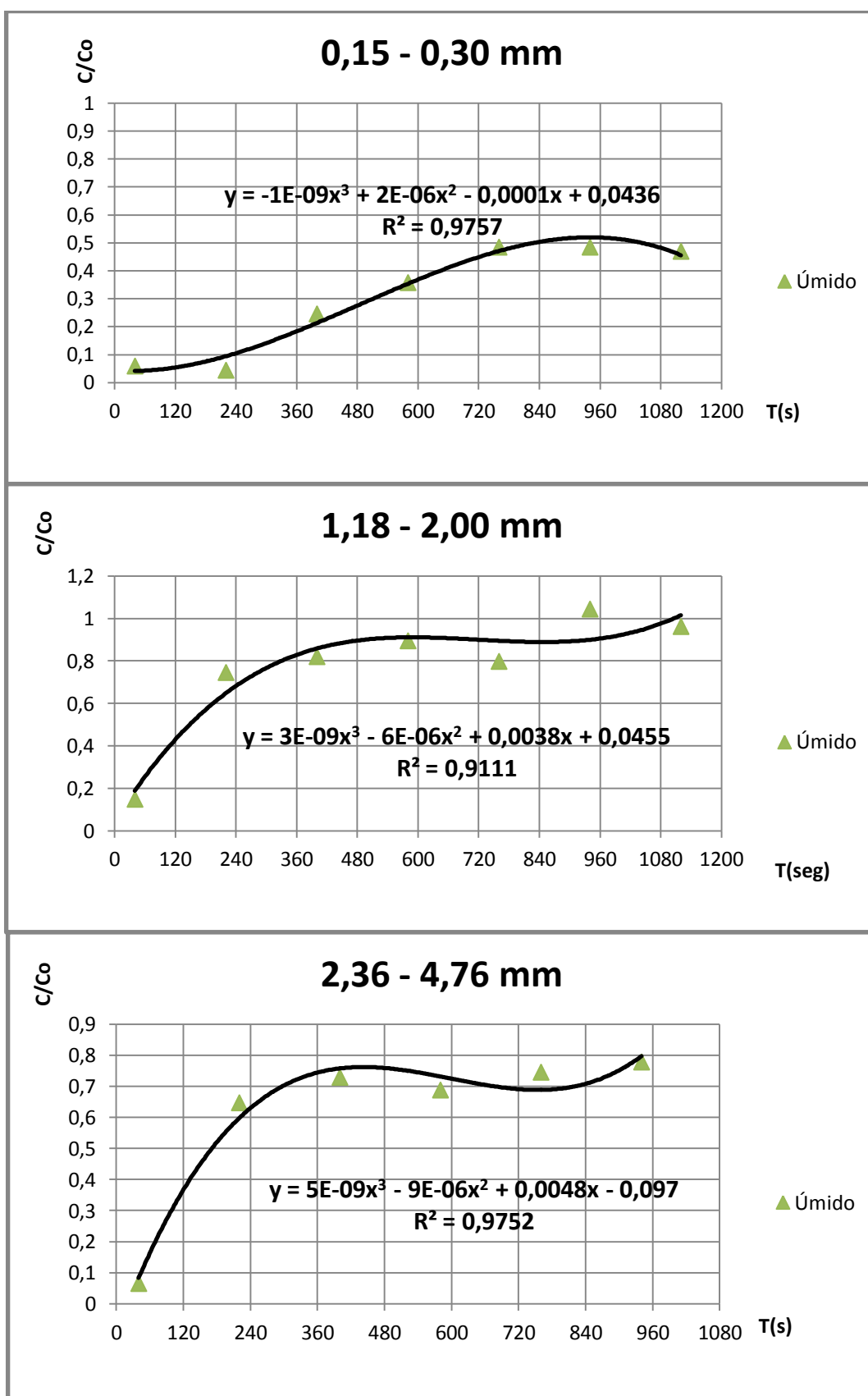


Figura 3 do APÊNDICE 4: Curvas de ruptura do resíduo misto, material úmido

APÊNDICE 5: Demolições por Bairros no Município de Santos – 2005 a 2011.
(levantamento realizado em agosto de 2012 – PMS - SIEDI – DEOP).

Tabela 1 do APÊNDICE 5: Demolições registradas por bairro no município de Santos

BAIRROS	ANO 2005	ANO 2006	ANO 2007	ANO 2008	ANO 2009	ANO 2010	ANO 2011	Total Bairro
ALEMOA	0	1	0	0	0	0	0	1
APARECIDA	3	13	15	5	7	4	7	54
AREIA BRANCA	1	0	0	0	0	1	0	2
BOQUEIRÃO	13	7	5	7	17	13	13	75
CAMPO GRANDE	11	4	7	9	2	8	0	41
CANELEIRA	1	0	0	0	0	0	1	2
CENTRO	1	0	4	0	4	0	2	11
CHICO DE PAULA	1	0	0	0	0	0	0	1
EMBARÉ	7	5	14	17	14	6	9	72
ENCRUZILHADA	7	1	3	4	0	5	7	27
ESTUÁRIO	3	6	2	4	3	3	5	26
GONZAGA	5	5	28	10	13	5	3	69
JABAQUARA	0	0	0	0	2	2	0	4
J. RÁDIO CLUBE	1	1	4	1	1	0	1	9
J. BOM RETIRO	0	0	3	0	0	1	2	6
J. CASTELO	0	0	1	0	0	0	3	4
J. SANTA MARIA	0	1	1	3	2	2	2	11
JOSÉ MENINO	2	1	7	5	4	2	2	23
MACUCO	6	2	6	6	2	10	6	38
MARAPÉ	13	9	10	5	5	12	14	68
MORRO DA NOVA CINTRA	1	1	1	1	0	1	0	5
PAQUETÁ	4	0	0	1	1	2	1	9
POMPÉIA	1	1	2	4	3	2	7	20
PONTA DA PRAIA	3	6	8	10	9	4	7	47
SABOÓ	1	0	0	0	0	0	0	1
VALONGO	0	0	1	1	0	0	0	2
VILA BELMIRO	1	2	6	3	5	3	6	26
VILA MATHIAS	6	5	5	3	4	6	6	35
VILA NOVA	1	1	2	0	2	0	1	7
VILA SÃO JORGE	0	1	2	2	1	2	0	8
Total de demolições	93	73	137	101	101	94	105	704