



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BLOCOS DE CONCRETO
ESTRUTURAL DOSADOS COM POLITEREFTALATO DE
ETILENO (PET) MICRONIZADO**

JOSÉ BEZERRA DA SILVA

Campina Grande-PB
Outubro/2016

JOSÉ BEZERRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BLOCOS DE CONCRETO
ESTRUTURAL DOSADOS COM POLITEREFTALATO DE
ETILENO (PET) MICRONIZADO**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos.
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento e Tecnologia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

Campina Grande-PB
Outubro/2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, José Bezerra da.

Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato etileno (PET) micronizado / José Bezerra da Silva. – Campina Grande, 2016.

135 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues".

Referências.

1. Engenharia de Materiais – Material Alternativo. 2. Engenharia de Processos – Desenvolvimento. 3. Alvenaria Estrutural – Propriedades. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 620.11(043)

JOSÉ BEZERRA DA SILVA

Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com Politereftalato de etileno (PET) micronizado

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos pela Comissão julgadora composta pelos membros:

Prof. Dr. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG /UAEC

Prof^a Dr^a (Co-orientadora) Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG /UAEC

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG /UAEC

Prof. DsC. Erinaldo Hilário Cavalcante
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG /UAEC

Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG /UAECg

Aprovada em 05/ Outubro/2016.

Local da Defesa: Laboratório de Engenharia de Pavimentos – CTRN/

AGRADECIMENTOS

Á Deus por sempre me proporcionar os sonhos e realizá-los.

Á Universidade Federal de Campina Grande e ao Departamento de Engenharia Civil pela oportunidade a mim concedida.

Ao chefe do Laboratório de Engenharia Civil pela disponibilização de suas instalações e pessoal técnico.

Aos meus orientadores prof. Dr. John Kennedy Guedes e a Professora Ana Maria Duarte Mendonça pela orientação, pela rigidez necessária, pelos ensinamentos, pelas suas integridade e simplicidade, qualidades estas, que contribuíram para o meu aprimoramento intelectual.

Aos Professores Doutores Adriano Elísio, Lêda Lopes, Erinaldo Hilário e José Wallace pelos ensinamentos e colaboração para realização deste trabalho.

Aos professores da área de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, pela parceria e disponibilização sempre presente.

Aos funcionários Jadilson e Joseildo sempre disponíveis.

Aos amigos, irmãos, que como eu, professamos a mesma Fé em Deus.

A todos aqueles que, de alguma forma, somaram para a concretização deste trabalho.

MENSAGEM

“A altura dos meus objetivos não me apavorará”, embora possa tropeçar frequentemente antes de alcançá-los. Se tropeçar levantar-me-ei e minhas quedas não me abaterão, pois todos os homens devem tropeçar muitas vezes para realizar os sonhos. Superar meus próprios feitos são meus alvos e isto é tudo.

Serei sempre meu próprio PROFETA, e, embora todos possam rir de meus discursos, eles ouvirão meus planos, conhecerão meus sonhos, e, assim não haverá saída para mim até que minhas palavras se tornem feitos realizados. NÃO COMETEREI O TERRIVEL CRIME DE ASPIRAR POUCO DEMAIS. EXECUTAREI O TRABALHO QUE O FRACASSO NÃO EXECUTARÁ. Jamais me contentarei com o meu desempenho profissional. Sempre elevarei meus objetivos tão logo os atinja. Sempre anunciarei meus objetivos ao mundo, contudo, jamais proclamarei minhas realizações.

Deixarei, ao contrário, que o mundo se aproxime de mim com louvores e que eu possa ter a sabedoria de recebê-los com humildade.

Augustine Mandine, 1976.

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Allysson, Andreza e Allérssio pela renúncia dos muitos dias e noites ausentes. À minha escudeira fiel, Vanda, pelo apoio sem nenhuma restrição. À Papai e Mamãe pelo exemplo de humildade, luta e perseverança.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Farol de Alexandria.....	08
Figura 2: Castelo Medieval de Windsor	08
Figura 3: Edifício Monadnock.....	08
Figura 4: Condomínio Central Park da Lapa.....	10
Figura 5: Blocos de concreto para alvenaria estrutural.....	14
Figura 6: Família dos blocos de concreto.....	15
Figura 7: Argamassamento apenas longitudinal e total.....	19
Figura 8: Formas e dimensões dos blocos de concreto.....	21
Figura 9: Tipo de blocos estudados com as dimensões em milímetros.....	23
Figura 10: Comparativo da resistência de prismas e blocos.....	25
Figura 11: Prisma padronizado com assentamento total.....	32
Figura 12: Modelos de prismas que podem ser utilizados experimentalmente.....	34
Figura 13: Distribuições de tensões no prisma, conforme Hilsdorf.....	35
Figura 14: Relação entre as tensões de compressão e tração em um bloco ou tijolo..	36
Figura 15: Distribuições de tensões segundo Atkinson e Noland.....	37
Figura 16: Deformação lateral dos blocos e argamassa de assentamento submetidos à compressão simples.....	38
Figura 17: Variação da resistência à compressão dos prismas em função do aumento de resistência dos blocos e argamassa.....	39
Figura 18: Curva tensão x deformação axial de prismas de blocos de concreto com diferentes traços de argamassas e um tipo de bloco (M1).	40
Figura 19: Resistência à compressão em função da relação a/c para mesma proporção de agregados/cimento.....	44
Figura 20: Síntese do PET a partir do ácido tereftálico (AT) e do etilenoglicol (EG).....	47
Figura 21: Fibras (a) e Embalagens (b) de PET.....	48
Figura 22: Conjunto de lavadoras e secadoras.....	57
Figura 23: Fotomicrografias dos pós de PET produzidos na moagem, não criogênica (a) e criogênica (b).....	60
Figura 24: Máquina PKM utilizada para trituração do PET.....	62
Figura 25: Tubo com pistão.....	73

Figura 26: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	77
Figura 27: Agregados graúdos – Brita (0) cascalhinho.....	78
Figura 28: Agregado miúdo (areia quartzosa).....	79
Figura 29: Cimento CP V ARI	79
Figura 30: Politereftalato de Etileno (a) Indústria PET Reciclagem; (b) PET micronizado.....	80
Figura 31: Laboratórios a serem utilizados para realização da pesquisa.....	80
Figura 32: Equipamento utilizado para realização do ensaio de EDX.....	81
Figura 33: Equipamento de Análises Térmica (ATD e ATG).....	82
Figura 34: Equipamento utilizado para realização do ensaio de DSC.....	82
Figura 35: Determinação da massa específica do agregado miúdo - Frasco Chapman.....	84
Figura 36: Execução do ensaio de determinação da massa unitária no estado solto...	84
Figura 37: Moldagem dos blocos estruturais de concreto simples.....	89
Figura 38: Estocagem dos blocos estruturais de concreto para controle de idade.....	90
Figura 39: Determinação da absorção por imersão em água.....	91
Figura 40: Determinação do peso específico de blocos de concreto.....	92
Figura 41: Equipamento usado para ensaio de resistência a compressão simples.....	92
Figura 42: Representação esquemática das etapas de cada ciclo de expansão.....	94
Figura 43: Placas de concreto de referência e do concreto com teores de 2,5% e 5,0% de PET submetidas ao ensaio de resistência a ação da chuva.....	94
Figura 44: Corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio anidro.....	95
Figura 45: Tubo de impedância	97
Figura 46: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	103
Figura 47: Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o Politereftalato de etileno micronizado.....	105
Figura 48: Análise termodiferencial e termogravimétrica do PET micronizado.....	106
Figura 49: Espectroscopia de infravermelho do Politereftalato de etileno.....	107
Figura 50: Absorção de água de blocos de concreto.....	108
Figura 51: Peso unitário dos blocos de concreto.....	109
Figura 52: Resistência característica (f_{bk}) de blocos de concreto.....	110
Figura 53: Variação de massa de placas de concreto após ataque por sulfatos.....	113
Figura 54: Deterioração de placas de concreto devido ao ataque por sulfatos.....	114
Figura 55: Variação de massa do concreto de referência (CREF) e do concreto com teores de 2,5% e 5,0% de PET micronizado após ensaio de resistência a ação da chuva.....	115

Figura 56: Coeficiente de absorção sonora para amostra do concreto de referencia.	116
Figura 57: Coeficiente de absorção sonora para amostra com 2,5% de PET micronizado.....	117
Figura 58: Coeficiente de absorção sonora para amostra com 5,0% de PET micronizado.....	117
Figura 59: Resistência dos prismas produzidos com blocos de concreto de referência (0% de PET) e com teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de PET micronizado.....	118
Figura 60: Micrografias do concreto de referencia e do concreto de 2,5% e 10 % de PET micronizado.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos blocos vazados de concreto quanto ao uso e função.....	13
Tabela 2: Dimensões (mm) de blocos inteiros em função da classe modular.....	14
Tabela 3: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração de blocos vazados de concreto para alvenarias	16
Tabela 4: Resultados médios de resistências.....	17
Tabela 5: Influência da espessura da junta na resistência do prisma.....	18
Tabela 6: Resistência das pequenas paredes em função do tipo de assentamento.....	20
Tabela 7: Resistência à compressão das argamassas.....	26
Tabela 8: Especificações dos traços das argamassas.....	27
Tabela 9: Especificações das propriedades das argamassas de cimento e cal.....	27
Tabela 10: Limites granulométricos do agregado.....	27
Tabela 11: Resultados de resistência à compressão.....	28
Tabela 12: Resultados de resistência à compressão.....	28
Tabela 13: Fator de eficiência para diversos tipos de unidades.....	29
Tabela 14: Fatores de eficiência encontrados para blocos de concreto.....	29
Tabela 15: Eficiência com relação aos prismas, paredinhas e paredes.....	30
Tabela 16: Resistência à compressão dos prismas com os blocos M1 e M2 e os diferentes traços de argamassas.....	38
Tabela 17: Propriedades do Politereftalato de etileno.....	48
Tabela 18: Aplicações de PET como função da viscosidade intrínseca.....	49
Tabela 19: Bandas de frequência.....	72
Tabela 20: Teores de substituição de agregado miúdo por Politereftalato de etileno micronizado.....	88
Tabela 21: Caracterização física do agregado graúdo.....	101
Tabela 22: Composição granulométrica do agregado graúdo.....	101
Tabela 23: Composição granulométrica do agregado miúdo.....	102
Tabela 24: Caracterização física do agregado miúdo.....	104
Tabela 25: Caracterização física do cimento.....	105
Tabela 26: Comparativo entre a resistência de blocos e prismas.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS

Lista de Símbolos

Å – angstrom

mm – milímetros

MPa – megapascal

cm – centímetros

°C – grau Celsius

E – módulo de elasticidade

d – deformação

% - percentagem

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

TG – Análise térmica gravimétrica

DTA – Análise térmica diferencial

AG – Análise granulométrica

AQ – Análise química

ASTM – American Society for Testing and Materials

DRX – Difração de raios-X

PET – Politereftalato de etileno

SINAPROCIM – Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento

UBC – Uniform Building Code

AT – Ácido tereftálico

EG – Etilenoglicol

Tg – Transição vítrea

TPA – Ácido tereftálico

DMT - Tereftalato de dimetila

RESUMO

Os blocos de concreto são os componentes mais importantes da alvenaria estrutural, uma vez que eles são os principais responsáveis pela resistência à compressão. Para que estes sejam de qualidade, a sua fabricação deve ser realizada utilizando materiais com propriedades adequadas e procedimentos de dosagem e cura controlada. A utilização de novos materiais na produção de blocos de concreto estrutural vem crescendo em todo o mundo, e, com isso, a possibilidade de utilizarem materiais alternativos, cuja principal preocupação é o equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos. Assim, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de blocos estruturais de concreto simples com adição de Politereftalato de etileno (PET) micronizado para uso na construção civil. Inicialmente as matérias-primas foram submetidas às caracterizações físicas, químicas e mineralógicas, e em seguida realizou-se o estudo da dosagem do concreto, objetivando-se determinar o proporcionamento dos materiais e os teores de PET a serem utilizados. Sequencialmente foram moldados blocos de concreto nas dimensões de 14cmx19cmx29cm, com teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de Politereftalato de etileno micronizado em substituição ao agregado miúdo para a determinação das propriedades físicas e mecânicas. Observou-se que o PET provocou o aumento da absorção e a redução do peso específico do concreto, e que o teor de 2,5% resulta em valores de absorção que satisfazem os requisitos normativos para blocos de concreto estrutural em que se utiliza agregado normal ou leve. Para a resistência característica à compressão, observou-se que o PET promoveu a redução da resistência do concreto, e, quanto maior o teor de substituição, menor a resistência à compressão. No entanto, para os teores de 2,5%, 5,0% e 7,5% de PET os valores obtidos para a resistência característica permitiram classificá-los como blocos estruturais classe B, com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo. Portanto, é viável, nos percentuais e nas condições estabelecidas nesta pesquisa, sob o ponto de vista técnico, a utilização do Politereftalato de etileno triturado em concreto para produção de blocos de alvenaria estrutural, por possibilitar a obtenção de propriedades físicas e mecânicas que satisfazem os parâmetros normativos.

Palavras-chave: material alternativo, propriedades, alvenaria estrutural.

ABSTRACT

The concrete blocks are the most important components of structural masonry, since they are mainly responsible for the compressive strength. For these to be quality, their manufacture must be carried out using materials with appropriate properties and strength and controlled curing procedures. The use of new materials in the production of structural concrete blocks has been growing throughout the world, and with it, the possibility of using alternative materials, whose main concern is the balance between the environmental, technological and economic. This work aims to evaluate the performance of simple concrete building blocks with the addition of polyethylene terephthalate (PET) micronized for use in construction. Initially, the raw materials were subjected to physical characterization, chemical and mineralogical, and then held the actual dosage of the study, aiming to determine the proportioning of the materials and PET content to be used. Sequentially were molded concrete blocks in the dimensions of 14cmx19cmx29cm, at levels of 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10% of micronized polyethylene terephthalate replacing the fine aggregate for determining the physical and mechanical properties. It was observed that the PET caused the increased uptake and reduction of the specific weight of the concrete, and that the content of 2,5% results in absorption values which satisfy the regulatory requirements for structural concrete blocks which uses regular aggregate or light. For the characteristic compressive strength, it was observed that the PET caused a reduction of strength of concrete, and the higher the replacement content, the lower the compressive strength. However, for contents of 2.5%, 5.0% and 7.5% PET values obtained for the resistance trait enabled to classify them as class B structural units, structural function, for use in masonry units above ground level. Therefore, it is feasible, in percentages and conditions set out in this study, from a technical point of view, the use of polyethylene terephthalate triturated in particular for the production of masonry blocks, by enabling obtaining physical and mechanical properties which meet the normative parameters.

Keywords: alternative material, properties, structural masonry.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	01
1. Introdução.....	01
1.2 Objetivos.....	04
1.2.1 Objetivo Geral.....	04
1.2.2 Objetivos Específicos.....	04
1.3 Justificativa.....	05
CAPÍTULO II	06
2. Fundamentação Teórica	06
2.1 Alvenaria Estrutural	06
2.2 Alvenaria estrutural no Brasil	09
2.3 Elementos da alvenaria estrutural	11
2.4 Fatores que influenciam a resistência da alvenaria.....	16
2.5 Prismas de concreto	31
2.6 Propriedades do concreto.....	40
2.7 Características gerais do concreto seco.....	42
2.8 Politereftalato de etileno – PET	46
2.9 Politereftalato de etileno micronizado.....	57
2.10 utilização do politereftalato de etileno em concreto.....	62
2.11 agentes de degradação e manifestações patológicas em concreto.....	65
2.12 Propriedades acústicas do concreto	68
CAPÍTULO III	75
3. Materiais e Métodos Empregados	75
3.1 Etapas da pesquisa	78
3.1.1 Primeira Etapa: Seleção de Materiais	78
3.1.2 Segunda Etapa: Caracterização química, física e mineralógica.....	81
3.1.3 Terceira Etapa: Dosagem dos materiais	86
3.1.4 Quarta Etapa: Caracterização física e determinação das propriedades mecânicas dos blocos de concreto incorporados com Politereftalato de etileno micronizado	90

3.1.5 Quinta Etapa - Determinação da Durabilidade: Avaliação da resistência à ação da chuva e avaliação da resistência a ação de sulfatos.	93
3.1.6 Sexta etapa – Determinação das propriedades acústicas dos blocos estruturais de concreto simples incorporados com Politereftalato de etileno micronizado.....	96
3.1.7 Sétima Etapa – Determinação da resistência à compressão de prismas produzidos com blocos estruturais de concreto simples dosados com Politereftalato de etileno micronizado.....	97
3.1.8 Oitava Etapa - Determinação da microestrutura do concreto de referência e do concreto contendo teores de 2,5% e 5,0% de PET triturado.....	99
CAPITULO IV	100
4. Apresentação e análise dos resultados	100
4.1 Caracterização dos materiais	100
4.1.1 Caracterização física do agregado graúdo	100
4.1.2 Caracterização física do agregado miúdo	102
4.1.3 Caracterização física do cimento	104
4.1.4 Caracterização química do Politereftalato de etileno – PET micronizado	105
4.2 Caracterização tecnológica dos blocos de concreto	107
4.2.1 Determinação da absorção de água de blocos de concreto incorporados com Politereftalato de etileno (PET) micronizado	107
4.2.2 Determinação do peso unitário de blocos de concreto incorporados com Politereftalato de etileno (PET) micronizado	109
4.3 Caracterização mecânica dos blocos de concreto incorporados com PET micronizado	110
4.4 Determinação da Durabilidade	112
4.4.1 Resistencia ao ataque por sulfato	112
4.1.2 Resistência à ação da chuva	114
4.5 Determinação das propriedades acústicas.....	116
4.6 Determinação da resistência de prismas produzidos com blocos de concreto estrutural dosados com PET triturado.....	118
4.7 Determinação das propriedades microestruturais do concreto de referencia e do concreto com 2,5% e 10% de PET	

micronizado.....	120
CAPÍTULO V	122
Conclusões	122
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	124
CAPÍTULO VI	125
Referências	125

CAPÍTULO I

1. Introdução

A construção civil é uma atividade importantíssima em todo mundo. Está ligada à infraestrutura de um país e tem grande geração de emprego e rendas pela grande soma de recursos aplicados, sendo um dos índices de desenvolvimento de uma nação. Representa a criação de investimentos de longo prazo em empresas diversas nas áreas de indústria, serviço e agropecuária (MENDONÇA *et al.*, 2015; CHAGAS FILHO, 2005).

O crescimento sócio-econômico implica em maior consumo de bens minerais, tornando importante garantir a disponibilidade de recursos demandados pela sociedade. Tem-se assim, uma relação intrínseca entre o desenvolvimento econômico, qualidade de vida e de bens minerais.

Nos últimos anos, a construção civil, tem sido alvo da incorporação dos mais diversos tipos de materiais, em virtude de alguns possuírem composição similar às matérias-primas naturais (PANDOLFELLI, 2009). A busca por materiais alternativos para a construção civil com finalidade de baratear custos é imperiosa, diante do crescimento populacional existente, limitação de

recursos econômicos e escassez de recursos naturais pelas altas demandas de consumo.

O uso de Plásticos para aplicações diversas tem evoluído rapidamente no mundo. Desde a descoberta do primeiro plástico sintético, no início do século XX, ele vêm sendo aperfeiçoado e aplicado nos mais diversos usos da atividade humana.

O Politereftalato de etileno (PET) é um termoplástico largamente utilizado em todo o mundo para a fabricação de embalagens, notadamente garrafas para bebidas carbonatadas; esse derivado de petróleo, substância não renovável, produzido a partir da resina de polietileno de baixa densidade, pode levar séculos para se decompor de forma natural (Du *et al.*, 2010). Provoca degradação ao meio ambiente como poluição de rios e oceanos, gerando desequilíbrio na cadeia alimentar, além de liberação de toxinas nocivas à saúde dos seres vivos, tendo no seu processo de fabricação uma grande quantidade de poluentes químicos.

Entre as principais características do PET, pode-se destacar a baixa densidade, a transparência, o brilho, o bom desempenho em diferentes performances, a segurança e a facilidade de moldagem, além de proporcionar uma alta resistência mecânica e química (MARINI, 2012). O PET possui também uma excelente barreira para gases e odores. Devido às excelentes características, tem conquistado um grande espaço no mercado de resinas termoplásticas, crescendo exponencialmente nos últimos anos. O baixo custo de produção e consequente aperfeiçoamento de seu processo de fabricação, fez do PET um dos principais plásticos da atualidade (GANDINI *et al.*, 2009).

Decorrente da crescente utilização do PET em embalagens plásticas a necessidade de sua reciclagem tornou-se imperativa e os estudos das propriedades do material reciclado vem sendo muito abordado uma vez que sua produção tem crescido a uma taxa de 10% ao ano (BEZERRA *et al.*, 2015).

O estudo de materiais poliméricos é de grande importância tecnológica devido à sua relação com as condições de processamento que afetam a sua morfologia e consequentemente suas propriedades físico-químicas e mecânicas. O presente estudo envolve investigações sobre as relações

existentes entre a estrutura e as propriedades dos materiais envolvidos. O aproveitamento do PET para aplicação na construção civil é um desafio que conjuga aspectos ambientais, sociais e econômicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de blocos de concreto estrutural com substituição parcial do agregado miúdo por Politereftalato de etileno triturado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar as propriedades químico-mineralógicas do Politereftalato de etileno;
- ✓ Estudar as propriedades físicas, de estado e mecânicas de misturas de Politereftalato de etileno - PET, cimento e agregados;
- ✓ Obter o teor ótimo de Politereftalato de etileno (PET) para mistura ideal no concreto simples com função estrutural
- ✓ Contribuir para redução do volume de Politereftalato de etileno – PET disposto no meio ambiente.
- ✓ Avaliar a microestrutura de blocos de concreto estrutural dosados com PET nos teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.

1.3 Justificativa

A busca por materiais que sejam eficientes e causem pouco ou nenhum dano ao meio ambiente vem incentivando cada vez mais pesquisas sobre produtos oriundos de fontes renováveis e cuja exploração gere benefícios à sociedade que os explore. A utilização de resíduos tem se mostrado como uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria prima e pela redução das áreas de disposição, considerando o crescente volume de resíduos descartados a cada ano em todo o mundo.

O PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. No Brasil, sua principal aplicação é na indústria de embalagens (71%) (Romão et al., 2009). O segmento do mercado nacional da indústria alimentícia e de embalagens corresponde a 32% do mercado brasileiro de polímeros envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas.

Devido à grande quantidade e variedade das aplicações dos polímeros e o seu tempo de degradação relativamente longo, eles são considerados os grandes vilões ambientais por ocuparem uma boa parte do volume dos aterros sanitários. No entanto, os problemas ambientais não são causados pelos polímeros e sim pelo seu descarte de forma inadequada. A reciclagem sistemática dos polímeros é a solução para minimizar esse impacto ambiental.

No Brasil, em 2012, foram produzidas 331 ktons de garrafas PET, deste total, apenas 58,9%, ou seja, 195 ktons foram reciclados. Sem dúvidas, o restante das 136 ktons foi descartado diretamente na natureza. Ou seja, o Brasil é um dos maiores recicladores mundial, no entanto, ainda apresenta problemas quanto ao descarte deste produto.

Estudos envolvendo a produção de blocos estruturais de concreto simples com incorporação de PET triturado possibilitarão uma análise quanto a parcial diminuição e/ou melhor disposição final desse resíduo sobre o meio ambiente e, ao mesmo tempo, permitirá avaliar as propriedades físicas, de estado e mecânicas dos produtos incorporados ao resíduo e o desenvolvimento de procedimentos e de técnicas para o seu aproveitamento.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo foi realizada uma revisão da literatura com aspectos para motivar o interesse sobre a utilização de polímeros, especificamente do Politereftalato de etileno (PET) no comportamento mecânico de blocos estruturais de concreto simples.

2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural é uma técnica bastante antiga, sendo empregada desde as primeiras construções realizadas pelo homem, tais como pirâmides e catedrais. Inicialmente eram utilizadas unidades de baixa resistência e métodos empíricos de cálculo nessas construções, o que resultava em estruturas bem mais robustas do que as atuais. As técnicas construtivas foram sendo aprimoradas com o emprego de materiais de maior resistência e o desenvolvimento de pesquisas que apresentaram novas alternativas (REZENDE, 2013).

Na construção em alvenaria estrutural, são empregadas paredes de blocos como elementos resistentes, apresentando uma série de aspectos técnico-econômicos que justificam sua aplicação. Essas paredes são elementos portáteis capazes de resistirem a outras cargas, além de seu peso próprio. Os blocos, que são unidos por juntas de argamassas, formam um conjunto rígido e monolítico que deve apresentar funções estruturais, resistência a impactos, estanqueidade e conforto térmico e acústico da obra (REZENDE, 2013).

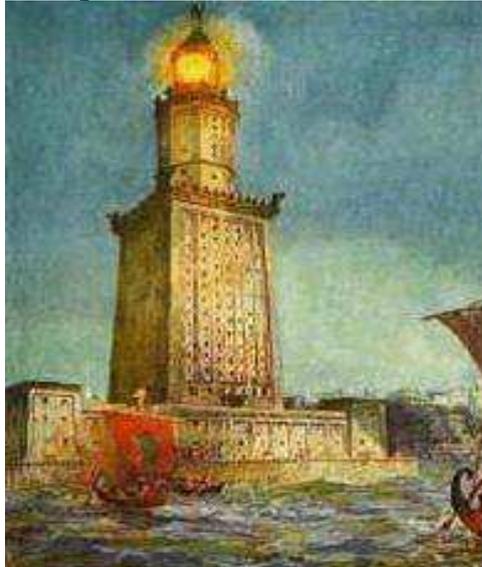
A principal vantagem desse sistema construtivo reside no grande potencial de racionalização de todas as etapas de construção, através da otimização do uso de recursos temporais, materiais e humanos.

Em razão dessas e de outras vantagens, o uso da alvenaria estrutural de blocos de concreto para construção de edifícios, tem se intensificado nos últimos anos. Nesse tipo de estrutura, os blocos de concreto empregados nos primeiros pavimentos geralmente possuem resistências acima de 12 MPa. Para atingirem essa resistência, os blocos devem possuir alta compactidade e uma textura superficial bastante fechada, fato que pode dificultar a aderência com a argamassa de assentamento.

2.1.1 HISTÓRICO

Durante muito tempo, a alvenaria foi o material mais utilizado nas construções, e o bloco cerâmico o principal insumo utilizado. Um exemplo dessas construções, considerada uma das maiores produções da técnica, é o Farol de Alexandria (Figura 1), construído por volta de 300 a.C e arquitetado pelo grego Sóstrato Cnido, que foi erguido sobre uma base quadrada, com 150 metros de altura, que serviu de guia para os navegantes num raio de 55 quilômetros.

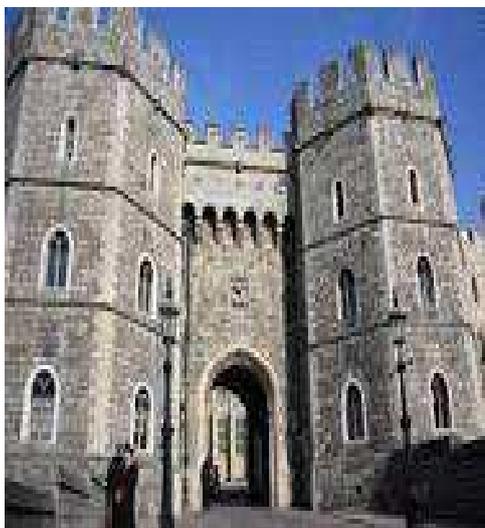
Figura 1: Farol de Alexandria.



FONTE: Disponível em: <<http://ce.eng.usf.edu/pharos/wonders/>>.

Apesar da alvenaria de pedra e blocos cerâmicos já serem empregados desde à Idade Antiga nas construções faraônicas, passando pela Idade Média, nas construções de grandes castelos e catedrais, como por exemplo, o Castelo de Windsor (Figura 2), localizado na Inglaterra, somente em 1880 as primeiras pesquisas sistemáticas sobre o método construtivo de alvenaria estrutural foram realizadas nos EUA. E baseado nestas pesquisas, em Chicago foi erguido o Edifício Monadnock (Figura 3), com 16 pavimentos e 65 metros de altura. Algumas de suas paredes, na base, medem 1,80 metros de espessura (CARVALHO, 2008).

Figura 2: Castelo Medieval de Windsor



FONTE: www.viator.com/castelo_windsor

Figura 3: Edifício Monadnock



FONTE: <http://www.monadnockbuilding.com/index.html>

No início do século XX, com o surgimento do concreto armado, a alvenaria como elemento estrutural foi abandonada, e somente na década de 50, na Inglaterra após realizações de ensaios e a primeira norma para cálculo de alvenaria estrutural publicada, é que foram retomadas as construções de prédios relativamente altos na Europa. Apesar desse sistema construtivo já ser bem difundido hoje em dia, no Brasil, somente na década de 60, é que surgiram as primeiras construções em habitação popular (CARVALHO, 2008).

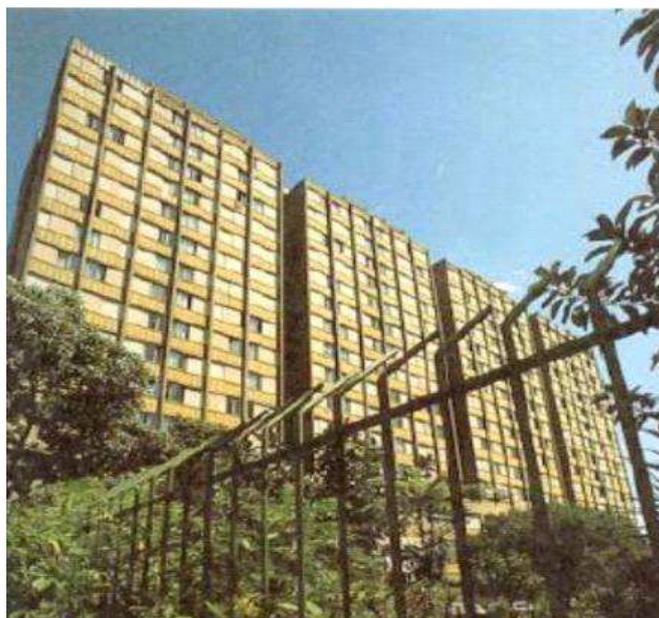
2.2 ALVENARIA ESTRUTURAL NO BRASIL

A história brasileira registra que a técnica da utilização da taipa, aqui chegada nos primórdios da colonização, difundiu-se largamente, representando elemento preponderante na construção de prédios em que a durabilidade era a preocupação maior. A taipa é uma terra simplesmente apiloada, socada. Para adquirir a rigidez imprescindível a uma estrutura, ela requer espessura exagerada, o que reduz os espaços da edificação. O desenvolvimento impõe a modernização das paredes a fim de se obter maiores espaços úteis (REZENDE, 2013).

As cidades se ampliavam, requerendo melhorias nas edificações urbanas e exigindo um sentido estético mais compatível com as mudanças econômicas, culturais e políticas da sociedade.

Os primeiros edifícios em alvenaria estrutural armada foram construídos em São Paulo em 1966, no Conjunto Habitacional “Central Parque da Lapa”. Porém, o marco mais importante foi a construção, em 1972, de 4(quatro) edifícios de 12 pavimentos no mesmo conjunto (Figura 4).

Figura 4: Conjunto habitacional “Central Park”



FONTE:<http://www.parquedalapa.com/index.html>.

Com o aprimoramento das técnicas com a utilização dos blocos estruturais, o mercado começa a dar espaço para novas edificações. Em 1988, são construídos 12 edifícios no bairro do Brás, em São Paulo, com 19 pavimentos. Até então eram os edifícios mais altos já construídos no Brasil, em alvenaria estrutural armada. Nos anos 90 é construído o edifício residencial “Solar dos Alcântara”, no bairro da Penha, em São Paulo, com 21 pavimentos.

Passada a crise mundial, após um ano de recessão, em 2010 o Brasil retomou o caminho do crescimento econômico. Assim como os outros setores da indústria, a construção civil também sofreu impactos da crise econômica, o que obrigou o Governo Federal a tomar medidas de incentivo como a redução do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) para alguns materiais de construção e o lançamento de programas de concessão de subsídios como o Programa Minha Casa Minha Vida, cujo sistema adotado, quase em sua totalidade é a alvenaria estrutural, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de estudos de aprimoramento de métodos e aplicações da alvenaria estrutural (BEZERRA, 2012).

Atualmente, com a grande quantidade de obras construídas neste sistema, a resistência do mercado da construção em aceitar esse sistema

construtivo não existe mais, pois já é de conhecimento no meio que a alvenaria estrutural é um sistema de grande potencialidade. Portanto, esse sistema que era sinônimo de estrutura para conjuntos habitacionais para população de baixa renda, hoje já é aplicado em obras de alto padrão sem a menor resistência do mercado imobiliário (CARVALHO, 2008).

2.3 ELEMENTOS DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Com os diversos métodos e formas de realização de alvenarias é importante garantir a segurança de uma estrutura a ser executada. Portanto, deve-se fazer uma análise da qualidade dos materiais a serem empregados especialmente em alvenarias estruturais de blocos de concreto (SANTOS 2004; COUTINHO *et al.*, 2015). Os termos, materiais, componentes e elemento são definidos conforme a norma da ABNT NBR 10837 (ABNT 1989), onde materiais são as partes elementares da alvenaria estrutural, como a areia, a pedra, o cimento, a cal e a água; componentes são formados a partir dos materiais básicos, como, argamassas e grautes; já os elementos são partes mais elaboradas constituídas da união de um ou mais componentes, como prismas, paredes, blocos, etc (SANTOS 2004).

2.3.1 Blocos Estruturais do Concreto Simples

Os blocos são tratados como unidades, que é o principal responsável pela resistência do prédio, quanto à forma podem ser maciços ou vazados, sendo tijolos e blocos respectivamente. Os que possuem um número de vazios de no máximo 25% são considerados maciços, e com mais de 25% são vazados. As unidades mais utilizadas atualmente no Brasil para os edifícios em alvenaria estrutural são os blocos de concreto. Esta escolha reside no fato de haver normas brasileiras para o cálculo e execução com este tipo de bloco, além de os blocos de concreto atingirem resistências maiores, sendo, portanto, adequados aos edifícios mais altos (REZENDE, 2013).

Segundo a norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014), “bloco vazado é o elemento da alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior 75% da área bruta”. É um componente industrializado, produzido em equipamentos que realizam a vibração e prensagem dos insumos utilizados na sua composição e fabricação.

De acordo com dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento – SINAPROCIM (2010), a produção de blocos de concreto representou em 2010 o percentual de 15,66% do faturamento total do setor, apresentando crescimento de 18,50% em relação a 2009. Em 2011, devido ao grande aumento da capacidade instalada e também à diminuição do crescimento do PIB brasileiro, o índice de crescimento não ultrapassou a 7% porém, em 2012 alcançou 30% no faturamento das indústrias de blocos vazados de concreto.

O déficit habitacional brasileiro é de 5,5 milhões de moradias, de acordo com o Ministério das Cidades (Brasil, 2011), logo, a indústria de blocos de concreto se apresenta promissora tanto como empreendimento econômico como solução construtiva para viabilização de habitações com menor custo e em menor tempo. Apesar do custo unitário ser mais elevado, a operacionalidade e a economia de material que o uso de blocos de concreto proporciona, podem reduzir o custo final na execução de alvenarias.

Para que os blocos de concreto sejam de boa qualidade, a sua fabricação deve ser realizada utilizando materiais industrializados, equipamentos de boa precisão, procedimentos de dosagem e idade controlada (Alves, 2004(a)). Os blocos de concreto devem ser produzidos com agregados inertes e cimento Portland, sem ou com aditivo. Permite-se o uso de aditivos desde que não haja prejuízo para a resistência e que isto seja comprovado em ensaios (REIS, 2011).

A norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014) classifica os blocos quanto ao uso e função e especifica os requisitos mínimos exigidos para as propriedades físicas e mecânicas (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação dos blocos vazados de concreto quanto ao uso e função.

Classe	Função	Condições de uso
A	Estrutural	Alvenarias acima ou abaixo do nível do solo
B	Estrutural	Alvenarias acima do nível do solo
C	Estrutural/ Não estrutural	Alvenarias acima do nível do solo

FONTE: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Portanto, de acordo com a norma da ABNT NBR 6163 (ABNT, 2014), os blocos vazados, podem ser assim definidos quanto ao uso e função:

Estrutural: aplicados em alvenaria estrutural, armada e parcialmente armada, permitindo que as instalações elétricas e hidráulicas sejam embutidas na fase de elevação da alvenaria.

Vedação: para fechamento de vãos, de modo a propor vãos modulados em função das dimensões dos blocos.

Classe A: com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;

Classe B: com função estrutural para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;

Classe C: com ou sem função estrutural para uso em elemento de alvenaria acima do nível do solo.

A atual norma brasileira NBR 6136 (ABNT,2014), também classifica os blocos como integrantes de três diferentes tipos de larguras, nomeando o que se referencia “módulos” ou “estruturas modulares”.

Quanto às dimensões os blocos são classificados em função da modulação do seu comprimento, ou seja, os blocos da classe M20 são indicados para alvenarias cujo comprimento (linha) é múltiplo de 20 e assim para os blocos das classes M15, M12,5, M10 e M7,5. Para que as alvenarias sejam executadas sem haver necessidade de corte das unidades de blocos nas amarrações, os mesmos são fabricados com $1/2$ e $1/3$ do comprimento do bloco inteiro. As dimensões reais para blocos inteiros em função das cinco classes modulares estão descritas na Tabela 2.

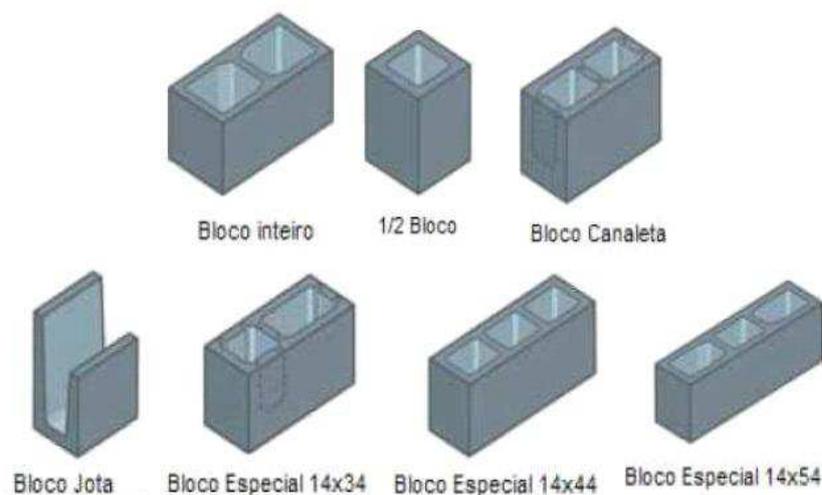
Tabela 2: Dimensões (mm) de blocos inteiros em função da classe modular.

Módulo	M - 20		M - 15		M - 12,5		M - 10		M - 7,5	
Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30	7,5x40
Largura	190	140	140	115	115	115	90	90	90	65
Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Comprimento	390	390	290	390	240	365	390	190	290	390

FONTE: NBR 6136 (ABNT, 2014).

A escolha das dimensões dos blocos de concreto para serem utilizados em um projeto de alvenaria estrutural ocorre quando se opta por um determinado grupo de blocos com dimensões variadas, família de blocos. A norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014), cita que a família de blocos é o conjunto de componentes de alvenaria que interagem modularmente entre si e com outros elementos construtivos. Os blocos que compõem a família, segundo suas dimensões, são designados como bloco inteiro (bloco predominante) e os blocos de amarração, “L” e “T” (blocos para encontro de paredes). A Figura 5 ilustra os blocos de concreto para alvenaria estrutural.

Figura 5: Blocos de concreto para alvenaria estrutural.

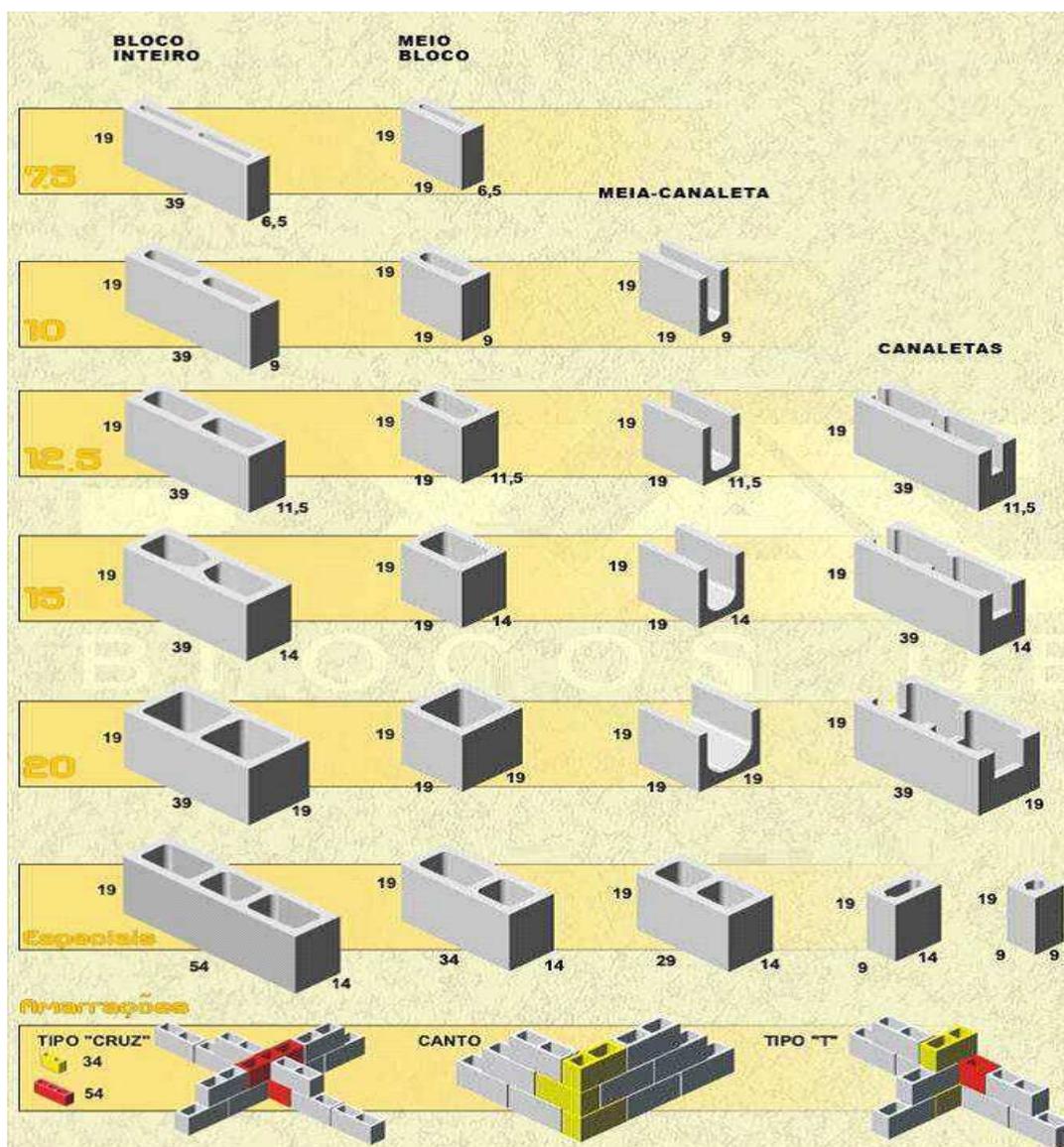


FONTE: CARVALHO, 2008.

A adoção de blocos integrantes de uma mesma família (Figura 6) no ato da construção de uma parede irá propiciar que a alvenaria, tanto no sentido vertical quanto no horizontal, vá consumir um número inteiro de blocos, evitando-se os indesejáveis cortes dos blocos, induzindo grande geração de entulho e elevados desperdícios nos canteiros das obras.

Neste sentido, é necessário que toda alvenaria, antes de sua construção seja precedida de um projeto de paginação, a ser elaborado por um profissional qualificado, objetivando reduzir desperdícios e cortes dos blocos vazados, bem como propiciando maior produtividade à mão de obra.

Figura 6: Tipos (Família) dos blocos de concreto.



FONTE: Exactomm Blocos de Concreto.

Os blocos de concreto são fabricados de acordo com uma classe de resistência à compressão característica. A resistência à compressão é a principal variável de controle do processo produtivo de blocos de concreto.

A norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014) especifica os requisitos mínimos exigidos para as propriedades físicas e mecânicas (Tabela 3).

Tabela 3: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração de blocos vazados de concreto para alvenarias.

Classe de blocos		A	B	C ⁽¹⁾	
Resistência característica à compressão fbk (MPa)		fbk ≥ 8,0	4,0 ≤ fbk < 8,0	fbk ≥ 3,0	
Absorção de água (%)	Agregado normal	Individual	≤ 8,0	≤ 10,0	≤ 12,0
		Média	≤ 6,0	≤ 8,0	≤ 10,0
	Agregado leve	Individual	≤ 16,0	≤ 16,0	≤ 16,0
		Média	≤ 13,0	≤ 13,0	≤ 13,0
Retração (%)		≤ 0,065	≤ 0,065	≤ 0,065	

FONTE: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Com relação aos requisitos mínimos para a utilização dos blocos de concreto estruturais em projetos de alvenaria estrutural, a norma da ABNT NBR 15961 (ABNT, 2011), exige que para edificações superiores a dois pavimentos sejam aplicados os blocos de concreto com no mínimo 14 cm de espessura. Já para casas térreas e sobrados os blocos estruturais podem ser de 9 a 11,5 cm.

A norma da ABNT NBR 15961 (ABNT, 2011) especifica que a resistência à compressão do prisma (conjunto de dois blocos de concreto estruturais sobrepostos e unidos pela argamassa de assentamento), deve ser 70% da resistência à compressão do bloco.

2.4 Fatores que influenciam a resistência da alvenaria

Na alvenaria existem vários fatores que influenciam; entre os principais a serem analisados neste estudo podem ser citados:

- ✓ espessura da junta de argamassa;
- ✓ tipo de assentamento;
- ✓ tipo de capeamento;
- ✓ geometria dos blocos;
- ✓ resistência à tração ;
- ✓ índice de absorção dos blocos;

- ✓ resistência à compressão da alvenaria;
- ✓ resistência à compressão da argamassa;
- ✓ fator de eficiência;
- ✓ módulo de elasticidade;

2.4.1 Espessura da junta da argamassa

A junta de argamassa é essencial para nivelar e suprir as irregularidades dos blocos e é ela que proporciona união das unidades, criando uma monoliticidade à alvenaria. Diversas pesquisas indicam que a espessura ideal da junta horizontal é de 10mm; valores menores, que teoricamente levariam a alvenarias mais resistentes, não são recomendáveis, pois a junta não consegue absorver essas imperfeições das unidades.

Segundo Francis (1967) apud Gomes (1983), a resistência da parede decresce com o aumento da espessura da junta horizontal. Na norma NBR 8215 (ABNT, 1983) está especificado que a espessura da junta deve ser de 10 ± 3 mm; valores fora deste intervalo prejudicam o desempenho das paredes.

Cheema e Klingner (1986) pesquisaram prismas de blocos de concreto com resistência de 25,8 MPa e argamassa com resistência de 14,9 MPa, utilizando duas espessuras de junta de argamassa, uma com 10,0mm, e outra com 12,7mm, obtendo uma redução da resistência nos prismas de 39%, quando utilizada a junta mais espessa, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados médios de resistências.

Espessura da junta (mm)	Resistência do prisma (MPa)
10,0	19,23
12,7	13,80

FONTE: CHEEMA e KLINGNER (1986).

Mohamad (1998) realizou testes em prismas com juntas horizontais de espessura de 7mm e 10 mm, em blocos de concreto, e concluíram, conforme a Tabela 5, que os prismas construídos com junta de 7mm apresentaram um acréscimo no fator de eficiência de 34 (prisma/bloco).

Tabela 5: Influência da espessura da junta na resistência do prisma.

Resistência das argamassas (MPa)	Resistência dos blocos (MPa)	Espessura das juntas (mm)	Resistência dos prismas (MPa)	Eficiência da alvenaria
4,89	15,67	7	11,70	0,75
5,41	15,67	10	8,84	0,56

FONTE: MOHAMAD (1998, p. 86).

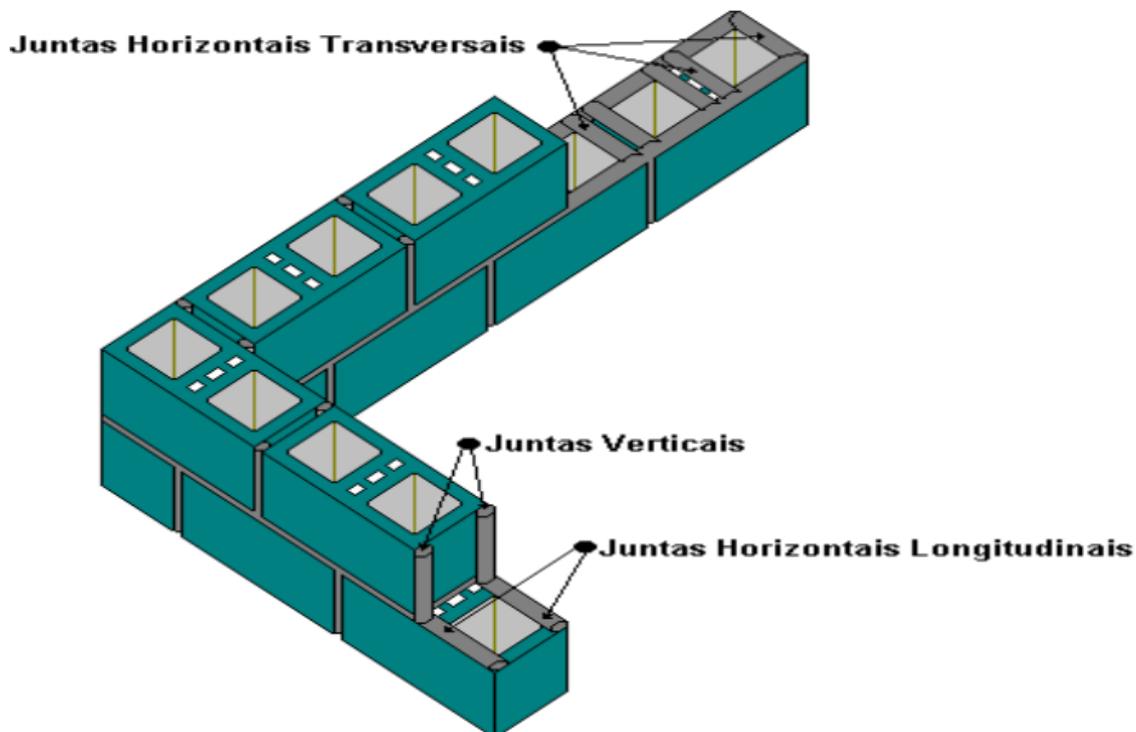
Salienta-se que mesmo com o aumento de resistência do prisma com juntas de menores espessuras, a capacidade da argamassa de acomodar tensões pode ficar comprometida. Por outro lado, espessuras maiores que 10mm causam diminuição da resistência das alvenarias, devido ao aparecimento de tensões maiores de tração lateral nas unidades.

Santos (2001) concluiu que a resistência da alvenaria diminui em 15% para cada aumento de 3mm na espessura da junta, e o inverso é verdadeiro.

2.4.2 Tipo de assentamento da argamassa

Os blocos estruturais possuem dois tipos de possibilidades de assentamento. Um com apenas argamassa nas suas paredes longitudinais e outra com todas as paredes argamassadas. É importante ressaltar que se for utilizada argamassa apenas nas paredes longitudinais e verticais, gerará uma racionalização ainda maior no processo; no entanto, isso pode causar um aumento de tensões localizadas na alvenaria, influenciando o modo de ruptura dos mesmos. A Figura 7 ilustra os dois tipos de assentamento citados.

Figura 7: Argamassamento apenas longitudinal e total.



FONTE: SANTOS (1998, p. 58).

Por meio de simulação computacional, utilizando-se o método dos elementos finitos para estudar o comportamento de prismas com diferentes tipos de assentamento, concluiu-se que a colocação de argamassa somente nas paredes laterais dos blocos, implica no surgimento de grandes concentrações de tensões nas paredes transversais, o que não acontece quando a colocação da argamassa é realizada em todo o bloco, sendo que no primeiro caso a fissuração inicia na parede transversal central (GANESAN e RAMAMURTHY, 1992).

Colville e Woldetinsae (1990) estudaram a influência do tipo de assentamento na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto. Com base em seus resultados concluíram que a resistência à compressão dos prismas vazados é aproximadamente 8% menor para prismas com assentamento total do que para prismas com assentamento lateral. É importante ressaltar que os autores chegaram a esses resultados,

considerando a resistência à compressão calculada em relação à área de assentamento da argamassa.

Pasquali (2006) estudou o comportamento de pequenas paredes com dois tipos de geometria de blocos vazados de cerâmica, um com paredes vazadas (12,3MPa) e outro com paredes maciças (18,0MPa), utilizou 3 tipos de argamassas industrializadas à base de cal e areia calcária e dois tipos de argamassamento (pleno e longitudinal); seus resultados constam na Tabela 6.

Tabela 6: Resistência das pequenas paredes em função do tipo de assentamento.

Tipo do bloco	Resistência Média da Argamassa (MPa)	Tipo de assentamento	Resistência pequenas paredes área bruta (MPa)	Redução (%)
Parede vazada (12,3 MPa)	2,51	Pleno	4,32	18,30
		Longitudinal	3,53	
	4,25	Pleno	4,34	16,10
		Longitudinal	3,64	
	12,56	Pleno	5,71	25,90
		Longitudinal	4,23	
Parede maciça (18,0 MPa)	2,51	Pleno	4,68	38,00
		Longitudinal	2,90	
	4,25	Pleno	5,60	43,00
		Longitudinal	3,19	
	12,56	Pleno	6,57	49,30
		Longitudinal	3,33	

Analisando os dados, conclui-se que as duas geometrias de blocos vazados apresentam uma variação significativa no que se refere à resistência das pequenas paredes ensaiadas, que varia de 16,1% a 25,9% para os blocos de paredes vazadas e de 38% a 49% para blocos de paredes maciças.

2.4.3 Tipo de capeamento

O capeamento de blocos, prismas e paredes é essencial porque melhora a distribuição de tensões, tornando suas superfícies regulares. Segundo a norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005f) as faces devem estar devidamente regularizadas e, tanto quanto possível, paralelas. O capeamento deve ser feito com pasta de cimento ou argamassa com resistência superior à do bloco, na

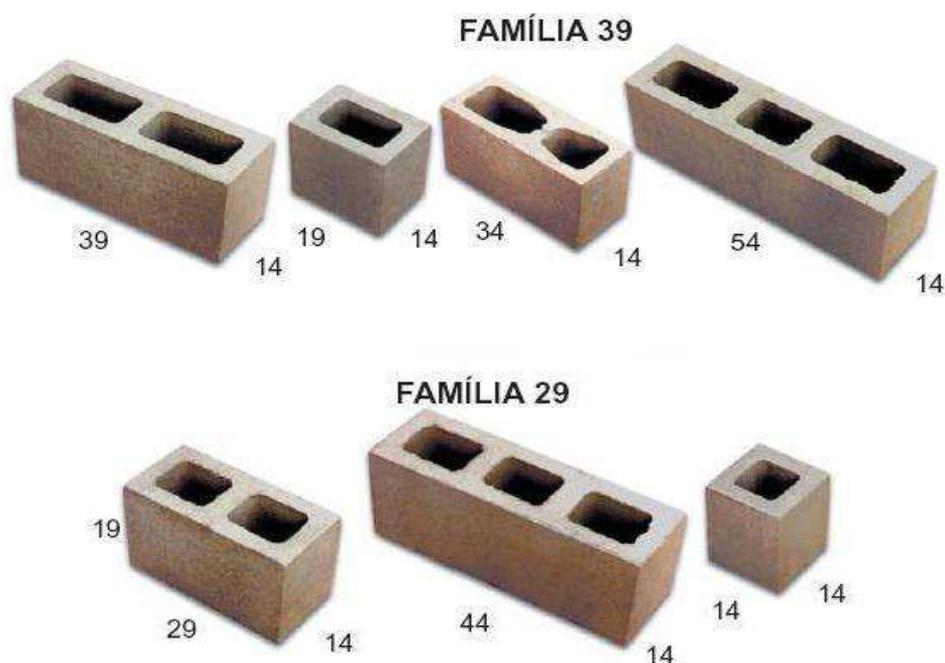
área bruta, e com espessura igual ou inferior a 3 mm, ou então os corpos de prova devem ser regularizados por meio de uma retífica, dispensando assim o capeamento.

O confinamento dos pratos da prensa, que pode ser minimizado de acordo com o tipo de capeamento.

2.4.4 Geometria do bloco

Rizzatti (2003) salienta que em blocos vazados a disposição e tipos de furos podem acarretar grandes concentrações de tensões, reduzindo a resistência e conduzindo a rupturas frágeis; a Figura 8 ilustra os tipos de geometria dos blocos de concreto.

Figura 8: Formas e dimensões dos blocos de concreto.



A presença dos furos em termos de quantidade, forma e posição pode acarretar, durante a aplicação de carga, concentração de tensões no bloco que levam a alvenaria a reduzir o seu potencial resistente.

GANESAN & RAMAMURTHY realizaram um estudo analítico, por meio do método dos elementos finitos, sobre o comportamento da alvenaria de blocos de concreto, considerando a influência de diferentes geometrias,

diferentes arranjos e propriedades das argamassas. O estudo realizado foi uma análise tridimensional, com um modelo elástico-linear, heterogêneo, utilizando elementos sólidos de oito (8) nós.

Foram analisados prismas de três (3) fiadas com junta a prumo e amarrada. Três tipos de blocos de concreto foram analisados: blocos com três furos, dois furos com dimensões padrões e dois furos em que a espessura do septo intermediário é igual a duas vezes a espessura da parede mais 10 mm (estruturalmente mais eficiente pela sobreposição dos septos nas fiadas). Na alvenaria, foram empregados quatro tipos de argamassas, de forma a atender a proporção entre o módulo de elasticidade do bloco (E_b) em relação à argamassa (E_a) de 1; 1,5; 2,0 e 2,8, sendo, sempre, mantido constante E_b . Mantendo-se constante a proporção de rigidez entre E_b/E_a se consegue verificar a influência da argamassa e o tipo de ruptura na alvenaria. A proporção entre as áreas líquidas e brutas dos blocos estudados foi mantida constante.

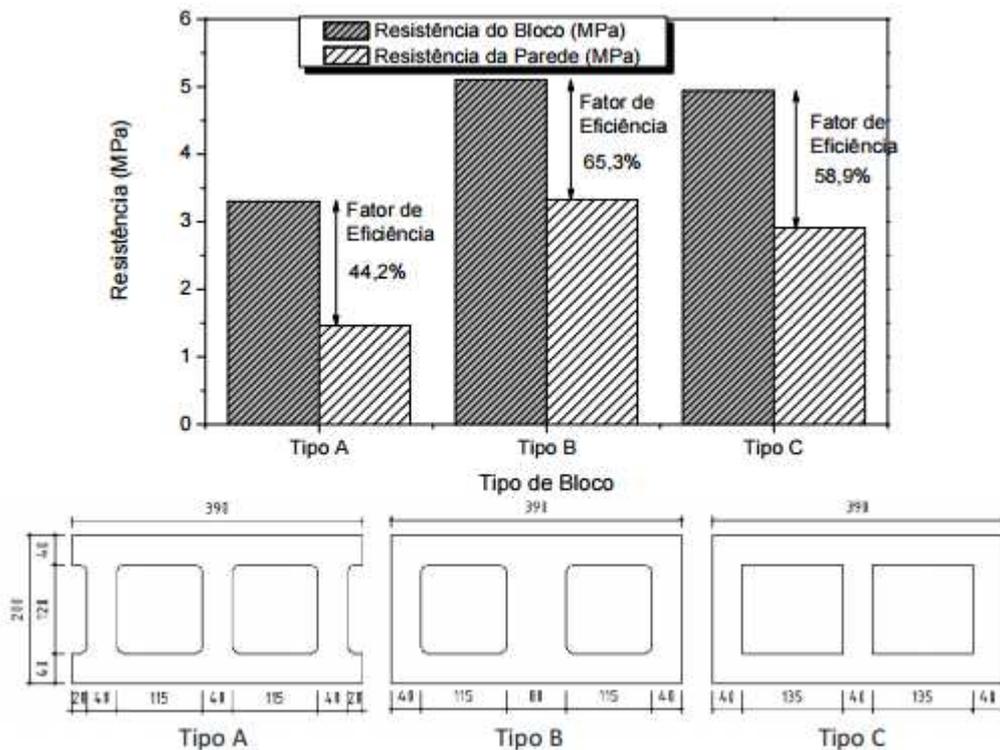
Os resultados obtidos pelos pesquisadores indicaram que os blocos de três furos na vertical produzem níveis e distribuição de tensões superiores aos de dois furos, sendo que na região próxima ao centro do prisma, as tensões permaneceram constantes. Com relação ao septo, a diferença de comportamento entre os três tipos de blocos analisados é mais evidente quando estes são assentados com junta amarrada. As tensões de compressão são bem maiores em blocos convencionais de dois furos do que nos estruturalmente eficientes (com septo intermediário com o dobro da espessura da parede lateral mais a espessura da junta de argamassa).

Como conclusões sobre o comportamento mecânico das alvenarias, pode-se destacar que a geometria do bloco influenciou nas tensões que se desenvolveram, tanto na sua distribuição quanto na sua magnitude; a argamassa não influenciou o comportamento da alvenaria de blocos e o uso de prismas com juntas a prumo superestima a resistência da alvenaria.

GANESAN & RAMAMURTHY citam que o fator de eficiência varia com o formato geométrico do bloco de concreto e o tipo de assentamento. Os autores verificaram que, para algumas geometrias de blocos e tipos de assentamento

de argamassa, aparecem concentrações de tensões que reduzem a resistência à compressão da alvenaria. Os autores fazem comentários a respeito de estudos realizados na Índia, no Building Technology Laboratory, no quais foram testadas três geometrias diferentes de blocos. Os blocos tipo A foram assentados com argamassa apenas nas faces e os demais foram argamassados nas faces e septos. A Figura 9 mostra os tipos de blocos estudados, as resistências dos blocos e das paredes, juntamente, com os fatores de eficiência da parede.

Figura 9: Tipo de blocos estudados com as dimensões em milímetros



FONTE: Building Technology Laboratory.

Conforme GANESAN & RAMAMURTHY são necessários estudos sobre o efeito da geometria do bloco, a fim de aumentar a eficiência das paredes estruturais. Os autores propõem que sejam utilizados blocos, cujo septo central seja igual ao dobro da lateral mais a espessura da junta, conseguindo-se, dessa forma, o alinhamento dos furos e tornando o conjunto mais eficiente. Também foi realizada uma análise por elementos finitos em três dimensões, para os blocos tipo C e o proposto, analisando-se painéis de três blocos de

comprimento e seis blocos de altura, em que são verificadas as tensões nas faces e nos septos dos blocos. Como conclusão do trabalho, pode-se verificar que, para o bloco de concreto, o tipo B apresentou melhor desempenho à compressão. Ainda, constatou-se uma variação brusca na concentração das tensões dos blocos do tipo A e C.

2.3.5 Resistência à tração do bloco

Nas alvenarias, o esforço predominante é o de compressão, mas dependendo da rigidez dos seus materiais constituintes, surgem sempre tensões de tração nos blocos. Portanto é importante a determinação da resistência do bloco à tração, pois na grande maioria dos casos eles rompem por tração, sendo uns dos motivos a deformação da argamassa que leva as paredes dos blocos a uma tração superior à suportada por eles e pode ser determinada por ensaios diretos e indiretos. Com isso, pode-se dizer que, quanto maior for a resistência do bloco à tração, maior será a capacidade de resistir a esforços de compressão da alvenaria.

Cheema e Klingner (1986) desenvolveram a seguinte equação para determinar a resistência à tração dos blocos:

$$F_{bt} = 0,41 \sqrt{f_b} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

F_{bt} = resistência à compressão do bloco em MPa

f_b = resistência à compressão do bloco (área bruta)

O ensaio indireto mais empregado, onde o corpo de prova é submetido à compressão diametral, foi desenvolvido por Lobo Carneiro, sendo conhecido como “Teste Brasileiro”, e tem sido um dos mais utilizados, devido às incertezas obtidas nos ensaios diretos.

2.3.6 Índice de absorção inicial

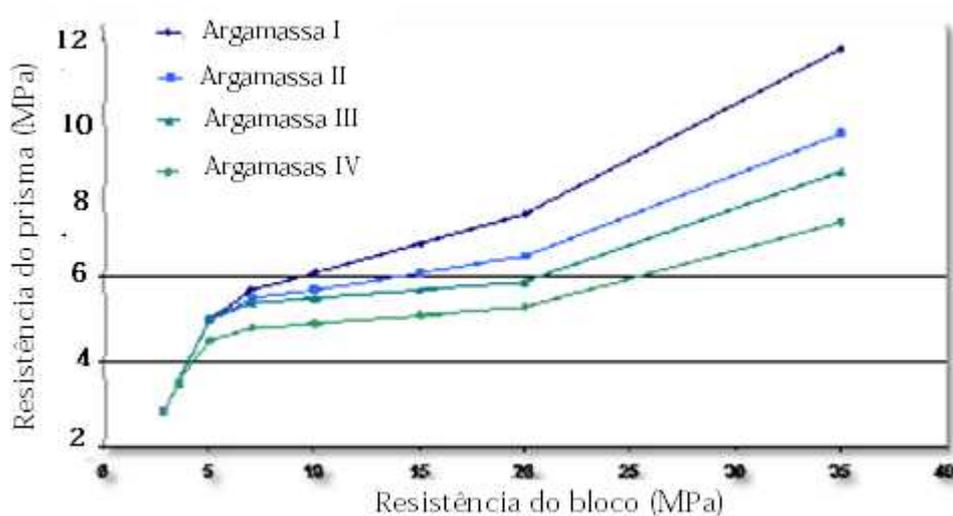
Os blocos possuem taxas de sucção que dependem da porosidade e da absorção. O eventual aumento dessas taxas ocasiona uma acentuada redução na resistência da alvenaria de maneira exponencial. As unidades com alta taxa de sucção interferem na resistência à compressão e aderência da argamassa, pois retiram rapidamente água desta.

2.3.7 Resistência à compressão do bloco

Blocos com maior resistência tendem a aumentar a capacidade de tensão da alvenaria à compressão. Entretanto, esse aumento nas alvenarias não é linearmente proporcional ao dos blocos. Assim, Rezende (2013), defende que quanto maior a resistência do bloco menor o fator de eficiência.

Na norma britânica BS 5628 (BS 78) estão estabelecidos parâmetros de resistência da alvenaria para o uso de diferentes tipos de blocos, como pode ser visto na Figura 10, onde são apresentados os valores da resistência à compressão dos prismas, de acordo com os blocos (com relação largura/espessura entre dois e quatro) de diferentes resistências.

Figura 10: Comparativo da resistência de prismas e blocos.



FONTE: (BS 5682:1978, adaptada).

De acordo com a Figura 10 observa-se que o desempenho dos quatro tipos de argamassas padronizadas pela norma britânica BS 5682/78, apresentou um aumento de resistência do bloco em 12,5 vezes, gerando um ganho médio de resistência, no prisma, de 3,25 vezes, e a variação da resistência da alvenaria em função do traço da argamassa, do que conclui-se que em blocos, a partir de 15 MPa, a variação começa a ser significativa, o que não ocorre nas de baixa resistência.

2.3.8 Resistência à compressão da argamassa

A argamassa de assentamento tem importante função estrutural; sua maior resistência possibilitará a construção de paredes mais resistentes; no entanto, essas paredes apresentarão uma ruptura excessivamente frágil e não acompanharão os eventuais movimentos da estrutura. Um dos grandes problemas identificados é saber qual o nível de resistência é o ideal.

Conforme a BS 5628 part 1 (1978) a argamassa deve conter água potável, sendo necessário controlar o tempo de mistura, e o uso de aditivos é permitido. A resistência à compressão da argamassa é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Resistência à compressão das argamassas.

Designação	Tipos de argamassa (em volume)			Resistência média à compressão, aos 28 dias (MPa)	
	ci:cal:ar	ci(alv):ar	ci:cal:plast	Laboratório	Obra
i	1 : 0 a 1/4 : 3	-	-	16,0	11,0
ii	1 : 1/4 : 4 a 4 1/2	1 : 2 1/2 a 3 1/2	1 : 3 a 4	6,5	4,5
iii	1 : 2 : 5 a 6	1 : 4 a 5	1 : 5 a 6	3,6	2,5
iv	1 : 2 : 8 a 9	1 : 5 1/2 a 6 1/2	1 : 7 a 8	1,5	1,0

FONTE: BS 5628 (1978).

Segundo a norma americana ASTM C 270-86b (1987) o traço e as propriedades da argamassa de assentamento na alvenaria estrutural, devem seguir as especificações apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Especificações dos traços das argamassas.

Tipo de argamassa	Traço em volume		
	Cimento	Cal	
M	1	0,25	Areia de 2,25 a 3 vezes a soma dos volumes de aglomerantes
S	1	0,25 a 0,50	
N	1	0,50 a 1,25	
O	1	1,25 a 2,25	

Tabela 9: Especificações das propriedades das argamassas de cimento e cal.

Tipo de argamassa	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)	Retenção de água (%)	Ar incorporado (%)
M	17,2	75	12
S	12,4	75	12
N	5,2	75	14
O	2,4	75	14

Ainda segundo a norma ASTM C 270-86b (1987), os agregados devem atender às especificações da norma ASTM C 144-84 (1987), mostradas na Tabela 10.

Tabela 10: Limites granulométricos do agregado.

Peneiras (mm)	Porcentagem que passa (em peso)	
	Areia natural	Areia produzida
4,750	100	100
2,360	90 a 100	95 a 100
1,180	70 a 100	70 a 100
0,600	40 a 75	40 a 75
0,300	10 a 35	20 a 40
0,150	2 a 15	10 a 25
0,075	-	0 a 10

Müller (1999) afirma que a função do cimento Portland é essencial, porque proporciona resistência à argamassa e acelera seu endurecimento, ao

contrário da cal hidratada, que atua principalmente como plastificante da mistura. Assim, pode-se ter argamassas muito diferentes, variando apenas as quantidades de cimento e de cal adicionados à mistura.

A Tabela 11 apresenta resultados obtidos em paredes executadas com um mesmo bloco e dois diferentes tipos de argamassas.

Tabela 11: Resultados de resistência à compressão.

Resistência à compressão (MPa)		
Argamassa	Bloco	Parede
5,10	7,50	2,56
11,97	7,50	2,93

Mohamad (2012), analisando prismas de bloco de concreto, não grauteados, verificou que, utilizando argamassas menos resistentes à compressão do que os blocos, a ruptura foi dúctil, ocorrendo um esfacelamento da parte externa das paredes dos blocos, já ao utilizar argamassas com o mesmo nível de resistência à compressão que os blocos na área líquida, a ruptura ocorrida era essencialmente frágil, no sentido da seção transversal do prisma.

Vários pesquisadores brasileiros também estudaram a influência da argamassa na resistência à compressão de prismas. Mohamad (2012) realizou ensaios com prismas de blocos de concreto com três unidades de altura, utilizando blocos com duas diferentes resistências e três tipos de argamassas, com resistências à compressão de 4,20 MPa, 8,63 MPa e 19,90 MPa. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 12: Resultados de resistência à compressão.

	Resistência à compressão (MPa)			
	Bloco de concreto	Prisma A1	Prisma A2	Prisma A3
B1	10,70	8,17	8,60	10,56
B2	15,70	8,84	10,80	11,70

FONTE: MOHAMAD (1998, p. 87, adaptada).

A partir dos resultados obtidos verifica-se um ganho médio na resistência dos prismas, de 14%, para um aumento de 105% na resistência da argamassa e , enquanto a resistência da argamassa é aumentada em 160%, os prismas têm um ganho de resistência de 31%.

2.3.9 Fator de eficiência

O fator de eficiência é a relação entre a resistência do bloco e do componente em questão, sendo calculado dividindo-se o valor da resistência à compressão do prisma, ou da parede, pela resistência do bloco.

A Tabela 13 apresenta o fator de eficiência para diversos tipos de unidades (blocos de concreto, bloco cerâmico e tijolos).

Tabela 13: Fator de eficiência para diversos tipos de unidades.

Unidades	Fator de eficiência (Autor)
Tijolo cerâmico	60 a 90% (Monk)
Tijolo cerâmico	10 a 40% (Monk)
Blocos de concreto	65 a 90% (Sutherland)
Tijolo cerâmico	25 a 50% (Sahlin)
Tijolo cerâmico	18 a 30% (Prudêncio)
Bloco cerâmico	16 a 39% (Gomes)
Sílico-calcáreo	46% (Franco)
Sílico-calcáreo maciço	33% (Franco)

Mohamad (1998) estudou as relações de fatores de eficiência para blocos concreto denominando-os de M1 e M2, conforme a resistência a compressão obtida. A Tabela 14 apresenta os valores encontrados.

Tabela 14: Fatores de eficiência encontrados para blocos de concreto.

Eficiência da alvenaria		
Traço de argamassa	Bloco M1	Bloco M2
1:0,25:3	1,0	0,75
1:0,5:4,5	0,82	0,69
1:1:6	0,77	0,56
1:2:9	0,71	-

Para os prismas com o bloco M1, e argamassa com resistência igual a do bloco na área líquida (1:1/4:3), obteve-se eficiência de aproximadamente 1. À medida que se diminuiu a resistência da argamassa, ocorreu uma diminuição do fator de eficiência.

Os prismas com o bloco M2, para uma mesma argamassa, apresentou fatores de eficiência sempre menores. Estes resultados estão de acordo com o encontrado na literatura. Com esta análise nota-se que deve haver uma compatibilização entre a resistência da argamassa com a resistência à compressão dos blocos, pois a falta desta acarretaria um prejuízo na eficiência da alvenaria.

Levy e Sabbatini (1994) testaram três tipos de blocos de concreto e um tipo de argamassa, e obtiveram resultados de fatores de eficiência contidos na Tabela 15.

Tabela 15: Eficiência com relação aos prismas, paredinhas e paredes.

Resistência Bloco (MPa)	Bloco	Prisma	Paredinha	Parede
7,90	1	0,81	0,67	0,65
10,60	1	0,88	0,71	0,60
13,20	1	0,74	0,49	0,62

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 15, verifica-se que os blocos de concreto apresentam o fator de eficiência consideravelmente alto.

2.3.10 Módulo de elasticidade

O conhecimento da tensão e da deformação específica na compressão permite a obtenção do módulo de elasticidade, com o objetivo de se avaliar, quantificar e compreender os fenômenos ocorridos nos ensaios realizados.

Existem várias maneiras de se determinar o módulo de deformação específica dos componentes da alvenaria. Normalmente se utiliza o gráfico tensão-deformação para uma carga de 40% a 60% da carga última para o módulo secante e de 30% para o tangente inicial; para Mohamad (2007) isto se dá por ocorrer neste trecho um comportamento linear dos componentes (prisma e parede). Para blocos de concreto, não existem ensaios brasileiros normalizados para a determinação do módulo de elasticidade na alvenaria.

2.5 PRISMAS DE CONCRETO

A construção de prédios de vários pavimentos, bem como projetos especiais em alvenaria, requer resistências de cálculo muito superiores às normalmente utilizadas em construções de alvenaria convencionais. Estes requisitos afetam as especificações de materiais de diversas formas. Uma é a especificação do próprio material, que deverá ser diferente de outras especificações no sentido de prover alta resistência.

A resistência de aderência ao cisalhamento da alvenaria é influenciada por vários fatores, incluindo o tijolo ou tipo de bloco, a argamassa e a tensão de pré-compressão nas juntas. Muito importante neste aspecto é a estipulação de um esquema ideal e representativo de coleta de amostras, uma vez que sua produção envolve diversas fases distintas.

O princípio de ensaio do prisma é usado para determinar a resistência de um conjunto de materiais diferentes, tais como tijolo, bloco, argamassa de assentamento. Atualmente o melhor método para determinar como trabalhará a alvenaria é testar um conjunto real da parede.

Os prismas devem ser feitos dos mesmos materiais componentes de alvenaria e sob as mesmas condições em que são assentados na parede, inclusive, devem ser feitos, de preferência, pelo mesmo pedreiro. Um prisma é a justaposição de dois blocos estruturais, unidos por uma junta de argamassa que deve possuir a espessura de um centímetro (ABNT NBR 8215 (ABNT 1983)). A norma ASTM E 447-84 recomenda que os prismas devam ser formados por três blocos assentados a prumo, com duas juntas de argamassa.

Os estudos empíricos para verificar a resistência da alvenaria estrutural geralmente ocorrem através da análise de prismas, que são à base dos projetos estruturais, uma vez que a correlação prisma/parede é mais próxima do que a relação bloco/parede.

Os prismas de alvenaria são simulações mais simples e econômicas para a verificação das propriedades mecânicas de uma parede de alvenaria. Ensaio em paredes em escala natural seriam ideais, porém são muitas vezes técnica e economicamente inviável. Segundo a NBR 8215/83 há a possibilidade de se preparar prismas de duas formas diferentes. Os prismas podem ser moldados em laboratório com diferentes tipos de argamassas, grautes e blocos. Eles também podem ser moldados em obra com os mesmos materiais e mão-de-obra que estão sendo utilizados na estrutura.

Quanto ao tamanho, os prismas podem ser confeccionados com junta aprumo, ou seja, com largura equivalente a um bloco ou com amarração, ou seja, mínimo de um bloco e meio de largura. A NBR 8215 (1983) descreve a produção de prismas com dois blocos. Apesar de essa norma ser específica, ainda é a única norma brasileira sobre prismas com blocos estruturais (Figura 11).

Figura 11: Prisma padronizado com assentamento total.



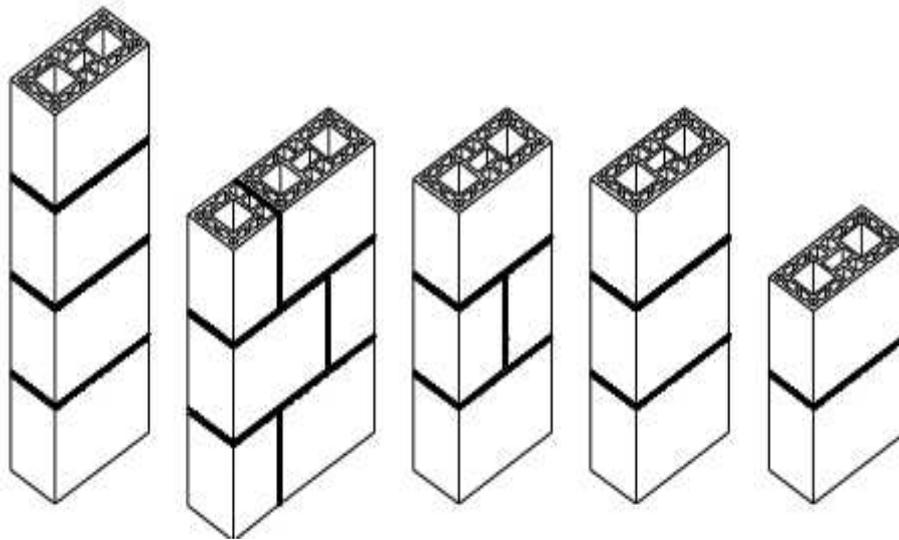
FONTE: Disponível em: www.fazfacil.com.br

Os prismas são elementos formados por três blocos interligados por juntas de argamassa assentadas sobre os septos transversais e paredes longitudinais. As juntas têm espessura de 10 ± 3 mm conforme recomendação da NBR 8215 (1983), portanto, a altura total dos prismas é de 590 mm. Não há a necessidade do acabamento do topo e base do bloco, das extremidades dos prismas e que estarão em contato com as placas de ensaio, já que estes possuem superfícies planas que ficam em contato com o fundo da fôrma metálica. Desta forma, os blocos extremos do prisma têm estas superfícies em contato com as placas de ensaio e as superfícies irregulares em contato com a junta de argamassa. Após a produção dos blocos e a realização de sua cura – em câmara úmida durante sete dias – executa-se a marcação dos pontos de instrumentação nos blocos para a fixação de extensômetros mecânicos, transdutores de deslocamento e relógios comparadores.

Tal estratégia de instrumentação objetiva obter os deslocamentos longitudinais e transversais ao longo das paredes tanto do bloco central como da altura total do prisma. Assim, procura-se analisar o comportamento global do prisma utilizando-se instrumentos com maior base de medição e o comportamento do bloco central (BARBOSA & HANAI, 2009) com instrumentação específica para este. Para aferir o deslocamento da placa de ensaio, utiliza-se um relógio comparador de cada lado, próximo à região central do elemento. Também são dispostos instrumentos para aferir a deformação da junta de argamassa, unicamente na interface com os blocos de concreto.

A norma brasileira em vigor não possibilita outro tipo de prisma a não ser com dois blocos apenas e seu argamassamento total na face de assentamento, mas já existem vários pesquisadores afirmando que esses podem conter de um a um bloco e meio de largura, sendo o segundo, necessariamente, contrafiado. Quanto aos modos de assentamento, os prismas podem ter a argamassa em toda sua superfície de assentamento, ou somente nas faces. E podem, também, serem grauteados ou não. A Figura 12 ilustra os diferentes tipos de prismas que podem ser utilizados experimentalmente.

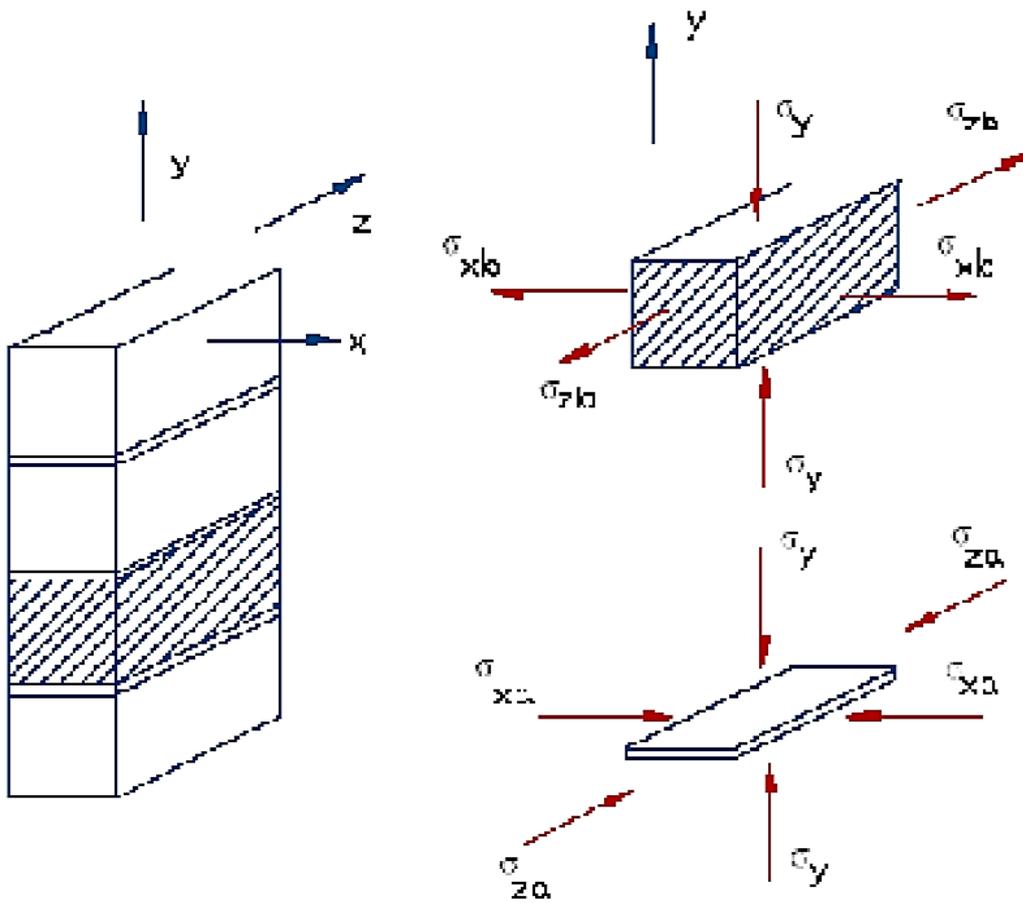
Figura 12: Modelos de prismas que podem ser utilizados experimentalmente.



Segundo Mohamad (1998) apud Santos (2010), a ruptura em blocos de concreto ocorre mediante alguns fatores como: esmagamento, tração na argamassa e tração no bloco.

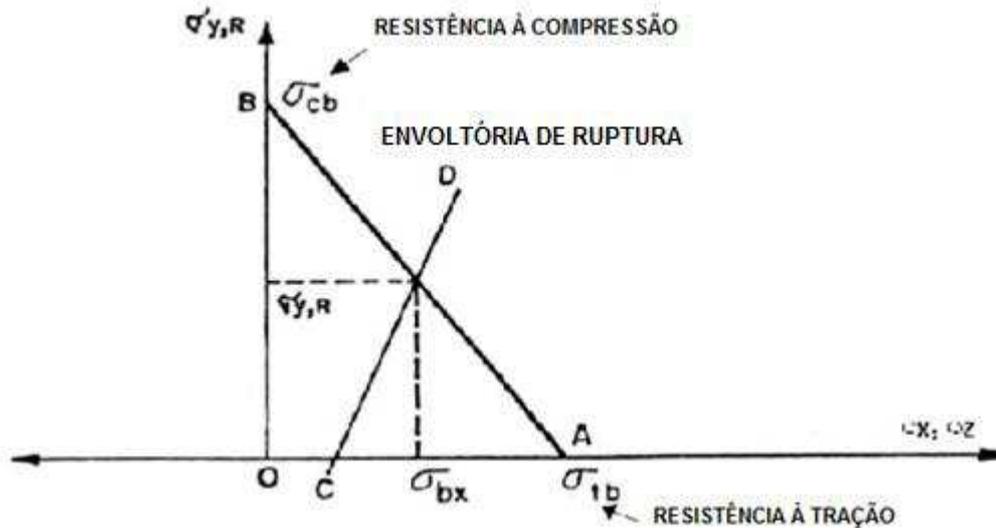
Hilsdorf (1967) apud Gomes (1983) foi o primeiro pesquisador a chegar a conclusões satisfatórias sobre a forma de ruptura na alvenaria, elaborando um modelo matemático considerando o comportamento elástico e baseando-se nos esforços resistidos pelos componentes da alvenaria. As hipóteses do autor são as seguintes: comportamento de ruptura semelhante ao critério de Mohr (de acordo com este critério haverá ruptura quando a tensão de cisalhamento se igualar à resistência de cisalhamento); perfeita aderência entre bloco e argamassa; distribuição uniforme de tensões laterais e verticais. A Figura 13 apresenta o estado de tensões em prismas de alvenaria, segundo o modelo estabelecido por Hilsdorf.

Figura 13: Distribuições de tensões no prisma, conforme Hilsdorf (1967).



Admite-se, neste modelo, que ao mesmo tempo o bloco rompe sob estado biaxial (tração-compressão) e a argamassa, sob estado triaxial de compressão. Na Figura 14 a linha CD, representa o esforço de compressão na argamassa, sendo que sua resistência aumenta com o nível de compressão lateral. A interseção desta reta com a reta de Coulomb AB, que define a envoltória de ruptura, causará a ruptura do prisma. Este critério permite chegar a valores quantitativos.

Figura 14: Relação entre as tensões de compressão e tração em um bloco ou tijolo, na ruptura.

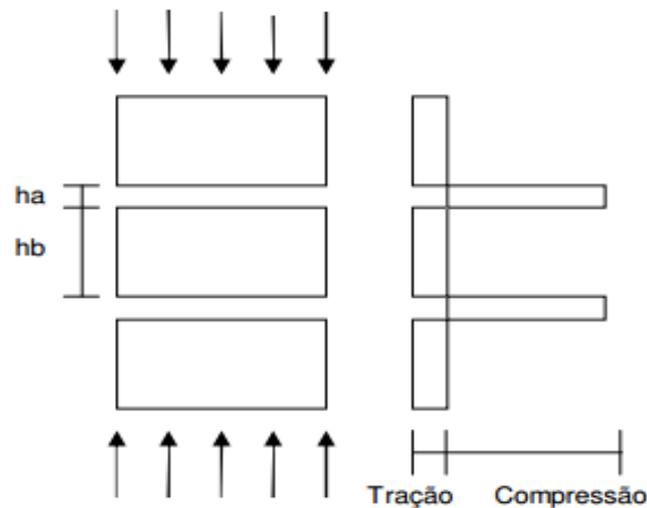


FONTE: GOMES (1983, p. 68).

A aplicação de cargas de compressão à argamassa, com um módulo de deformação menor que o do bloco, tem a tendência de se expandir lateralmente. Quando as tensões de tração no bloco ultrapassarem a sua resistência à tração ocorre fissuração na unidade, porque há aderência entre bloco e argamassa que sugerem tensões de compressão triaxiais na argamassa, o que gera tensões de tração no bloco.

A teoria de Atkinson e Noland foi desenvolvida, relacionando propriedades de resistência e deformação de prismas submetidos a esforços de compressão, sendo baseada no critério de Hilsdorf (1969). Esta refere que o comportamento da alvenaria é baseado na compatibilidade de deformação dos blocos e argamassas. As hipóteses dos autores são as seguintes: considera a relação linear entre a tensão de compressão local e a resistência à tração lateral biaxial; consideram o prisma com o conjunto bloco/argamassa, sujeito a uma tensão de compressão vertical uniforme; este estado de tensões é mostrado na Figura 15.

Figura 15: Distribuições de tensões segundo Atkinson e Noland (1985).



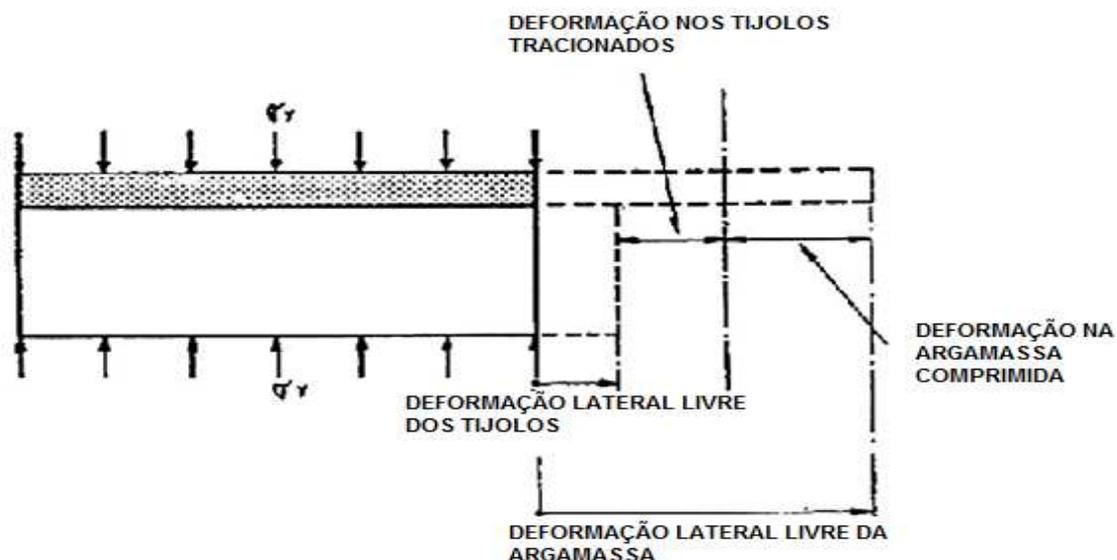
De acordo com os autores, os critérios que afetam a resistência à compressão uniaxial da alvenaria são: a resistência à tração uniaxial e biaxial do bloco e da argamassa, assim como os padrões de forma do prisma. O modelo sugere que quanto maiores os blocos, menores são as tensões de tração induzidas à alvenaria.

Os autores concluíram que tendo a argamassa à tendência de se expandir lateralmente, quando ligada mecanicamente ao bloco, esta característica é restringida, surgindo, assim, tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa, e que a resistência dos prismas é governada pela resistência à tração dos blocos e pelas propriedades de deformação da argamassa. Argamassas mais fortes possuem um comportamento na curva tensão x deformação essencialmente linear, porque seus prismas fissuraram subitamente e romperam explosivamente no carregamento último. Já as argamassas mais fracas apresentam um comportamento mais dúctil, ocorrendo fissuração lenta nos prismas. Portanto, de acordo com esta teoria, considerando a não linearidade da argamassa, pode ocorrer o fendilhamento do bloco, ao invés do esmagamento da argamassa.

O critério de Lenczner considera a contribuição da argamassa de assentamento na resistência da alvenaria, baseando-se na compatibilidade de deformações entre os elementos da alvenaria, bloco e argamassa. Este critério é apresentado em Gomes (1983). A argamassa, por possuir um módulo de elasticidade menor que o bloco, fica submetida a esforços de compressão e os

blocos, a esforços de tração, ocorrendo a ruptura por tração no bloco, devido a sua baixa resistência à tração. A Figura 16 explica este critério de compatibilidade de deformações.

Figura 16: Deformação lateral dos blocos e argamassa de assentamento submetidos à compressão simples.



FONTE: GOMES (1983, p. 75).

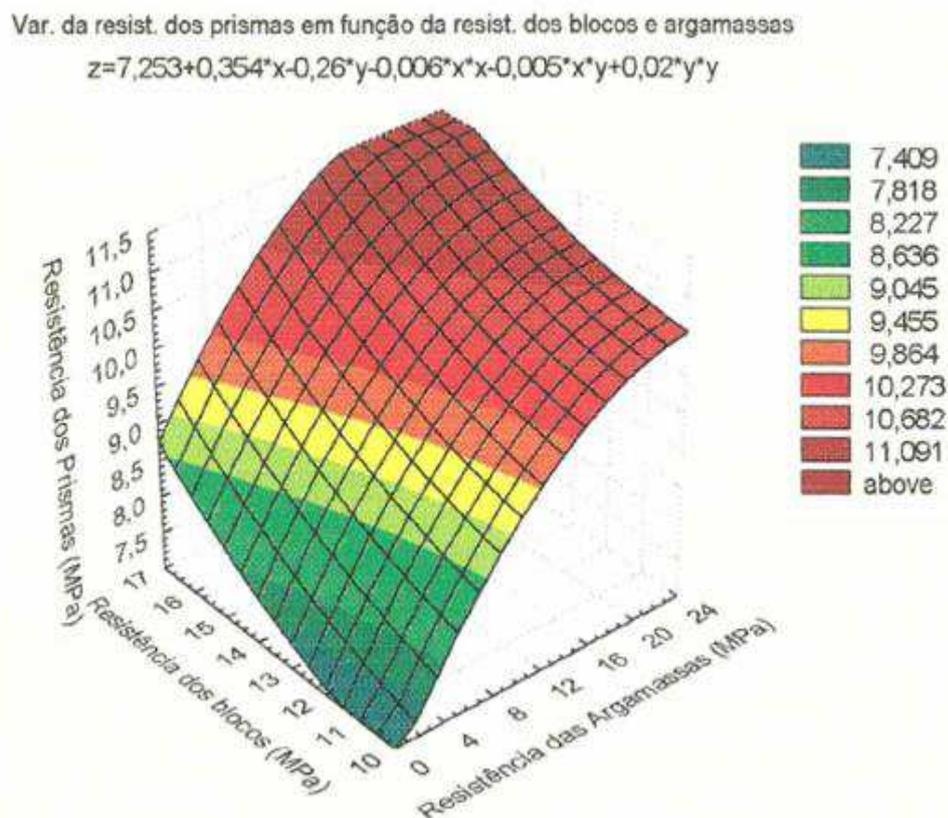
MOHAMAD (2007) estudou a resistência à compressão média e o módulo de elasticidade de prismas para dois tipos de bloco e diferentes traços de argamassa, conforme apresentado na Tabela 16. Na Figura 18 está ilustrada a variação da resistência à compressão dos prismas em função do aumento de resistência dos blocos e argamassa.

Tabela 16: Resistência à compressão dos prismas com os blocos M1 e M2 e os diferentes traços de argamassas.

Bloco	Tipo de argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
M1	I	10,6	9100
	II	8,6	6700
	III	8,2	4500
	IV	7,5	3370
M2	V	11,7	9170
	VI	10,8	5810
	VII	8,8	5848

A Figura 17 ilustra a resistência à compressão dos prismas em função do aumento de resistência dos blocos e argamassa.

Figura 17: Variação da resistência à compressão dos prismas em função do aumento de resistência dos blocos e argamassa.



FONTE: MOHAMAD (2007).

Observa-se na Figura 17 que a superfície que melhor representa os pontos, sendo esta equação a relação para as faixas de resistência dos blocos entre 10 MPa e 17 MPa e as diferentes resistências das argamassas. Desta forma, as resistências dos prismas poder ser expressas pela equação (2).

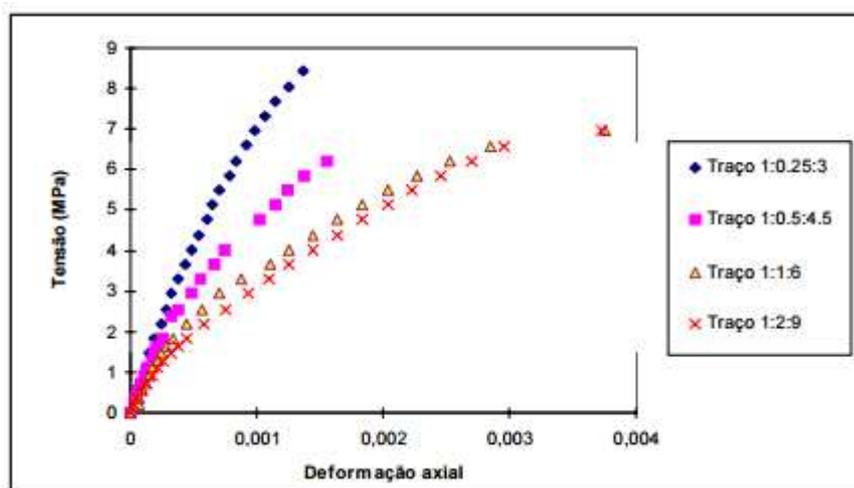
$$f_p = 7,26 + 0,35 \cdot f_b - 0,26 \cdot f_{ag} - 0,006 \cdot f_b^2 - 0,005 \cdot f_b \cdot f_{ag} + 0,02 \cdot f_{ag}^2 \quad (\text{Eq. 02})$$

A expressão que melhor representou a variação do módulo de elasticidade dos prismas em função da resistência à compressão dos mesmos foi uma função logarítmica $y = 17120 \cdot \ln(x) - 31014$ com coeficiente de correlação

$R^2 = 0,94$. Esta equação somente é válida para faixas de resistência dos prismas compreendida entre 7,5 MPa e 11 MPa, não devendo ser extrapolada para outros valores. As demais equações não apresentaram um bom acordo com os pontos obtidos experimentalmente.

A Figura 18 ilustra a curva tensão x deformação axial de prismas de blocos de concreto com diferentes traços de argamassas e um tipo de bloco (M1)

Figura 18: Curva tensão x deformação axial de prismas de blocos de concreto com diferentes traços de argamassas e um tipo de bloco (M1).



FONTE: MOHAMAD & RAMOS ROMAN (2007).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 18 observa-se que quando se trabalhou com traços de argamassas III e IV aumentou-se as deformações axiais últimas da alvenaria, passando a ter um comportamento mais dúctil, diferentemente dos traços de argamassas I e II.

2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Do conhecimento das propriedades do concreto, depende a correta utilização deste material para cada tipo de obra. Assim é que determinadas propriedades são imprescindíveis para certos tipos de obras, porém são dispensáveis para outras. Por exemplo: a impermeabilidade do concreto é qualidade essencial para obras hidráulicas, porém não é tão importante nas

estruturas de edifícios (Bauer, 1995). Podem ser citadas outras propriedades do concreto, como:

Massa específica: É uma propriedade importante nos cálculos do peso próprio da estrutura, varia de acordo com o processo de execução (adensamento, tipo de agregados e quantidade de vazios).

Resistência mecânica: É a principal propriedade dos concretos, é influenciada por diversos fatores:

Relação água/cimento: a maioria dos defeitos na resistência mecânica do concreto é causada pelo excesso de água colocado a fim de facilitar o amassamento. A influência desta relação é representada pela quantidade de água não necessária à hidratação do cimento e que irá evaporar, deixando vazios no interior, os quais serão diretamente responsáveis pela queda da resistência.

Idade: quanto maior a idade do concreto, maior sua resistência mecânica, sem carga.

Durabilidade: A durabilidade do concreto é relacionada com o fator água/cimento. É também importante obter uma trabalhabilidade adequada, operações perfeitas de amassamento, adensamento e cura.

Permeabilidade e absorção: Essas propriedades são afetadas por diversos fatores: materiais constituintes: água (quantidade e pureza), cimento (quantidade, finura e composição), agregados (quantidade, tipos, graduação, impurezas e umidade) e aditivos (quimicamente ativos ou inertes); métodos de preparação: mistura, lançamento, adensamento e acabamento; - tratamento: idade, cura e condições de ensaio.

Deformação: O concreto se deforma sob ação de vários fatores, tais como: solicitação mecânica, variações hidrométricas e térmicas. As solicitações mecânicas são responsáveis por dois tipos de deformação: imediata (aparece logo após a aplicação do carregamento) e lenta (aparece ao longo do tempo com a manutenção do carregamento).

2.7 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONCRETO SECO

O grande crescimento demográfico mundial ocorrido a partir da segunda metade do século passado tem exigido práticas construtivas que venham a atender a grande demanda por edificações. Dentro deste contexto, o uso de blocos vazados de concreto para alvenarias vem se consolidando devido às vantagens que proporciona na execução e custos de uma obra, aliando qualidade e produtividade, principalmente devido à precisão dimensional. Atualmente, o desenvolvimento da indústria de pré-moldados de concreto está direcionado não só a parâmetros ligados diretamente à automação, mas também a utilização de novos materiais visando com isto à redução de problemas ambientais. Esta tendência já havia sido preconizada por Mehta & Monteiro (2008) ao afirmar que, no futuro, a escolha do material de construção mais adequado deverá ser regida pela sincronia de quatro “E”: Energia, Engenharia, Economia e Ecologia.

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, sendo suplantado apenas pela água. Mehta & Monteiro (2008) justificam tal consumo não só pela excelente resistência à água e ao baixo custo, como também pela facilidade de compor elementos estruturais de diferentes formas e tamanhos, tais como: a construção de pontes, barragens, pavimentos, elementos pré-moldados, etc.

Apesar de cada tipo de concreto possuir características distintas e diversificadas, segundo Neville (1997), os concretos podem ser classificados em dois grandes grupos: os concretos “plásticos” e os concretos “secos”. Basicamente a diferença entre os dois está na quantidade de água requerida para garantir a trabalhabilidade dentro dos limites impostos pelo processo de moldagem. Os concretos plásticos, depois de homogeneizados os seus materiais constituintes, formam uma mistura plástica e de fácil adensamento sendo a retirada do ar feita através de equipamentos simples como vibradores por imersão. Fazem parte deste grupo o concreto convencional utilizado em estruturas de concreto armado e o concreto fluído auto adensável utilizado em alguns elementos pré-moldados.

A água excedente utilizada para proporcionar a consistência desejada ao concreto, além da necessária a hidratação do cimento, dá origem a poros que fazem diminuir a resistência do concreto. A relação entre a resistência do concreto e a relação água/cimento (a/c) foi estabelecida por Duff Abrams em 1919 e é conhecida como Lei de Abrams (FRASSON, 2000). Para Lei Abrams: A resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento (a/c).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde k1 e k2 são constantes empíricas obtidas em ensaios em condições predeterminadas:

a/c relação água/cimento do concreto;

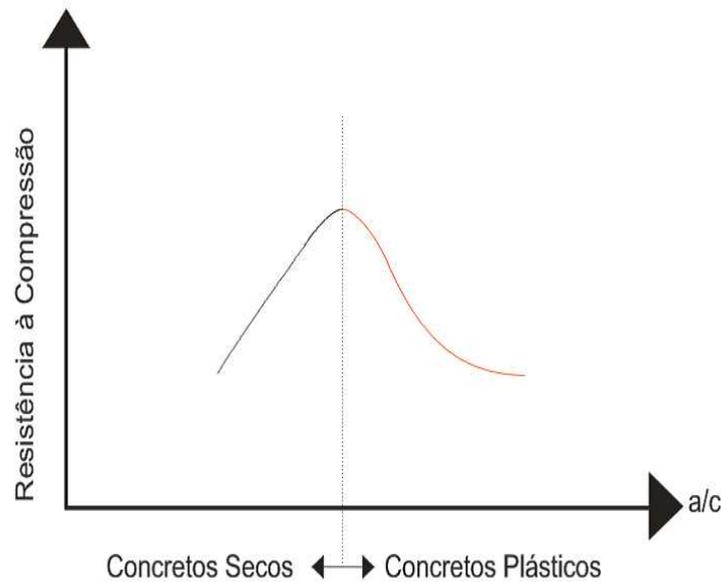
f_{cj} resistência do concreto na idade j dias.

Além da lei de Abrams, os concretos plásticos atendem a “Lei de Lyse” que estabelece que a quantidade de água a ser empregada em um concreto com um determinado grupo de materiais, para obter uma dada trabalhabilidade, independe do traço deste concreto. Na prática, para um dado grupo de materiais, existe uma relação água/materiais secos (H) constante para obter-se uma dada trabalhabilidade (FRASSON, 2000).

Em concretos secos, a quantidade de água utilizada para amassamento é substancialmente menor que a utilizada no concreto plástico proporcionando características de concreto levemente umedecido, umidade esta que varia entre 6 a 8% (Alves, 2004(a)). A mistura deve ser suficientemente densa para permitir desmoldagem imediata, mas, com umidade suficiente para permitir uma distribuição adequada no interior dos moldes durante as operações de mistura e vibração.

Os concretos secos apresentam consistência significativamente superior a dos concretos plásticos, devido à menor quantidade de água empregada, Diferentemente dos concretos plásticos, os concretos secos não seguem a risca a “Lei de Abrams”, com sua conhecida relação água/cimento e sua influência na resistência à compressão (Figura 19).

Figura 19: Resistência à compressão em função da relação a/c para mesma proporção de agregados/cimento.



FONTE: OLIVEIRA, 2004.

Existe uma umidade ótima, na qual as misturas conseguem alcançar uma maior compacidade, ou seja, um menor volume de vazios e, conseqüentemente, uma maior resistência. Para concretos secos essa umidade é menor que a dos concretos plásticos não podendo ser superior a 8%. (ALVES, 2004 b).

No concreto seco, as propriedades no estado endurecido estão intimamente ligadas as do estado fresco, de forma muito mais pronunciada do que no concreto plástico (Rodrigues, 1984; Mendonça *et al*, 2015). O concreto seco deve apresentar trabalhabilidade adequada a ser moldado com o equipamento disponível, além de demandar uma elevada coesão para que as peças mantenham-se inalteradas após a desforma.

Relacionando-se com a resistência diferentemente do observado em concretos plásticos, os quais seguem o princípio fundamental da Lei de Abrams, em concretos secos, para um traço seco fixo são encontradas maiores resistências para fatores água/cimento mais elevados, sendo respeitados os limites para que não haja deformabilidade no estado fresco (REZENDE, 2013).

A dosagem de um concreto “seco” visa obter uma mistura com um mínimo de vazios possíveis, ou seja, alcançar maior massa de material em um mesmo volume. A busca pelo menor número de vazios deve-se ao fato da relação direta entre a compactidade do concreto e sua resistência à compressão. Portanto, quanto mais compacta a peça, mais resistente ela será. Uma dosagem racional deve levar em conta os seguintes parâmetros:

- ✓ Determinação da melhor composição granulométrica para a mistura dos agregados e suas proporções ideais;
- ✓ Determinação da quantidade de água adequada a ser empregada na mistura. A quantidade ótima é aquela que proporciona maior compactidade as peças;
- ✓ Determinação da quantidade ideal de cimento. A escolha dessa proporção é função, principalmente, da resistência desejada e varia com o tipo de equipamento empregado.

Um método utilizado com sucesso em diversas fábricas do sul do Brasil é o descrito por Prudêncio, Oliveira e Frasson (2008). Este método de dosagem é proposto para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural.

Uma vez definida a dosagem do concreto, deve ser feito o seu proporcionamento, que pode ser volumétrico ou gravimétrico, sendo recomendável que os agregados e o cimento sejam dosados em massa, através de balanças. Uma das razões desta recomendação se deve ao inchamento da areia úmida que pode ocasionar erros nas medições. Além disso, quando o cimento e os agregados são dosados em massa, proporcionam um melhor controle sobre o processo, gerando uma maior qualidade e homogeneidade das peças produzidas. Já a água deve ser adicionada em volume através de dispositivos que corrijam a umidade do concreto.

Rezende (2013) frisa que a coesão é o fator determinante no proporcionamento dos traços e no teor de umidade do concreto seco. Se a mistura for pouco coesa, como é o caso de misturas com baixa quantidade de finos, o bloco em estado fresco irá fissurar, quebrar arestas e até mesmo desmoronar. Misturas muito coesa, além de dificultar a alimentação dos

moldes, irão exigir maior energia de compactação aumentando, assim, os custos de produção.

Os materiais utilizados na produção de blocos vazados de concreto são os mesmos utilizados nas misturas convencionais de concreto, ou seja: cimento, agregados e água, sendo que as especificações de cada um estão intrinsecamente ligadas ao processo de fabricação.

Devido à desmoldagem imediata e o reduzido tempo de permanência nas fábricas, já que podem ser comercializados em até sete dias após a moldagem, normalmente é utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI (ABNT, 1991). Os traços utilizados em blocos de concreto geralmente são mais pobres do que os utilizados em concretos estruturais, variando entre 1:4 a 1:14 dependendo da função à qual o bloco se destina, se para alvenarias estruturais ou apenas de vedação (REZENDE, 2013).

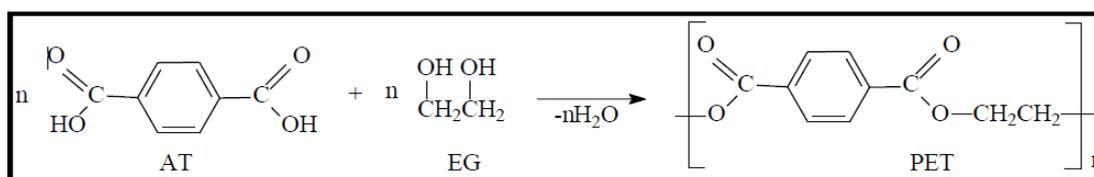
Os agregados (graúdo e miúdo) devem ser proporcionados visando obter o menor índice de vazios sendo que, de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2014), a dimensão máxima do agregado graúdo não deve ultrapassar a metade da menor dimensão do bloco para que não haja problemas na moldagem. Devido às baixas resistências requeridas, podem ser utilizados agregados de diversas naturezas desde que os blocos atendam às exigências da ABNT.

2.8 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET

O politereftalato de etileno é um polímero termoplástico, com estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalino e membro comercialmente mais importante da família dos poliésteres (KARAGIANNIDS *et al.*, 2008).

O PET é formado a partir do ácido tereftálico – AT e do etilenoglicol-EG, (Figura 20). Os poliésteres são produtos de condensação caracterizados por ligações C(=O)-O-C (grupo éster) distribuídas ao longo da cadeia. Dentre os polímeros desta classe o PET foi o primeiro a ser comercializado. Inicialmente como fibra têxtil e, posteriormente, como filme (RABELLO, 2008).

Figura 20: Síntese do PET a partir do ácido tereftálico (AT) e do etilenoglicol (EG).



FONTE: RABELLO, 2008.

O PET foi desenvolvido em 1941 por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson; porém, sua fabricação em grande escala teve início apenas nos anos 1950 nos EUA e Europa, quando foi utilizado principalmente para a fabricação de fibras têxteis. Só a partir dos anos 1970 o PET começou a ser utilizado na fabricação de embalagens. Já no Brasil, a resina PET só começou a ser comercializada na década de 1970, quando inicialmente foi utilizada na forma de fibras. Somente a partir de 1993, a resina passou a ser fortemente utilizada na fabricação de embalagens. (ROMÃO *et al.*, 2009).

No final dos anos 1990 a aplicação mundial de PET era distribuída da seguinte forma: 67% para a produção de fibras têxteis, 24% para a produção de embalagens processadas por injeção-sopro, 5% para a produção de filmes biorientados e 4% para polímeros de engenharia, sendo atualmente um dos termoplásticos mais produzidos do mundo (Kim *et al.*, 2010). Já no cenário nacional, 71% da aplicação é destinada à indústria de embalagens, sendo a maior parte para a produção de embalagens para bebidas carbonatadas. Porém, é importante salientar que o uso do PET nos mercados de óleo comestível e água mineral está se desenvolvendo a altas taxas de crescimento (ROMÃO *et al.*, 2009).

Algumas das vantagens do PET em relação aos demais termoplásticos, que justificam sua grande e crescente utilização, são: excelente estabilidade térmica, facilidade de processamento, alta resistência química, alta estabilidade hidrolítica (devido à presença de anéis aromáticos), propriedades mecânicas atrativas a altas temperaturas, propriedades de barreira a gases, leveza, aparência nobre (brilho e transparência) e baixo custo de produção (ROMÃO *et al.*, 2009).

2.8.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

O PET é o melhor e mais resistente plástico para a fabricação de embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis e diversos outros produtos (Figura 21). Possui alta resistência mecânica e química, impermeabilidade a gases e é bem mais leve que as embalagens tradicionais feitas de vidro ou alumínio, devido a estas características, este polímero mostrou ser o recipiente ideal para indústrias de bebida em todo o mundo, reduzindo custos de transporte e produção.

Figura 21: Fibras (a) e embalagens (b) de PET.



FONTE: RABELLO (2008).

Entre as principais propriedades do PET (Tabela 17), destacam-se a baixa densidade, a transparência, o brilho, a boa performance em diferentes designs, a segurança e a facilidade de moldagem, além de proporcionar uma alta resistência mecânica e química, o PET possui também um excelente barreira para gases e odores.

Tabela 17: Propriedades do Politereftalato de etileno.

Propriedades do Polímero	Valores
Massa molecular	15.000 – 42.000u
Densidade	1,33 – 1,5 g/cm ³
Índice de Refração	1,65 – 1,66
Temperatura de Fusão	250° – 270°C
Temperatura de Transição Vítrea	70° - 74°C

FONTE: MODRO, 2009.

O PET pode ser usado em enorme número de aplicações, pois é bastante versátil. Com a adição de cargas e aditivos, o uso de métodos para orientação das cadeias (uni e biaxial) e a aplicação de tratamento térmico, esse polímero pode ser produzido com muitas propriedades diferentes, apropriadas às exigências específicas das máquinas de transformação e do produto final (KARAGIANNIDIS, 2008).

As aplicações do PET podem ser classificadas genericamente em termos da viscosidade intrínseca, como mostra a Tabela 18.

Tabela 18: Aplicações de PET como função da viscosidade intrínseca.

Aplicações	Viscosidade Intrínseca (dL b⁻¹)
Fibras têxteis e filmes	0.57 – 0.65
Garrafas	0.72 – 0.85
Bandejas	0.85 – 0.95
Reforços de pneus e plásticos de engenharia	0.95 – 1.05

FONTE: FOTI, 2011.

2.8.2 ESTRUTURA MORFOLÓGICA

A estrutura molecular do PET é regular e apresenta polaridade média, o que favorece o empacotamento das cadeias, formando regiões cristalinas. Porém, os grupamentos aromáticos volumosos (responsáveis pela formação de segmentos rígidos) reduzem consideravelmente a velocidade de cristalização, diferentemente da fração alifática, que é responsável pela formação de segmentos flexíveis (RABELLO *et al.*, 2008).

Dessa forma, o PET pode existir tanto como um material amorfo (transparente) quanto como um material semicristalino (opaco), dependendo das condições de processamento e da sua história térmica. Ambas as formas são desejáveis na indústria, dependendo da aplicação a que se destina. O PET semicristalino pode ser obtido submetendo o polímero, a partir do estado fundido, a um processo de resfriamento lento, para que as cadeias tenham

tempo de se rearranjar de forma organizada. Para obter o PET no estado amorfo, é necessário submeter o polímero, a partir do estado fundido, a um processo de resfriamento rápido (*quenching*), para que as cadeias não tenham tempo de se organizar (RABELLO *et al.*, 2008). Normalmente, deseja-se que as fibras tenham alto teor de cristalinidade, aumentando a resistência à deformação, enquanto baixa cristalinidade é normalmente desejada para filmes e embalagens, para aumentar a transparência e a flexibilidade.

O processo de cristalização do PET pode ocorrer também durante o aquecimento do polímero, a partir do estado sólido, pois a temperaturas acima da temperatura de transição vítrea (T_g), as cadeias adquirem mobilidade e podem se rearranjar e formar regiões cristalinas. Tal fenômeno é conhecido como cristalização a frio (CHEN, 2008).

A cristalização a frio constitui um grande problema prático na indústria de embalagens de PET. Quando ocorre durante o reaquecimento das pré-formas e antes do sopro, a cristalização parcial das pré-formas durante o processamento as torna inadequadas ao processo de injeção-sopro, uma vez que as regiões cristalizadas fazem com que o material perca a maleabilidade necessária ao processo (DU *et al.*, 2010).

Contudo, a cristalização a frio é importante durante a fase de sopro-estiramento, pois o material semicristalino possui melhores propriedades mecânicas e de barreira. Para evitar a cristalização, na produção de *grades* de PET voltadas à produção de garrafas, são normalmente utilizados monômeros, como ácido isoftálico e ciclohexanodimetanol, que perturbam a regularidade das cadeias do PET, tornando mais difícil a cristalização (RABELLO *et al.*, 2008).

Os polímeros amorfos são rígidos e vítreos no estado sólido. Nessa condição, as cadeias estão dispostas aleatoriamente no espaço e entrelaçadas, sem que seja possível mudar sua conformação. Esse estado vítreo se mantém quando o polímero se encontra abaixo da temperatura de transição vítrea. Nesse estado, os únicos movimentos que acontecem são o alongamento de flexão e a rotação das ligações macromoleculares. Acima da T_g , o polímero amorfo se torna maleável e pode ser facilmente moldado (KARAGIANNIDIS *et al.*, 2008).

2.8.3 PROCESSOS DE SÍNTESE DO PET

Os processos usados para a síntese do PET são normalmente divididos em três etapas: a pré-polimerização, a policondensação e a polimerização no estado sólido. Nessas etapas, é importante controlar de forma apropriada as principais variáveis do processo, como o perfil dinâmico de temperaturas e o tipo e concentração do catalisador. O controle adequado dessas variáveis é de fundamental importância para determinar a estrutura do polímero e, conseqüentemente, as propriedades e usos finais da resina. Particularmente, importante é a minimização da ocorrência de reações laterais, que podem comprometer a estrutura molecular e as propriedades finais do produto (ODIAN, 2004).

Etapa de Pré-Polimerização

Esta etapa consiste fundamentalmente na fabricação do bis-2-hidroxietil-tereftalato, que é o monômero precursor do PET; mais conhecido pela sigla BHET. Existem, tradicionalmente, duas rotas principais para promoção dessa etapa: a rota de esterificação direta do ácido tereftálico (TPA) com o etileno glicol (EG) e a rota de transesterificação do tereftalato de dimetila (DMT) com o etileno glicol (EG)

A rota de transesterificação foi por muito tempo a rota preferida para a produção do BHET, devido à maior facilidade de se obter o DMT no grau de pureza adequado ao processo, diferentemente do TPA. Nesta etapa as reações são conduzidas na presença de um catalisador numa faixa de temperatura crescente que varia de 170°C a 210°C, com o metanol sendo removido continuamente. Ao final da reação são obtidos oligômeros com grau de polimerização entre 25 e 30 (ROMÃO *et al.*, 2009).

Etapa de Policondensação

Essa é a etapa em que o PET é realmente produzido. A partir dos oligômeros obtidos no primeiro estágio, a reação continua a temperaturas mais

altas, que chegam a 280°C. O EG é removido continuamente sob vácuo crescente, que varia de 66 a 133 Pa, de acordo com o andamento da reação. Dessa forma, facilita-se a remoção do EG, ao mesmo tempo em que se evita a remoção de oligômeros de menor massa molar (ROMÃO *et al.*, 2009).

Etapa de Policondensação no Estado Sólido

Os produtos que são fabricados por injeção-sopro exigem como matéria-prima uma resina de PET com alta massa molar. Para isso, o polímero obtido na etapa de policondensação é submetido a um processo adicional de policondensação no estado sólido, quando a massa molar é elevada a valores superiores a 33.000 g/mol. A reação é realizada a uma temperatura maior que a temperatura de transição vítrea e menor que a temperatura de fusão por um período entre 10 e 30 h, de maneira que as partículas de polímero mantêm a individualidade em um estado amorfo. A reação é realizada sob alto vácuo ou com um sistema de atmosfera inerte, para remover os voláteis resultantes da polimerização. O material é mantido sob agitação forçada ou natural (em leito deslizante ou leito fluidizado) para evitar a sinterização (processo no quais as partículas começam a aderir umas nas outras) (ROMÃO *et al.*, 2009).

As características físicas e mecânicas de produtos PET dependem de uma combinação de variáveis que inclui as características do material, sua composição, cristalinidade, orientação molecular decorrente do processo e tensões internas geradas durante a fabricação. Como um polímero cristalizável, o PET apresenta uma grande dependência de suas propriedades com as condições de processamento. Embora a regularidade e a polaridade da molécula favoreçam a estruturação cristalina, os grupos aromáticos são volumosos e, com baixa mobilidade, tornando lento o processo de cristalização. Em outras palavras, embora o PET seja um polímero inerentemente cristalizável, possui baixa velocidade de cristalização. Assim, de acordo com as condições de resfriamento a partir do estado fundido durante o processamento, o produto pode ser obtido no estado amorfo (com pouca ou nenhuma cristalinidade) ou no estado semicristalino. Ambas as formas são desejáveis na

indústria, dependendo da aplicação a que se destina. O PET semicristalino pode ser obtido submetendo o polímero, a partir do estado fundido, a um processo de resfriamento lento, para que as cadeias tenham tempo de se reorganizar de forma organizada. Para obter o PET no estado amorfo, é necessário submeter o polímero, a partir do estado fundido, a um processo de resfriamento rápido (*quenching*), para que as cadeias não tenham tempo de se organizar (RABELLO *et al.*, 2008).

Estudos para utilização de resíduos de PET pós-consumo como matéria-prima vêm sendo desenvolvidos como solução para os problemas da escassez de agregados naturais e destino dos resíduos não biodegradáveis em muitos países. A construção civil tem se constituído, nos últimos anos, como o mais importante mercado dentre todos os atendidos pela indústria plástica. (RODRIGUES *et al.*, 2008).

2.8.4 RECICLAGEM DO POLITEREFTALATO DE ETILENO

O PET é um termoplástico, que pode ser reciclado varias vezes, com pequenas alterações nas propriedades originais. Graças a esta característica, ocupa posição destacada no mercado de resinas recicláveis, proporcionando economia de energia do petróleo, evita a agressão ao meio ambiente, gera empregos, e viabiliza pequenas empresas de reciclagem. Os processos de reciclagem do PET pós-consumo podem ser divididos em dois grandes grupos: a reciclagem química e a mecânica (MANCINI *et al.* 1998; SANTOS, 2004).

Reciclagem química

A decomposição química do PET está sendo muito estudada e utilizada na produção de várias espécies monoméricas e polióis. Os produtos da decomposição ou "depolymerização" podem ser reutilizados na polimerização (ou repolymerização) do próprio PET. Os catalisadores para reações de hidrólise (decomposição do PET) podem ser ácidos, como ácido sulfúrico, ou bases, como o hidróxido de amônio. Um catalisador ácido pode promover a

hidrólise em temperatura entre 60°C e 100°C em um intervalo de tempo entre 10 e 30 minutos. O processo mais comum, para a reciclagem química dos resíduos industriais de PET utiliza hidróxido de sódio como catalisador em solução aquosa, e etileno glicol, entre 90°C e 150°C, à pressão atmosférica, decompondo o polímero em um sal dissódico. Este sal é então transformado em ácido tereftálico. Outro processo químico de reciclagem muito conhecido é o que utiliza resíduos de fibras de PET. O resíduo de fibras, etilenoglicol e como catalisador um benzenosulfonado, reagem produzindo tereftalato de bis-hidroxieta. Este último é o polímero final que, se produzido com 45% de monômero reciclado, produz fibras com propriedades equivalentes às aquelas produzidas com monômeros "virgens" de PET (Wiebeck; Piya, 2004). Dentre os processos químicos destaca-se o PET Bottle Chemical Recycling Process (AIRES, 2004).

Segundo (AIRES 2004), nesta tecnologia o consumo de energia é inferior à metade do valor consumido nos processos convencionais (28,3 contra 62,7 MJ/kg) e, a resina PET obtida, apresenta as mesmas propriedades, confiabilidade e pureza do PET virgem, podendo ser utilizada sem restrições na produção de embalagens para alimentos. Na reação de depolimerização utilizam-se flocos de PET (flakes), obtidos a partir da moagem e lavagem de garrafas pós-consumo, etilenoglicol (EG), produzindo-se o tereftalato de bis-hidroxieta (BHET) que é encaminhado a sucessivas etapas de purificação por destilação, filtração e descoloração (com carvão ativado). A seguir o BHET é polimerizado em fase líquida e, pós-condensado, em fase sólida. O EG é reciclado, retomando ao reator de depolimerização.

Reciclagem mecânica

No Brasil usa-se o PET em embalagens para refrigerantes desde 1998 e é considerado o terceiro consumidor mundial neste segmento, superado apenas por Estados Unidos e México, conforme dados do Mapeamento de Projetos Ambientais (MAPA) (Wiebeck, Piya, 2004). Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), o Brasil tem sua reciclagem quase que realizada apenas de forma mecânica. Considera-se o PET o segundo material mais reciclado no país, superado apenas pelo alumínio.

Em 2006, cerca de 380 mil toneladas de resina PET virgem foram produzidas com destino a produção de refrigerantes e, cerca de 190 mil toneladas foram recicladas, registrando um crescimento de 11,5% em relação a 2005. No Brasil no total, 51,3% do PET destinado às garrafas foi reciclado, atrás apenas do Japão, que reciclou 62% do material no mesmo período, mas significativamente à frente dos Estados Unidos (23,5%), Europa (38,6%), Argentina (27,1%) e México (11%). Este percentual coloca o Brasil no segundo posto mundial de reciclagem de garrafas PET (ZAPAROLLI, 2008).

No ano 2000 com produção da ordem de 300 mil toneladas de resina virgem, apenas 67 mil toneladas de PET pós-consumo foram recicladas. Estes números comprovam o crescimento do setor da reciclagem nacional assim como, demonstra considerável economia da energia do petróleo. Segundo Mancini et al., (1998) no que tange à energia consumida no processo, estima-se que os processos de reciclagem, em média, consomem apenas 30% da energia utilizada na produção da resina virgem.

Coleta e pré-seleção das garrafas

A reciclagem mecânica do PET pós-consumo inicia-se na coleta das garrafas de refrigerantes, descartadas pela sociedade. Nesta fase, os catadores recolhem manualmente as garrafas encontradas no meio ambiente, em aterros sanitários, lixões, ou unidades municipais de coleta seletiva. Logo após as garrafas são separadas por cor e prensadas, originando fardos com peso médio de 80kg e volume de 0,5m³. A prensagem e enfardamento viabilizam a comercialização do material a longas distâncias. Para que o material adquira maior valor comercial agregado é importante que esteja com a menor contaminação possível, pois a presença de contaminações como o vidro, papel, metais ou outros polímeros, provoca a desvalorização do material enfardado ou até mesmo, pode inviabilizar sua comercialização. Dentre os outros polímeros mencionados, destaca-se o PVC, poli(cloreto de vinila), cuja degradação térmica provoca condições ácidas que promovem a hidrólise e consequente degradação do PET, mesmo em concentrações da ordem de 400ppm. Como agravante, o PVC cuja densidade (1,39 g/cm³) é praticamente

a mesma do PET, (1,33-1,45 g/cm³), não pode ser removido por decantação, nas operações de lavagem, ao contrário do polietileno (PE), e do polipropileno (PP), que apresentam densidade inferior a 1,0 g/cm³ e que são utilizados para a produção de tampas e rótulos, que compõem as garrafas.

Processo de moagem e pré-lavagem das garrafas

O PET enfardado é enviado para centenas de empresas recicladoras que desfazem os "amarrados", remetendo-os a sucata, com auxílio de uma esteira transportadora, equipada com um detector de metais. Contaminações grosseiras visíveis podem ser removidas manualmente, por peneira estática ou vibratória, e por outros dispositivos desenvolvidos para tal função. Na sequência, as garrafas são moídas com água, em moinhos de facas rotativas originando o PET moído, denominado flocos ou flakes, que apresentam granulometria em torno de 9,5mm.

Os flocos moídos são transportados pneumáticamente para as lavadoras na presença de água e produtos químicos de limpeza, (soluções diluídas de soda e detergentes).

As lavadoras são máquinas que possuem pás rotativas, presas ao eixo central apoiado por mancais, que gira em velocidade de 1200rpm, promovendo grande atrito e movimentação aos flakes. O eixo da máquina é envolto por uma chapa metálica perfurada, que mantém o material no processo e permite a passagem da solução de limpeza, e da sujeira extraída dos flocos para fora do sistema.

Um tanque de decantação abastecido com água limpa recebe o material pré-lavado onde o PET (mais denso) desce para o fundo do tanque, separando-se do PE e PP (que flutuam) na superfície da água, e são continuamente removidos do processo no fluxo que transborda por um dreno, localizado na parte superior. Uma rosca transportadora posicionada no fundo do tanque remove os flocos do PET moído contendo pequena quantidade de rótulos, e isento de tampas, para as centrífugas de secagem.

Esta condição de lavagem, não consegue remover todo o adesivo utilizado para a fixação dos rótulos nas garrafas. É comum a presença de fragmentos dos rótulos, ainda colados nos flakes lavados.

Por meio de centrifugas rotativas idênticas às lavadoras, porém, sem adição de água ou soluções, a umidade superficial do polímero é reduzida por centrifugação. Um transportador pneumático conduz o PET limpo e seco para silos de armazenagem, que permitem a embalagem do polímero em big bags, já em condições de comercialização, ou destinados a outros processos complementares.

A Figura 22 ilustra um conjunto típico de lavadoras e secadoras utilizado na reciclagem mecânica dos flakes de PET.

Figura 22: Conjunto de lavadoras e secadoras.



FONTE: ZAPAROLLI (2008).

2.9 POLITEREFTALATO DE ETILENO TRITURADO

O processo de micronização do PET consiste em reduzir a granulometrias de até 50mesh, resinas virgens ou materiais pó-consumo oriundos de processos de reciclagem. Na produção de pó de PET, normalmente passa-se por um processo bastante rigoroso. De acordo com Melo (2004) na produção do pó de PET, segue as etapas descritas:

A primeira etapa é a coleta e seleção das garrafas, cujos rótulos e tampas são retirados e submetidos a uma lavagem em água.

A segunda etapa é a granulação, durante a qual garrafas são moídas em moinhos de facas, resultando nos “flakes”.

A terceira etapa é a aglomeração, na qual os flocos, por terem uma densidade muito baixa, recebem tratamento térmico com calor para que haja diminuição no volume e, por consequência, aumento da densidade, tornando, assim, o material mais adequado à rotomoldagem.

A quarta etapa é a rotomoldagem, onde o material é preparado para o processo de trituração.

A quinta etapa é o processo de trituração, onde o material é cortado, terminando em formato de pellet.

A sexta e etapa final consiste na micronização, reduzindo o material em um pó com o tamanho da partícula passando na peneira 0,42mm.

2.9.1 Produção de pó de PET

A produção de pó de PET, segundo a literatura, não tem uma cultura de abordagem explícita quanto aos processos de produção (Duarte, 1997). O pó é normalmente definido como material reduzido a tamanhos micrométricos, abrangendo faixas abaixo de 28 # (mesh) ou 0,592mm (SOARES, 2003).

Em 1997, quando o Grupo de Engenharia de Superfícies do CETEC, projetou os primeiros experimentos de recobrimentos com PET, não se encontrou no mercado, este material, na forma de pó. Iniciou-se, então, uma série de experimentos de cominuição, incluindo raspagem, carga de corte (kg), profundidade de corte (mm) de PET fundido e refundido, moagem em moinhos de barras e de bolas de garrafas refundidas, raspagem de garrafas e moagem em moinhos de espiral sem fim.

As resinas apresentam-se sob forma de grânulos cilíndricos, paralelepípedicos ou cúbicos com volume de 30 a 40 mm³ para uma densidade

aparente de 0,80 a 0,99 kg/dm³. Estas resinas são submetidas à moagem mecânica para produção de pó e na maioria das vezes em moinhos de bolas ao ar ou a baixas temperaturas (criogenia) (FONT *et al.*, 1999).

Raspagem de PET fundido

Boiko *et al.*, (2001) desenvolveu um estudo com um revestimento a partir de pó de PET com granulometria em torno de 150# (105µm), obtido mediante a raspagem de placas solidificadas que, por sua vez, foram obtidas a partir da fusão de garrafas de PET 2 l. As placas de PET fundidas eram desgastadas através de lixas de SiC (80), usando água como lubrificante, após o que foram passadas os resíduos da raspagem (pó) através de uma peneira mesh 270. Após a secagem o pó foi peneirado em uma peneira 60# (250µm). A distribuição de tamanho final das partículas do pó de PET reciclado obtida foi entre 250 e 53µm .

Moagem em moinho de barras

A produção de pó de PET por moagem em moinho de barras geralmente é realizada com características granulométricas e fluidez adequadas à sua utilização em aspersão térmica. Utiliza-se as mesmas etapas da fusão, porém, as placas são novamente fundidas para se obter maior grau de porosidade, objetivando facilitar a moagem em moinho de barras. Os processos passaram por granulação, refusão por partes (bico/meio/fundo), pré britagem, britagem em rolos de ferro, Peneiramento a 5# (4mm), retorno dos retidos, moagem ao ar ou criogênica e peneiramento a seco por sucção (DUARTE, 1997; MENDONÇA, 2015).

Moagem em moinho de bolas

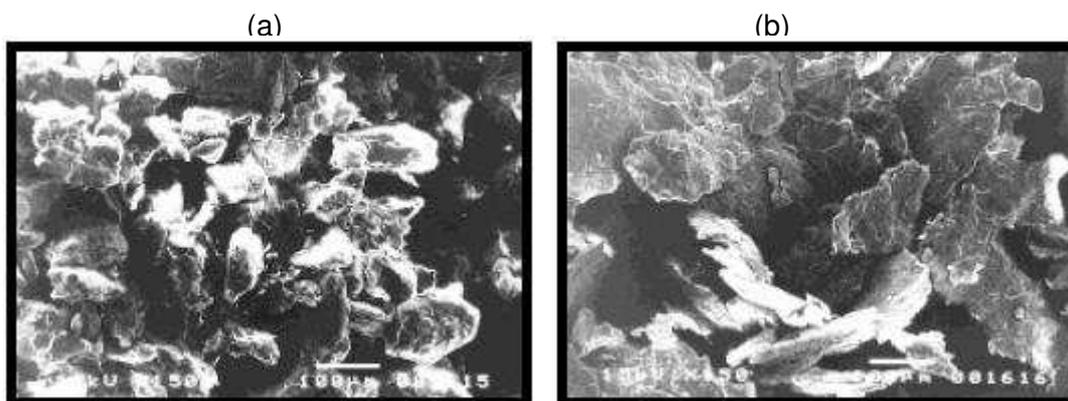
Para se obter pós por moagem em moinho de bolas produzem-se lingotes de PET fundido por processo semelhante aos obtidos no moinho de barras, utilizando-se bolas de ferro fundido de 1,5” de diâmetro. Os lingotes são depositados dentro do moinho por aproximadamente 8 horas. O

processamento faz-se por granulação, refusão, raspagem à úmido, em peneira de 200# (75 μ m), lingotes, e moagem criogênica em moinhos de bolas .

Num segundo caso, pós de PET obtidos de garrafas de refrigerante pós-consumo, são produzidos a partir de garrafas fundidas, lixadas até uma granulometria abaixo de 150# (105 μ m) e moídas em moinho de bolas de cerâmicas obtendo-se granulometria abaixo de 60# (250 μ m).

O pó produzido na moagem criogênica apresenta partículas com forma predominantemente lamelar (Figura 23 a), tipo lasca, ao passo que a moagem não criogênica apresentava partículas mais regulares (Figura 23 b).

Figura 23: Fotomicrografias dos pós de PET produzidos na moagem, não criogênica (a) e criogênica (b).



Moagem em moinho de facas

Na categoria de pó de PET – pós-consumo basicamente um único produto é obtido pela maioria das empresas de reciclagem: os “flakes” ou flocos, sobre os quais se aplicam os processos de transformação. Este produto é destinado a grandes empresas de fabricação de resinas recicladas. Industrialmente, o resíduo de PET pós-consumo é basicamente formado por garrafas de refrigerante. De acordo com a empresa Sequel, a reciclagem do PET é difícil na produção de pós, tanto que foram as empresas produtoras de PET que desenvolveram o processo, que consiste na moagem da garrafa PET, na retirada dos contaminantes, na lavagem e em uma nova moagem, sendo o

material resultante o denominado “flakes” ou flocos, com resíduos de finos, ou seja, considerado como Pó.

Os “flakes” tratam-se de um material de reciclagem resultante da moagem, em moinhos de facas, a partir das garrafas de refrigerantes pós-consumo, prensadas e enfardadas. A sucata classificada é alimentada em um moinho com lavadora, cuja saída possui uma peneira para a eliminação da sujeira lavada. O material moído é enviado para um tanque de decantação com água, onde rótulos e tampas são separados por meio da diferença de densidade. Os rótulos e tampas, que normalmente são feitos de Polipropileno (PP), com uma densidade menor que a da água, flutuam, enquanto o PET, mais denso, é descarregado no fundo de um tanque e enviado para uma centrífuga. No decantador, uma lima retira os metais ferrosos do PET. Na centrífuga, ar quente passa em contracorrente com o PET moído (os flocos) e, finalmente faz-se a secagem do material. Após a centrifugação, passa-se o material por uma peneira vibratória, onde os finos são separados dos “flakes” com eletroímã para a separação dos metais ferrosos.

O resíduo de flocos originado da moagem em moinhos de facas é considerado um rejeito, devido a seu alto grau de contaminação química e granulometria muito fina

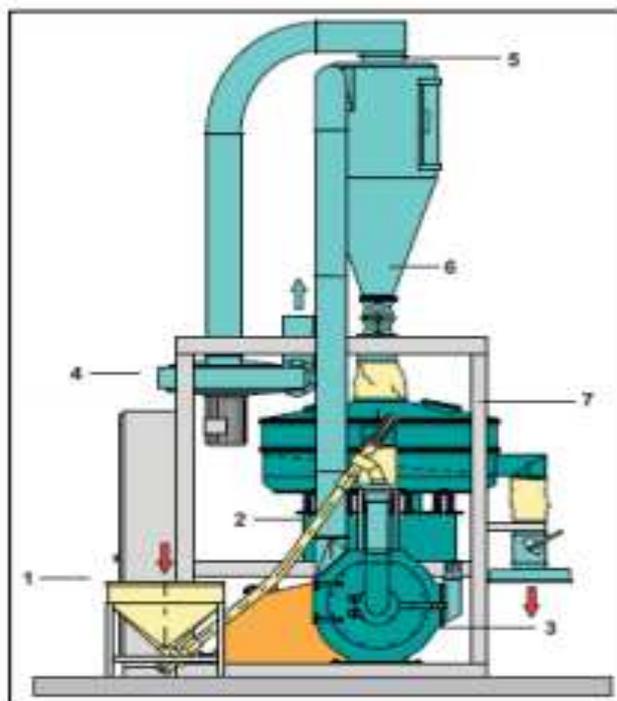
Moagem espiral

Em ensaios de moagem de PET em moinhos de espiral sem fim, a classificação do pó é realizado por peneiramento a seco, obedecendo-se as etapas de homogeneização, quarteamento das amostras e classificação por peneiras de 100#(150 μ m), 270#(53 μ m) e 400# (37 μ m) de abertura de malha. utilizando-se resíduos de PET de moinho de facas industrial, com os seguintes procedimentos, remoagem dos resíduos de moinho de facas em vários ciclos de retorno do moído e peneirado a seco nas peneiras de 100# (150 μ m), 270# (53 μ m) e 400# (37 μ m).

Como um exemplo do processo de micronização, uma companhia Alemã chamada Pallmann, tritura o material em tamanho de pó, usando a máquina

PKM (Figura 24). Através de uma caixa de armazenamento (1) e por meio de uma unidade de dosagem (2), o material a ser moído é absorvido dentro do moinho (3). O material pulverizado é transportado para fora do moinho por meio de um ventilador (4) e é transportado através de um separador ciclone (5) com uma válvula rotativa a jusante (6) para uma unidade especial de peneiração. (7). Materiais com tamanho não desejado retidos na tela, são reintroduzidos no processo.

Figura 24: Máquina PKM utilizada para trituração do PET.



2.10 UTILIZAÇÃO DO POLITEREFTALATO DE ETILENO EM CONCRETO

A crescente conscientização sobre o meio ambiente tem contribuído para as preocupações relacionadas com a eliminação e reuso dos resíduos gerados. A gestão de resíduos sólidos é uma das principais preocupações ambientais do mundo. Com a escassez de espaço para deposição em aterros e, devido ao seu custo cada vez maior, a utilização de resíduos tem se tornado uma alternativa atraente para sua disposição (SIDDIQUE, 2008).

Novas alternativas para reutilização destas embalagens pós-consumo devem ser investigadas, de modo a evitar o descarte em aterros sanitários e no meio ambiente onde, por não serem de rápida decomposição, acarretam problemas de ordem operacional nos aterros sanitários, dificultando a compactação da parte orgânica, além da significativa perda econômica e social, uma vez que a indústria da reciclagem gera empregos e usa mão de obra de baixa qualificação. O conhecimento das características tecnológicas dos resíduos aumenta a possibilidade de utilização dos produtos confeccionados com estes materiais, além da redução da geração de resíduos mais danosos que os originais, uma vez que todo processamento gera resíduo (REIS *et al.*, 2011).

Com a escassez dos agregados naturais nas regiões das grandes cidades, estão desenvolvendo-se os chamados agregados artificiais, os quais são fabricados, de preferência, de resíduos industriais (MODRO *et al.*, 2009). Os materiais utilizados comumente como agregados para concreto de cimento Portland são provenientes de fontes naturais não renováveis e, a exemplo do cimento Portland, possuem uma utilização mundial em volumes extremamente elevados.

Este consumo desenfreado, caso não seja contido, poderá provocar uma estagnação das fontes destes materiais, sendo importante então promover uma substituição destes por materiais provenientes de fontes alternativas, tais como: uso de grãos de polipropileno reciclado, em substituição aos agregados de concreto (FIORITI, 2010); adição de fibra de PET para produção de concreto (OCHI *et al.*, 2007).

Estudos visando à utilização de resíduos de PET como matéria-prima vêm sendo desenvolvidos como solução para os problemas da escassez de agregados naturais e destino dos resíduos não biodegradáveis em muitos países.

Considerando as possíveis vantagens na utilização de agregados plásticos reciclados, Rodrigues *et al.*, 2008, pesquisaram a viabilidade de utilização dos resíduos de PET em forma de flocos (*flakes*) como material alternativo, em substituição de matéria-prima não renovável na natureza (areia de sílica), minimizando os impactos ambientais. Os valores de resistência à

compressão com adição de partículas de PET em substituição ao agregado exibiriam valores aceitáveis para aplicações de engenharia. Desta forma, o aproveitamento desse resíduo sólido representa uma alternativa econômica e ecológica, diminuindo o risco à saúde pública e ao meio ambiente. Um material que outrora fora considerado como lixo e que, mediante pesquisa, pode se tornar um grande aliado na confecção de outros produtos, é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável dos setores industriais.

Kim *et al.*, (2010) investigaram a adição de resíduos de PET no concreto estrutural. O trabalho comparou o desempenho do concreto reforçado com fibras de PET e com fibras de polipropileno (PP) em frações de volume de fibra de 0,5%, 0,75% e 1,0%. Testes foram realizados para medição das seguintes propriedades: resistência à compressão e à flexão, módulo de elasticidade, deformação devido à retração de secagem e tenacidade. Em relação ao desempenho do elemento estrutural, a resistência máxima e a tenacidade relativa de vigas de concreto reforçado com fibras de PET foram significativamente maiores do que o concreto sem reforço de fibra.

Pereira de Oliveira e Castro Gomes (2011) investigaram a utilização de PET reciclado como fibras de reforço em argamassa. A investigação foi realizada em amostras com diferentes volumes de fibras (0%, 0,5%, 1,0% e 1,5%). Foram medidas as propriedades mecânicas como flexão, resistência à compressão e tenacidade. Os resultados indicaram que a incorporação de fibras de PET melhorou significativamente a resistência à flexão. O volume máximo de fibra de PET para uma trabalhabilidade desejada foi de 1,5%.

Foti (2011) propôs o uso de garrafas PET para a obtenção de fibras de reforço para aumentar a ductilidade do concreto. Os resultados demonstraram um aumento da tenacidade do concreto reforçado com fibra de PET. As fibras utilizadas foram obtidas através de cortes simples a partir de garrafas de PET, sem qualquer processamento, de uma forma simples, reduzindo os custos de produção. Os testes mostraram que as fibras de PET em uma mistura de concreto promovem o aumento da ductilidade do concreto.

Reis *et al.*, (2011) utilizaram um agregado plástico feito de resíduos de garrafas PET em substituição parcial dos agregados nas argamassas. Diferentes frações em peso de areia (5%, 10%, 15% e 20%) tiveram o mesmo

peso de plástico. O estudo investigou as propriedades de fratura dos compósitos obtidos. A redução do peso específico das argamassas poliméricas e uma melhoria significativa do seu comportamento pós-pico de flexão foram observados.

Neste contexto, a utilização de resíduos de PET pós-consumo, como substituto de agregados minerais em concreto de cimento Portland, apresenta-se como uma alternativa viável para dar uma destinação mais nobre aos mesmos, agregando valor e reduzindo impactos ambientais para a obtenção de concretos com propriedades otimizadas para uma aplicação específica.

2.11 AGENTES DE DEGRADAÇÃO E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM CONCRETO

Os agentes de degradação podem ser classificados, de acordo com a sua origem, em mecânicos, biológicos, químicos e físicos, entretanto, ambos estão sempre intrinsecamente ligados. Dentre os processos físicos de degradação em concretos secos, Madhkhan *et al.*, (2012) citam o desgaste superficial por abrasão e fissuras ligadas ao proporcionamento inadequado de materiais e à baixa energia de compactação, os quais provocam falta de homogeneização no concreto causando fraturas e desgaste prematuro.

Mehta e Burrows (2011), analisando o desempenho de estruturas de concreto, concluíram que o uso de cimento de alta resistência inicial também pode proporcionar microfissuras devido à retração térmica causada pela energia liberada durante o rápido processo de hidratação ocorrido nas idades iniciais. Tais fissuras, assim como o excesso de porosidade, aumentam a permeabilidade desencadeando manifestações patológicas relativas a processos químicos de degradação.

Sendo comum a todos os produtos à base de cimento Portland, as patologias mais frequentes em concretos secos são a hidrólise dos componentes da pasta de cimento, a eflorescência e o ataque por sulfatos

(Glasser, Marchand e Sanson, 2008 e Irassar, 2009), que resulta na formação de etringita e taumasita, ambas com efeitos nocivos à durabilidade do concreto.

2.11.1 A água como agente de degradação

Em sólidos porosos, a permeabilidade à água é habitualmente fator determinante na taxa de deterioração, mas não só a porosidade como o diâmetro e a interconexão entre os poros influenciam diretamente a capacidade de penetração da água, causando os principais problemas ligados à durabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A hidrólise dos componentes ocorre quando, sob efeito de água corrente, a solução de contato é diluída e o Ca(OH)_2 é retirado por lixiviação, expondo os componentes cimentícios à decomposição química o que reduz a resistência podendo levar até a degradação total do concreto. A eflorescência é decorrente da reação do Ca(OH)_2 lixiviado com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar resultando na precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma de crostas brancas na superfície do concreto (GLASSER, *et al.*, 2008).

A ação da água em uma alvenaria tem origens diversas, como a infiltração por capilaridade da água do solo, da água de lavagem para manutenção e da água da chuva nas vedações externas, sendo que esta última pode representar de 40% a 70% dos casos de infiltração (Rezende, 2013). A infiltração pela chuva pode acarretar danos à edificação que vão desde problemas estéticos, como manchas e bolores, até a degradação dos materiais, sendo a chuva dirigida (chuva à qual é associada uma componente horizontal que é a velocidade do vento) a principal causa de erosão e degradação dos materiais que compõem as fachadas (GIONGO *et al.*, 2011).

2.11.2 Ensaio de durabilidade à ação de chuvas

Os ensaios utilizados para avaliar a durabilidade de alvenarias e/ou de seus componentes quando expostos às intempéries de campo, são geralmente

classificados em três categorias: ensaios indiretos, acelerados e de simulação (AL-AKHRAS, 2009).

Dentre os ensaios indiretos, o precursor e provavelmente o mais amplamente divulgado é o normatizado pela norma da ABNT NBR 13554 (ABNT, 2013), desenvolvido com a finalidade de determinar a perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzido por ciclos de molhagem e secagem (AL-AKHRAS, 2009).

Os ensaios por gotejamento, considerados tanto indiretos como acelerados, associam a profundidade do sulco resultante à erodibilidade do elemento avaliado. De acordo com Heathcote, 2002; Rezende, 2013, o primeiro teste de gotejamento foi desenvolvido por Yttrup, Diviny e Sottile, na Universidade de Deakin, Austrália, com o objetivo de criar um teste simples que pudesse ser utilizado por proprietários e, geralmente também construtor de edificações rurais, para determinar a aptidão do solo de suas propriedades para a confecção de tijolos de adobe. O teste consiste no gotejamento de 100 ml de água (aproximadamente 14 gotas por minuto) de uma altura de 400 mm sobre a superfície de tijolos posicionados e inclinados a um ângulo de 27° em relação à horizontal, sendo considerada como parâmetro de avaliação a média da profundidade dos sulcos resultantes.

2.11.3 Degradação por ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos, sendo uma reação expansiva, provoca fissuras que aumentam a permeabilidade e facilitam a penetração da água, acelerando o processo de degradação pela perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento (Irassar, 2009). Este processo leva a perda progressiva de resistência e massa, escamação e até mesmo a desintegração do concreto.

Basicamente o ataque por sulfatos ocorre pela sua reação com o aluminato tricálcico ($\text{CaO}_3\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A ou celita) do cimento hidratado, entretanto, enquanto o sulfato de cálcio (CaSO_4) apenas reage com o aluminato tricálcico, o sulfato de sódio (Na_2SO_4) reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) livre formando sulfato de cálcio (CaSO_4) que por sua vez irá

reagir com os aluminatos. O resultado destas reações é a formação de gesso e etringita, significativamente mais volumosos do que os reagentes iniciais (1,2 a 2,2 vezes) o que provoca expansão e, por conseguinte, fissuras e deterioração (VASCONCELOS *et al.*, 2010).

Existem ainda as patologias decorrentes das reações químicas que ocorrem entre agregados reativos (calcários, quartzo, vidro vulcânico) e os álcalis do cimento (Na_2O e K_2O). Na reação álcali-agregado, a mais frequente, a sílica ativa presente nos agregados reage com os álcalis do cimento formando um gel expansivo nocivo ao concreto, pois, ao provocar fissuras, reduz a resistência e a durabilidade (Figuerôa e Andrade, 2007; Glasser *et al.*, 2008). Entretanto, tais patologias não serão abordadas neste trabalho por entender-se que dificilmente podem ocorrer em um sistema de produção industrial, como é o caso dos blocos de concreto, onde existe seleção de matérias-primas.

2.12 PROPRIEDADES ACÚSTICAS DO CONCRETO

A globalização da arquitetura faz com que edificações sejam reproduzidas em diversas partes do mundo com os mesmos materiais e tecnologias. Assim são ignoradas as variáveis climáticas, acústicas em favor de modismos e de materiais não condizentes com a realidade local.

Na atualidade, os transtornos e reclamações causados pelos ruídos aumentam dia-a-dia, devido a alguns fatores, tais como: equipamentos eletrônicos cada vez mais numerosos e potentes, fachadas das edificações muito expostas e sem tratamento adequado, pouca isolamento dos materiais usados na interface de economias distintas, pouca isolamento dos materiais usados na interface de uma mesma economia, vibrações transmitidas pelas estruturas, etc. Os problemas decorrentes do mau desempenho acústico dos materiais são, em geral, complexos. Quando não há uma preocupação na etapa do projeto, as soluções, na maioria das vezes, exigem grande aplicação financeira (NETO, 2006).

O desempenho de um edifício está diretamente relacionado com as características dos elementos que o conformam e suas interações. Conhecer as propriedades térmicas dos materiais e fechamentos permite estabelecer estratégias para que o edifício possa responder de maneira eficiente às variações do clima.

As recomendações sobre os materiais a serem utilizados na construção de edificações, muitas vezes, tratam apenas de uma das suas características térmicas. Mas não é possível basear-se em somente uma de suas propriedades térmicas, de forma independente, uma vez que todo o material combina essas propriedades como uma unidade. Um material isolante (baixa condutividade térmica) também tem determinados valores de densidade e de calor específico que podem diferenciá-lo de outro material, mesmo com condutividade igual (GONZÁLEZ CRUZ, 2002).

O crescimento populacional dos últimos anos, da indústria (e suas máquinas) e de outros setores da economia, em conjunto com o surgimento de edificações mais esbeltas, tem colaborado para aumentar o desconforto acústico para a população em geral. Em um passado recente, as estruturas eram espessas e pesadas, não se tinha grande preocupação com o conforto acústico. Novos elementos e métodos construtivos têm surgido cada vez mais esbeltos, causando considerável perda de isolamento. Isso reafirma a necessidade do desenvolvimento e da realização de estudos acústicos relacionados a esses novos elementos e métodos, garantindo, dessa forma, um maior conforto para o ser humano (NETO, 2006).

O conforto acústico ainda não é uma prioridade para arquitetos e engenheiros, no desenvolvimento de projetos. O excesso de ruído presente no dia a dia do ser humano é tão preocupante quanto qualquer outra patologia. Além disso, os sintomas são intrínsecos e, muitas vezes, não percebidos.

Quando uma pessoa é submetida a altos níveis de ruído, existe a reação de todo o organismo a esse estímulo. O ruído não afeta somente a audição, mas inclusive o sono, agindo sobre o seu subconsciente e sobre o seu sistema nervoso, prejudicando sua saúde psíquica e mental.

A intensidade de um som depende do valor que tenha sua pressão sonora. Um som muito fraco, audível pelo homem, tem uma pressão sonora da ordem de 20 μPa em 1 KHz. A essa mínima pressão sonora se denomina “limiar da audição”, sendo o valor a partir do qual o ser humano é capaz de ouvir. O “limiar da dor” é uma pressão sonora muito alta, da ordem de 20 Pa. Essa relação então, entre a máxima e a mínima pressão sonora que o ouvido pode perceber, é de 1.000.000 de vezes. Todos os sons que escuta-se têm pressões sonoras compreendidas entre estes limites (KAPPAUN, 2012).

Sendo muito difícil expressar graficamente números de ordens de grandeza tão diferentes, numa mesma escala linear, usa-se a escala logarítmica, um valor de divisão adequado a esta escala é \log_{10} , também chamado Bel. No entanto, o Bel é um valor de divisão de escala muito grande e usa-se então o decibel (dB) que é um décimo do Bel.

A transmissão da energia sonora que ocorre entre dois ambientes se dá através do ar, pelas aberturas como portas, janelas, pela estrutura que separa os dois ambientes, através de vibrações nessa estrutura que são transmitidas de um ambiente para outro; e por meio da transmissão por flancos ou transmissão marginal, através das superfícies limítrofes da estrutura como lajes, pilares, etc (KAPPAUN, 2012).

O coeficiente de absorção de uma superfície (α) é definido com um padrão físico que indica quão bom ou ruim um material é, em termos de acústica. Fisicamente falando, é o parâmetro que diz quanta energia sonora é perdida por uma onda sonora que transita num espaço quando esta incide sobre uma superfície (Everest *et al.*, 2009). Este parâmetro é necessário quando há o desenvolvimento de um projeto arquitetônico. Se há absorção insuficiente em um espaço, tal espaço se torna fortemente reverberante. Se for uma estação de trem, por exemplo, os anúncios dos horários de chegada e partida dos veículos se tornam não inteligíveis. Muita absorção também pode ser prejudicial. Em uma sala de concertos, por exemplo, se houver muita absorção, os instrumentos soam pobres e a acústica do espaço se torna ruim. Vários métodos podem ser utilizados para a obtenção deste coeficiente. Entretanto, a grande maioria destes métodos, a exemplo do método da câmara

reverberante, requerem um grande número de materiais que, geralmente, são muito caros (Umnova, 2013).

Um método que possui fácil aplicação e não gera tanto custo é o método do tubo de impedância. O teste consiste em colocar uma amostra do material que se quer analisar em um tubo fechado, pelo qual viaja uma onda sonora de propriedades físicas conhecidas. Microfones então captam a onda e verificam quanta energia foi perdida devido à incidência da onda no material. Este método permite a obtenção do coeficiente de absorção para tantas faixas de frequência quantas se façam necessárias.

Faixas de frequência

Frequência (f) é o número de oscilações por segundo do movimento vibratório do som. Para uma onda sonora em propagação, a frequência representa o número de ondas que passam por um determinado referencial em um intervalo de tempo. Chamando de l , comprimento de onda do som e V , a velocidade de propagação da onda, pode-se escrever :

$$V = l \cdot f \quad (\text{Eq. 03})$$

O ouvido humano é capaz de captar sons de 20 a 20,000 Hz. Os sons com menos de 20 Hz são denominados infrasons e os sons com mais de 20,000 Hz são chamados de ultrasons. Esta faixa de frequências entre 20 e 20kHz é definida como faixa audível de frequências, ou banda audível, pois é a faixa que possui as frequências que o ouvido humano consegue captar (Everest *et al.*, 2009).

Algumas frequências vibrarão parecidas aos nossos ouvidos, como a frequência de 100Hz e 200Hz, por exemplo. Isso se dá devido ao fato de que a frequência de 200Hz é dita harmônica de 100Hz, pois está linearmente relacionada com aquela, isto é,

$$f_{200\text{Hz}} = 2 \times 100\text{Hz} \quad (\text{Eq. 04})$$

Desta forma, todas as frequências possuem harmônicos, de forma que 500Hz é dito harmônico de quinta ordem de 100Hz; 600 Hz é dita harmônico de sexta ordem de 100Hz, e assim por diante (EVEREST *et al.*, 2009).

Quando a diferença entre frequências é muito pequena, diga-se a diferença entre 100Hz e 200hz, 200Hz e 400Hz e 400Hz e 800Hz, todas as frequências que estiverem entre estes intervalos vibrarão iguais aos nossos ouvidos. Isto é, não se consegue diferir entre 110Hz e 120Hz com clareza. Quando este fenômeno ocorre, diz-se que tais frequências estão contidas em uma determinada faixa ou banda (ROSSING *et al.*, 2010). A Tabela 19 apresenta as principais faixas de frequência e suas divisões.

Tabela 19: Bandas de frequência.

Frequência central (Hz)	Banda de terços de oitava (Hz)	Bandas de oitava (Hz)
100	89,1 - 112	
125	112 - 141	
160	141 - 178	89,1 - 178
200	178 - 224	
250	224 - 282	
315	282 - 355	178 - 355
400	355 - 447	
500	447 - 562	
630	562 - 708	355 - 708
800	708 - 891	
1000	891 - 1120	
1250	1120 - 1410	708 - 1410
1600	1410 - 1780	
2000	1780 - 2240	
2500	2240 - 2820	1410 - 2820
3150	2820 - 3550	
4000	3550 - 4470	
5000	4470 - 5620	2820 - 5620

Banda de Oitava: é uma banda de frequência que se encontra entre duas frequências com uma proporção de 2

Banda de terço de oitava: É a terceira parte de uma banda de oitava.

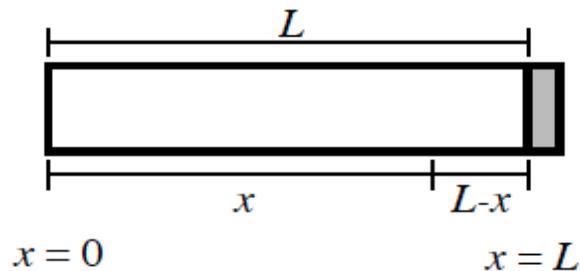
FONTE: Imperialum (2015).

Neste âmbito, os testes de materiais acústicos se dão também por meio de bandas de frequência, uma vez que seria impossível realizar um teste para cada frequência entre 20Hz e 20kHz.

Teste do tubo de impedância

Seja um tubo com seção transversal de área S e comprimento L que possui um pistão posicionado em $x' = 0$ (Figura 25).

Figura 25: Tubo com pistão.



O tubo termina em $x' = L$, onde possui uma impedância mecânica Z_{mL} . Se o pistão vibra a uma frequência baixa o suficiente que permita apenas a propagação de ondas estacionárias então a pressão total no tubo será a soma da pressão causada pela onda incidente e a pressão causada pela onda refletida, de forma que

$$\mathbf{p}(x, t) = \mathbf{A}e^{i[\omega t + k(L-x)]} + \mathbf{B}e^{i[\omega t - k(L-x)]} \quad (\text{Eq. 05})$$

onde \mathbf{A} e \mathbf{B} são determinados pelas condições de contorno em $x = 0$ e $L = 0$. Utilizando a Equação de Euler é possível obter a velocidade u de uma partícula no tubo:

$$\mathbf{u}(x, t) = \frac{1}{\rho c} (\mathbf{A}e^{i[\omega t + k(L-x)]} - \mathbf{B}e^{i[\omega t - k(L-x)]}) \quad (\text{Eq. 06})$$

onde p é a densidade do ar no tubo e c é a velocidade do som no tubo, adotada como sendo a velocidade do som no ar.

A impedância mecânica das ondas no tubo podem ser expressas como

$$\mathbf{Z}_m(x) = \frac{pS}{u} = p c S \left(\frac{A e^{ik(L-x)} + B e^{-ik(L-x)}}{A e^{ik(L-x)} - B e^{-ik(L-x)}} \right) \quad (\text{Eq. 07})$$

A impedância mecânica em $x = L$ deve ser igual à impedância mecânica da terminação, isto é

$$\mathbf{Z}_{mL} = p c S \left(\frac{A+B}{A-B} \right) = p c S \left(\frac{1+\frac{B}{A}}{1-\frac{B}{A}} \right) \quad (\text{Eq. 08})$$

Escrevendo $\mathbf{A} = A$ e $\mathbf{B} = B e^{i\theta}$, temos

$$\mathbf{Z}_{mL} = p c S \left(\frac{1+\frac{B}{A} e^{i\theta}}{1-\frac{B}{A} e^{i\theta}} \right) \quad (\text{Eq. 09})$$

Assim, dados o raio de incidência e a mudança de fase θ , é possível determinar a impedância da amostra. De posse da impedância, pode-se calcular o coeficiente de absorção de acordo com as seguintes expressões:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$R = \frac{\mathbf{Z}_{mL} - \rho_0 c_0}{\mathbf{Z}_{mL} + \rho_0 c_0} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde ρ_0 é a densidade do ar e c_0 é a velocidade do som no meio (ar), e α é o coeficiente de absorção sonora.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

Neste capítulo estão descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, relacionados aos aspectos inerentes aos critérios adotados, materiais utilizados e as especificações químicas, físicas e mecânicas dos materiais.

Os métodos de ensaios utilizados baseam-se em normas, entre elas, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e normas internacionais da ASTM e da AASHTO.

A Figura 26 ilustra o Fluxograma das etapas da pesquisa, atividades e ensaios a serem realizados.

Este capítulo foi dividido basicamente em oito etapas:

Primeira Etapa – Seleção de Materiais: descrição dos materiais, critérios adotados para escolha e laboratórios utilizados;

Segunda Etapa – Caracterização química, física e mineralógica: realização de ensaios para determinação das propriedades químicas, físicas e mineralógicas do Politereftalato de etileno, dos agregados e do cimento.

Terceira Etapa – Foram moldados blocos de concreto estrutural substituindo o agregado miúdo por teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de PET triturado.

Quarta Etapa - Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto estrutural: absorção de água, peso unitário e resistência à compressão simples e realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura visando avaliar a estrutura interna do concreto com incorporação de PET nos teores supracitados.

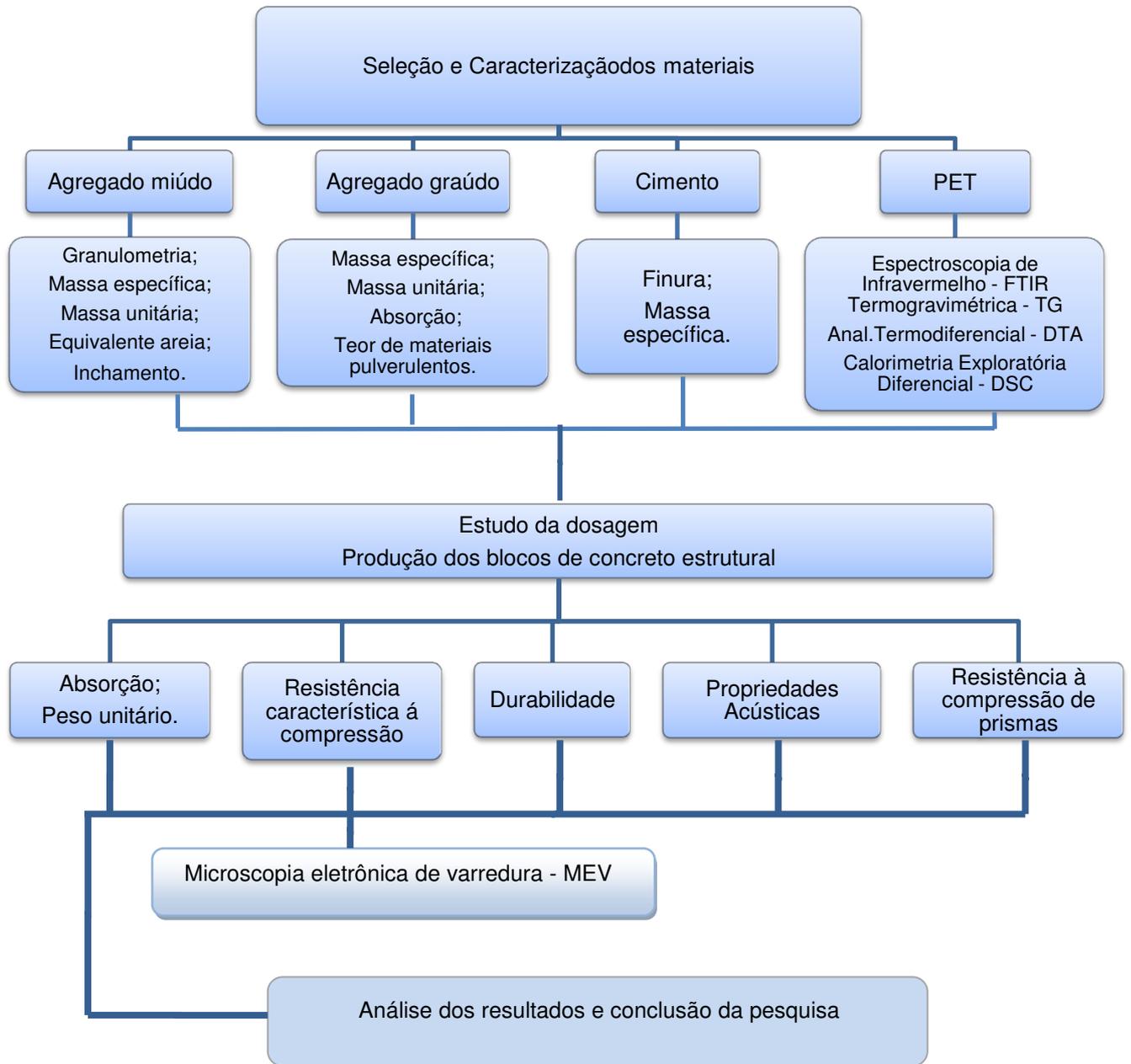
Quinta Etapa – Determinação da durabilidade de blocos de concreto estrutural com substituição parcial do agregado miúdo por PET triturado: Avaliação da resistência à ação de sulfatos e avaliação da resistência à ação da chuva;

Sexta Etapa – Determinação das propriedades acústicas de blocos de concreto estrutural produzidos com substituição do agregado miúdo por PET triturado nos teores de 2,5% e 5,0%;

Sétima Etapa – Determinação da resistência à compressão de prismas produzidos com blocos de concreto estrutural dosados com PET triturado.

Oitava Etapa – Determinação da microestrutura do concreto de referencia e do concreto com substituição do agregado miúdo por PET triturado nos teores de 2,5% e 5,0%

Figura 26: Fluxograma das etapas da pesquisa.



3.1 ETAPAS DA PESQUISA

3.1.1 PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO DE MATERIAIS

Neste subitem são enumerados os critérios e descritos os tipos de materiais utilizados neste trabalho. Os critérios para escolha dos materiais foram baseados nas especificações e normas da ABNT, da ASTM e da AASHTO.

Os materiais utilizados se dividem em três grupos, o primeiro composto materiais granulares (agregados), o segundo de cimento (Portland CPV - ARI) e o terceiro de Politereftalato de etileno (PET) triturado.

3.1.1 Agregados Granulares

3.1.1.1 Agregados Graúdos

O agregado graúdo utilizado na pesquisa para composição de blocos estruturais foi o agregado britado, de origem granítica proveniente da pedreira explorada pela CONTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, situada no município de Pocinhos-PB, e apresentando diâmetro máximo padronizado para brita 0(cascalinho) (Figura 27 a) e o pó de pedra (Figura 27 b).

Figura 27: Agregados graúdos: Brita (0) – cascalinho e pó de pedra

(a)

(b)



3.1.

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi do tipo natural proveniente de jazida do leito do Rio Paraíba (Figura 28).

Figura 28: Agregado miúdo (areia quartzosa).



3.1.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o Portland CPV-ARI, fornecido pela fábrica de cimento Zebu, no município de Santa Rita-PB (Figura 29). A utilização deste cimento deve-se a possibilidade de desmoldagem imediata.

Figura 29: Cimento Portland CPV-ARI.



3.1.3 Politereftalato de etileno

O polímero utilizado foi do tipo triturado, obtido da reciclagem de garrafas PET, classificado como plastômero, e com a denominação de Politereftalato de etileno (PET). Foi adquirido na indústria de DEPET Reciclagem localizada no município de Campina Grande-PB (Figura 30).

Figura 30: Politereftalato de Etileno (a) Indústria PET Reciclagem; (b) PET triturado.



3.1.4 Laboratórios utilizados para realização de ensaios.

Os ensaios utilizados e descritos a seguir, foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP do Departamento de Engenharia Civil (Figura 31a) e no Laboratório de Caracterização dos Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (Figura 31b).

Figura 31: Laboratórios utilizados para realização dos ensaios.



3.1.2 SEGUNDA ETAPA: CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA.

Foram realizados ensaios para determinação das propriedades químicas, físicas e mineralógicas do Politereftalato de etileno, dos agregados e do cimento.

3.1.2.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA DO POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET

Análise Térmica Diferencial (DTA) E Termogravimétrica (TG)

As análises térmicas diferenciais (DTA) e termogravimétricas (TG) de PET foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 300°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado (Figura 32).

Figura 32: Equipamento utilizado para realização de ensaios de análises térmicas.



Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

A análise da pureza por DSC é uma técnica bem consolidada, sendo que a metodologia empregada está descrita na Norma ASTM E 928-03 (“Standard test method for purity by differential scanning calorimetry”).

O método avalia a pureza do composto por meio de uma análise do pico de fusão obtido, aplicando a lei da depreciação do ponto de fusão de Van't Hoff - que prevê a depreciação do ponto de fusão do composto puro devido à presença de impurezas (Figura 33).

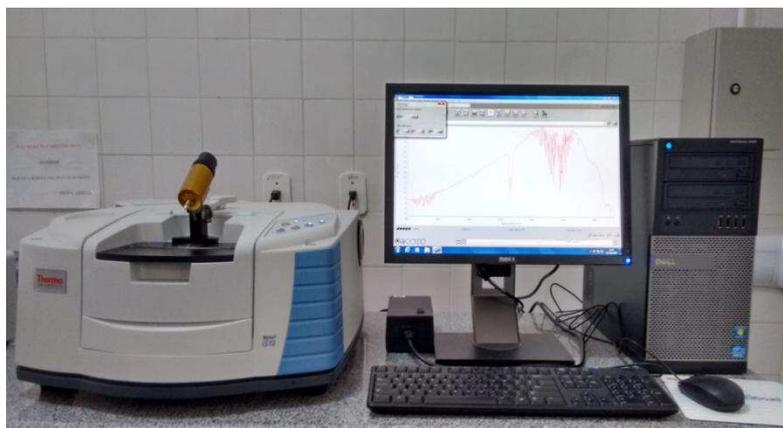
Figura 33: Equipamento utilizado para realização do ensaio de DSC.



Espectroscopia de Infravermelhos com Transformadas de Fourier (FTIR)

É uma técnica usada para se obter espectros de absorção, emissão, fotocondutividade ou de difração de Raman de infravermelhos de um sólido, líquido ou gás. Um espectrômetro FTIR recolhe, simultaneamente, dados de uma vasta gama espectral, o que lhe confere vantagem sobre o espectrômetro dispersivo, que mede a intensidade num intervalo muito estreito de comprimentos de onda em cada medição. A Figura 34 ilustra o equipamento utilizado para realização deste ensaio.

Figura 34: Equipamento FT-ir da Nicolet, modelo iS10, modo ATR.



CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS E DO CIMENTO

A seguir estão descritos os ensaios de caracterização do agregado graúdo, agregado miúdo e do cimento utilizados na pesquisa.

Análise granulométrica

O ensaio de granulometria determina a distribuição percentual dos diferentes tamanhos dos grãos do agregado. É representada pela curva de distribuição granulométrica que mostra o percentual de material passando na peneira em questão versus logaritmo do diâmetro da abertura da peneira.

O ensaio de composição granulométrica para o agregado graúdo e agregado miúdo como para o agregado graúdo foi realizado segundo o método de ensaio da ABNT NBR 7217 (ABNT, 1987).

Determinação da massa específica

A massa específica do agregado é a relação da massa e o seu volume, não considerando os vazios permeáveis da água. Este valor tem importância no cálculo do consumo dos materiais a serem determinados no traço de concreto.

A determinação da massa específica da areia foi realizada por meio do frasco de Chapman (Figura 35), segundo a norma ABNT NBR 9776 (ABNT, 1987). Para o agregado graúdo a determinação da massa específica foi obtida utilizando-se a norma ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2003) e para o cimento, o ensaio foi realizado seguindo a norma DNER – ME 085/1994.

Figura 35: Determinação da massa específica do agregado miúdo - Frasco Chapman.



Determinação da massa unitária

A massa unitária do agregado no estado solto corresponde ao quociente da massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente. Este ensaio tem como objetivo principal verificar a massa unitária do agregado miúdo, incluindo os vazios, e umidade que existem entre os grãos, e determinar sua utilização no traço de concreto. Com essa determinação podem ser feitas transformações dos traços de massa pra volume durante o procedimento de dosagem.

O ensaio foi realizado com o agregado miúdo segundo o método de ensaio ABNT NBR 7251 (ABNT, 1982), conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36: Execução do ensaio de determinação da massa unitária no estado solto.



Determinação do teor de materiais pulverulentos

Os materiais pulverulentos são partículas minerais que passam na peneira de malha de nº 200 com abertura de 75µm, inclusive os materiais solúveis em água, presente nos agregados.

Este ensaio, que tem como objetivo a determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados destinados ao preparo de concreto, foi realizado para o agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR 7219 (ABNT, 1987).

Absorção

É o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de um líquido em seus poros permeáveis, em relação a sua massa no estado seco.

A determinação da absorção dos agregados graúdos foi realizada segundo o método de ensaio ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2003). Dependendo do valor da absorção pode ser feito o reajuste nos cálculos da relação água/cimento dos traços de concreto.

Ensaio de finura

É a determinação da porcentagem, em massa, de cimento Portland cujas dimensões de grãos são superiores a 75 µm através do método de peneiramento manual de acordo com a norma ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012).

É importante se conhecer o valor da finura dos cimentos, pois quando esse valor é elevado, indica que ocorreu hidratação do cimento e conseqüentemente, perda de suas características. Quanto mais fino for o cimento melhor será a sua reação de hidratação e a resistência mecânica da argamassa.

3.1.3 TERCEIRA ETAPA: DOSAGEM DOS MATERIAIS

Escolha da composição granulométrica e determinação da volumetria para obtenção do teor ótimo de Politereftalato de etileno para confecção de blocos estruturais.

A dosagem dos materiais foi realizada de acordo com a metodologia estabelecida pela ABCP – Associação brasileira de Cimento Portland, e, conforme as seguintes etapas: Na primeira etapa foram determinados os traços. Na segunda etapa determinou-se os teores de substituição e idades de controle que seriam utilizados na pesquisa.

3.1.3.1 PRODUÇÃO DO DIAGRAMA DE DOSAGEM

Sobral (1980) apresenta como objetivo principal da dosagem do concreto, encontrar a mistura mais econômica para a obtenção de um concreto com características capazes de atender às condições de serviço, utilizando os materiais disponíveis.

RECENA (2002) define dosagem como:

(...) processo através do qual são escolhidos os materiais, dentre os disponíveis, e determinado o melhor proporcionamento entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter-se um material que atenda a determinados requisitos físicos (...)
(RECENA, 2002, p.16)

Pandolfelli (2009); Coutinho Lira *et al.*, (2015), expõem que não existe uma metodologia consagrada para a dosagem de blocos de concreto, sendo a maioria das técnicas baseadas em recomendações de fabricantes de vibroprensa.

Oliveira (2004); Bezerra *et al.*, (2015), alertam que o concreto para blocos exige algumas precauções na dosagem, entendida como um conjunto de operações para o estabelecimento do traço, considerando tratar-se de um concreto com consistência de terra úmida, e não plástico. Neste último, a pasta

praticamente ocupa todos os espaços deixados pelos agregados, enquanto no concreto para blocos há a presença significativa de ar na mistura. Diante disso, é possível afirmar que o concreto usado para confeccionar blocos não segue o princípio consagrado do concreto plástico, o qual dita que menor quantidade de água aumenta a resistência.

O concreto seco caracteriza-se por ter uma baixa relação água/materiais secos, consistência (*slump zero*), elevada coesão e pelo modo com que o ar aprisionado é retirado, ou seja, através de equipamentos de compactação. (OLIVEIRA, 2004) explica ainda que, devido ao fato de se tratar de um concreto com baixo teor de água, a relação água/cimento não é o fator que determina a porosidade dos blocos, pois quantidades maiores de água melhoram a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos, compactando melhor e aumentando a resistência.

Para a confecção dos blocos de concreto estrutural desta pesquisa foi realizado o estudo de dosagem a partir do método estabelecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, estabelecendo-se a seguinte proporção dos materiais: 1:1,492:0,166:0,166:0,66, conforme apresentado Tabela 20.

3.1.3.2 Definição dos teores de substituição do agregado miúdo por PET triturado

A escolha dos percentuais de PET foi determinada a partir de informações extraídas de pesquisas anteriores acerca do tema e do conhecimento das propriedades do material.

Estipulou-se então quatro teores de substituição de agregado miúdo por PET triturado, conforme apresentado a Tabela 20.

Tabela 20: Teores de substituição de agregado miúdo por Politereftalato de etileno triturado.

CONCRETO	TRAÇOS
Concreto de Referencia	Cimento: ag. miúdo : ag. graúdo : água 1: 1,66:1,66:0,66
Concreto com 2,5% PET	Cimento: PET: ag. miúdo: ag. graúdo:água 1: 0,041: 1,620: 1,660: 0,66
Concreto com 5,0% PET	1: 0,082: 1,575: 1,660: 0,66
Concreto com 7,5% PET	1: 0,124: 1,533: 1,660: 0,66
Concreto com 10% PET	1: 0,166: 1,492: 1,660: 0,66

3.1.3.3 Proporcionalamento dos agregados

A composição dos agregados objetivou a obtenção do menor índice de vazios, obtido através de cálculo teórico baseado no índice de vazios de cada agregado, de acordo com a metodologia de ALVES (2004(a)), visando com isto alcançar maiores massas unitárias, as quais são diretamente proporcionais à resistência à compressão simples. A granulometria da areia tem influencia direta na textura superficial dos blocos, areias finas proporcionam blocos com superfícies mais lisas não necessitando de revestimento, entretanto, o uso de areias finas pode acarretar redução na resistência mecânica dos blocos para um mesmo consumo de cimento.

3.1.3.4 Massa dos blocos de concreto

A massa necessária para moldagem dos blocos e, por conseguinte, a sua compactação, foi determinada a partir da massa específica de blocos recém-moldados em fábrica e o volume interno da forma. Foi determinada a resistência característica (f_{bk}) para os blocos produzidos com a substituição do agregado miúdo por PET nas idades de 3, 7 e 28 dias de controle, sendo estes ensaios realizados na fábrica de pré-moldados INCOPOST Indústria de Pré-moldados, situada na Alça Sudoeste em Campina Grande, PB. Os ensaios foram realizados com 6 repetições, ou seja, foram moldados 6 blocos para cada substituição do agregado miúdo por PET (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%) para

cada idade, sendo considerado como resultado final a média dos resultados encontrados para cada grupo.

3.1.3.5 Moldagem dos blocos de concreto

Foram moldados blocos de concreto estrutural nas dimensões de 14cmx19cmx29cm com substituição do agregado miúdo (areia quartzosa) por PET triturado nos teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%.

A Figura 37 ilustra o processo de moldagem dos blocos de concreto estrutural.

Figura 37: Moldagem dos blocos de concreto estrutural.



3.1.3.6 Idade de Controle

Com o intuito de simular as condições de cura às quais os blocos são submetidos na fábrica de pré-moldados, estes, permaneceram estocados em lotes, isentos do contato com água e agentes químicos.

De acordo com a norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014), a idade de controle dos blocos de concreto podem ser tomadas de duas formas, conforme as seguintes condições:

- i) A idade de controle deve ser a data da entrega dos carregamentos que compuserem o lote, ou seja, o fabricante deve fornecer o comprovante com as características físico-mecânicas atendidas na data da entrega;
- ii) A idade de controle pode ser tomada após a data da entrega e ser o máximo aos 28 dias, contados a partir da data de produção mais recente dos diversos carregamentos que compõem o lote. A aplicação desta condição fica sujeita à aceitação do consumidor.

A Figura 38 ilustra os blocos de concreto estocados em lotes para controle de idade.

Figura 38: Estocagem dos blocos estruturais de concreto para controle de idade.



3.1.4 QUARTA ETAPA – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO ESTRUTURAL DOSADOS COM POLITEREFTALATO DE ETILENO.

Foram realizados ensaios para determinação da absorção e peso unitário. Para determinação das características mecânicas foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples nas idades de controle de 3, 7 e 28 dias.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas segue a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 6136 (ABNT 2014).

3.1.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Absorção por imersão em água

Neste ensaio foi determinado o aumento de massa ocorrido nos blocos de concreto, decorrente da penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa seca, sendo o procedimento descrito pela norma da ABNT NBR 6136 (ABNT 2014). Sendo a água um dos principais agentes de degradação do concreto, os concretos com menores taxas de absorção provavelmente apresentarão maior durabilidade.

A Figura 39 ilustra os blocos estruturais de concreto sendo submetido ao ensaio de absorção.

Figura 39: Determinação da absorção por imersão em água.



3.1.4.2 Peso Unitário dos blocos de concreto

Neste ensaio foi verificado o peso unitário dos blocos de concreto estrutural, onde determinou-se a razão entre a massa e o volume para as substituições do agregado miúdo por PET triturado nos percentuais de 2,5%, 5,0% , 7,5% e 10,0%. Sendo o procedimento descrito pela norma da ABNT NBR 6467(ABNT 2009).

A Figura 40 ilustra os blocos estruturais de concreto sendo submetidos ao ensaio para determinação do peso unitário.

Figura 40: Determinação do peso específico de blocos de concreto.



3.1.4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BLOCOS DE CONCRETO

Resistência à compressão simples

Para a caracterização mecânica dos blocos de concreto estrutural foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples dos blocos f_{bk} , de acordo com a norma ABNT NBR 6136 (ABNT 2014), nas idades de controle de 3, 7 e 28 dias. A Figura 41 ilustra o equipamento utilizado para realização deste ensaio.

Figura 41: Equipamento para ensaio de resistência a compressão simples (f_{bk}). LEP/UFCG.



3.1.5 QUINTA ETAPA – DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À AÇÃO DA CHUVA E AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS

3.1.5.1 Avaliação da resistência à ação da chuva

Este ensaio objetiva simular a ação de chuvas sobre uma superfície plana, sendo feita a compactação do concreto no molde através de prensagem mecânica.

Foi utilizado o Basic Hydrology System, fabricado pela Armfield Corporation, o qual é composto por um conjunto de oito aspersores pelos quais é distribuído um fluxo de água regulável. A área útil disponível para exposição é de 2m² (1m x 2m) e o abastecimento de água feito através de um reservatório e uma bomba de circulação. A água aspergida e não absorvida pelas placas retorna através de canaletas e tubulações para o reservatório, reiniciando o processo. A água utilizada foi proveniente do reservatório de águas pluviais existente no Laboratório de Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária da UFCG. As placas foram dispostas apoiadas em suportes de forma a ficarem inclinadas 30° em relação à horizontal e elevadas 10mm da base para não impedir o escoamento da água.

Visando minimizar os efeitos causados pela diferença de localização dos blocos em relação aos aspersores, as linhas e colunas foram alternadas a cada ciclo. Os quantitativos de vazão e tempo de exposição foram determinados com base nos dados de precipitação média anual na Paraíba e considerando 1 ICD- Índice de Chuva Dirigida, equivalente a 145 l/m²/h, o que corresponde a uma precipitação de 14mm.

Com a finalidade de padronizar os tempos de exposição e, de acordo com dados fornecidos pela AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba foi adotado para o ensaio, 160 minutos de exposição e, para vazão, a média de 17 litros/minutos.

As placas foram submetidas a vinte ciclos de molhagem e secagem em estufa a temperatura de 40°C, tendo cada ciclo duração de 24 horas conforme representado na Figura 42.

Figura 42: Representação esquemática das etapas de cada ciclo de exposição.



FONTE: Adaptado de REZENDE, 2013.

A Figura 43 ilustra as placas de concreto de referência e do concreto com 2,5% e 5,0% de PET triturado submetidos ao ensaio de resistência à ação da chuva.

Figura 43: Placas de concreto de referência e do concreto com teores de 2,5% e 5,0% de PET submetidas ao ensaio de resistência à ação da chuva.



A variação de massa, calculada segundo a Equação 12, foi utilizada como parâmetro para avaliar a resistência à erosão causada pela chuva, sendo os resultados comparados aos encontrados para as placas de referência.

$$V_{ms} = \frac{(m_{si} - m_{sc})}{m_{si}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

V_{ms} – variação de massa seca [%];

m_{si} - massa seca inicial;

m_{sc} – massa seca no ciclo avaliado.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Campina Grande.

3.1.5.2 Avaliação da resistência ao ataque por sulfatos

O ensaio para avaliação da resistência decorrente da exposição à solução de sulfatos foi adaptado da norma NBR 13583 (ABNT, 1996), que prescreve o método para avaliação em barras de argamassa de cimento Portland. Foram mantidas as recomendações quanto ao período de exposição e teor da solução de sulfato de sódio (10%), sendo utilizadas 3 placas de concreto para cada teor de PET utilizado.

A Figura 44 (a e b) ilustra as placas de concreto imersas na solução de sulfato de sódio anidro.

Figura 44: Placas de concreto imersas em solução de sulfato de sódio anidro.



Para realização deste ensaio, foram tomados como amostras, blocos após serem submetidos ao ensaio para determinação da resistência a compressão simples. Estes foram serrados para obtenção de placas com as

dimensões de 8cmx7cmx3cm, as quais foram imersas na solução de sulfato de sódio, conforme norma da ABNT NBR 13583(ABNT, 1996).

Para realização do ensaio, as placas de concreto foram divididas em dois grupos: um grupo foi imerso em solução de sulfato de sódio (10%) e outro em água (23 ± 2)°C, em recipientes plásticos os quais foram vedados com filme de PVC, com o objetivo de evitar a evaporação.

As pesagens foram efetuadas no início do ensaio e a cada sete dias durante seis semanas, ou seja, até 42 dias após a imersão, sendo a variação da massa calculada através da seguinte expressão (Eq. 13).

$$M_{ind} = \frac{M_{idade} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

M_{ind} – Massa individual (%);

$M_{inicial}$ – Média das massas iniciais (mg)

M_{final} – Média das massas finais (mg)

M_{idade} – Média das massas iniciais e finais (mg) efetuadas na idade correspondente.

A massa resultante é a diferença entre a massa das placas imersas em solução de sulfato de sódio e a massa das placas imersas em água.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da universidade Federal de Campina Grande.

3.1.6 SEXTA ETAPA – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DOS BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO SIMPLES INCORPORADOS COM POLITEREFTALATO DE ETILENO TRITURADO

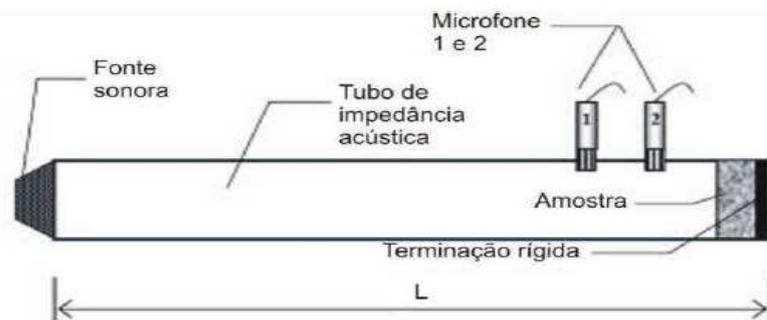
Foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 3cm e espessura de 2,5cm para o concreto de referência e para o concreto com teores de 2,5% e 5,0% de PET triturado. Sequencialmente foram submetidos a

ensaios através de um tubo de impedância, para determinação das propriedades acústicas.

O tubo de impedância (Figura 45) é colocado com um autofalante em uma de suas extremidades. Após a incidência de ondas sonoras dentro do tubo é criado um padrão de onda estacionária. Na outra extremidade do tubo há uma superfície rígida e isolante, e a amostra que se quer analisar é colocada rente a esta extremidade (Gerges, 2000).

As ondas criadas viajam até o fim do tubo, de onde são refletidas pela amostra e se propagam de volta ao autofalante. Essas duas ondas, incidente e refletida, interferem entre si e têm suas propriedades de amplitude e fase de onda afetadas pela absorção da amostra. Medindo as características de frequência das ondas é possível verificar a impedância do material (Umnova, 2013).

Figura 45: Tubo de impedância.



Este ensaio foi realizado no Laboratório de Óptica e Luminescência da Universidade Federal de Santa Maria- RS.

3.1.7 SÉTIMA ETAPA – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS PRODUZIDOS COM CONCRETO INCORPORADO COM POLITEREFTALATO DE ETILENO TRITURADO

A caracterização dos blocos, feita em termos de resistência característica a compressão (fbk), seguiu as especificações da norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014). A determinação do módulo de elasticidade longitudinal dos blocos foi realizada simultaneamente com os ensaios de

prismas. Para tanto, foram instalados transdutores de deslocamento com curso de 10 mm e base de 155 mm nos blocos centrais dos prismas, repetindo esse posicionamento na face oposta do prisma. A opção por este tipo de medição pode ser explicada pela tentativa de eliminar a influência do efeito da restrição da base da prensa e do capeamento utilizado, já que ensaios anteriores realizados pelo laboratório, onde eram utilizadas unidades individuais, indicaram dificuldades na obtenção de resultados satisfatórios. Além disso, o posicionamento dos transdutores no prisma permitiu que o estudo das deformações do bloco fosse feito numa situação semelhante ao seu comportamento na alvenaria.

Os prismas dos ensaios foram moldados utilizando dois blocos assentados a prumo, conforme especifica a Norma Americana ASTM E 447 (1997). A moldagem dos prismas foi feita através de séries de 2 exemplares, sendo cada série diferenciada uma da outra pela variação dos teores de Politereftalato de etileno incorporado ao concreto. Dessa maneira, foram ensaiadas 5 séries de prismas. As formas de assentamento são o assentamento total e o lateral dos blocos. O assentamento total consiste em preencher com argamassa toda a seção transversal do bloco. Para o assentamento lateral o preenchimento é feito apenas nas faces longitudinais da seção transversal do bloco.

Os prismas são submetidos à compressão axial, com velocidade de carregamento constante de 0,001 mm/s. Obtém-se a resistência à compressão axial e deformações do prisma, de seu bloco central e da junta de argamassa. A fissuração nos prismas é observada a 60% da força máxima do ensaio, localizada comumente em ambos os lados bloco intermediário, próximas à região do septo transversal central. Estas fissuras tendem, primeiramente, a se prolongar em direção a um dos blocos da extremidade; em alguns casos observam-se fissuras na região central do septo transversal do bloco central. Com o aumento da força e iminência da ruína, as fissuras do bloco central aumentam sua abertura, e as localizadas no septo transversal expandem-se para os blocos das extremidades. Após o patamar da força máxima, a fissuração é generalizada, intensificando-se na fase de descarregamento do ensaio. Ocorre destacamento das paredes longitudinais dos blocos e, ao fim do

ensaio, é nítida a tendência de separação nos septos transversais, instante em que também é identificado o esmagamento da argamassa da junta.

Quando a argamassa apresenta baixa resistência à compressão, comprando-se com a resistência dos blocos, o modo de ruína dos prismas é alterado, com o esmagamento da argamassa sendo identificado anteriormente à fissuração dos prismas, que surgirá no prenúncio da ruína. A estas formas de ruína associam-se as propriedades mecânicas do concreto e argamassa

Os blocos vazados de concreto, com os quais serão construídos os primas, possuem dimensões de 140 x 190 x 390 mm, com área líquida de 30.663 mm², o que corresponde a aproximadamente 56% de sua área bruta. A espessura das paredes longitudinais e dos septos transversais é de 28 mm, com exceção do septo transversal central que possui 30 mm de espessura.

Os prismas foram montados com a utilização de argamassa com o traço 1: 2(cimento: cal: areia), onde se estabeleceu uma resistência à compressão superior a dos blocos em estudo, visando evitar a obtenção de resultados incorretos.

3.1.8 OITAVA ETAPA – DETERMINAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR TEORES DE 2,5% E 10%

O método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite a observação e a caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos heterogêneos em uma escala micrométrica. O MEV oferece uma imagem ampliada da superfície do material que é muito similar ao esperado se fosse possível na verdade “olhar” esta superfície. Não apenas a informação da topografia do material é produzida como também, informação de sua composição.

As micrografias dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, em equipamento Superscam da SHIMADZU SSX 550 e foram metalizados com ouro.

CAPÍTULO IV

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios de caracterização do Politereftalato de etileno, dos agregados e do cimento, bem como das propriedades mecânicas, térmicas e acústicas de blocos de concreto estrutural obtidos com substituição do agregado miúdo por PET triturado.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização física do agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi a brita de rocha granítica, com dimensão máxima característica de 6,3 mm, também conhecida como “cascalhinho”. Os resultados das caracterizações físicas estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Caracterização física do agregado graúdo.

Ensaio	Valores obtidos
Massa específica do agregado seco (ABNT NBR NM 53:2003)	$\gamma_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ABNT NBR NM 53:2003)	$\gamma_{sss} = 2,64 \text{ g/cm}^3$
Massa específica aparente (ABNT NBR NM 53:2003)	$\gamma_a = 2,67 \text{ g/cm}^3$
Absorção (ABNT NBR NM 53:2003)	$A_{bs} = 0,66\%$

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 21, verifica-se que o agregado graúdo apresentou valor de massa específica igual a $2,67 \text{ g/cm}^3$ e absorção de água de 0,4%. De acordo com BAUER (1995), a massa específica para o agregado graúdo encontra-se na média de $2,7 \text{ g/cm}^3$, portanto o valor obtido nesta pesquisa se aproxima da média. Segundo Chagas Filho (2013), o valor da absorção de agregados de origem granítica é de aproximadamente 0,3.

A distribuição do tamanho dos grãos do agregado graúdo está especificada na Tabela 22.

Tabela 22: Composição granulométrica do agregado graúdo

Composição granulométrica (ABNT NBR 7217:1987)			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem em massa (%)	
		Retida	Acumulada
6,30	2382,00	39,70	39,70
4,80	2604,00	43,40	83,10
2,40	955,20	15,92	99,02
1,20	22,20	0,37	99,39
0,60	6,40	0,11	99,50
0,30	5,11	0,09	99,58
0,15	6,04	0,10	99,68
Fundo	18,54	0,31	99,99
Soma	5999,49	100,00	
Módulo de finura			6,19
Diâmetro máximo			6,30 mm
Módulo de finura (pó de pedra)			4,80
Diâmetro máximo (pó de pedra)			2,83 mm

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 22, observa-se para a composição granulométrica do agregado graúdo, um módulo de finura de 6,19 e diâmetro máximo característico de 6,3 mm, tendo a maior parte do material retido nas peneiras de malha 6,3mm e 4,8mm. De acordo com a norma da ABNT NBR 7211 (ABNT 2009) o agregado graúdo é classificado segundo a sua granulometria, como brita 0, com dimensão máxima característica (DMC) de 6,3 mm, atendendo, portanto, a recomendação da norma da ABNT NBR 6136 (ABNT 2014) de que a dimensão do agregado graúdo não deve exceder a metade da menor dimensão do bloco.

Para o pó de pedra obteve-se um módulo de finura de 4,8 e diâmetro máximo característico de 2,83 mm. Estes valores possibilitam utilizar o pó de pedra com o objetivo de reduzir o índice de vazios existentes entre os grãos do agregado, tornando a estrutura mais compacta e com menos poros.

4.1.2 Caracterização física do agregado miúdo

Para o agregado miúdo foi utilizado areia quartzosa proveniente do leito do Rio Paraíba. Os resultados obtidos no ensaio de granulometria estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Composição granulométrica do agregado miúdo.

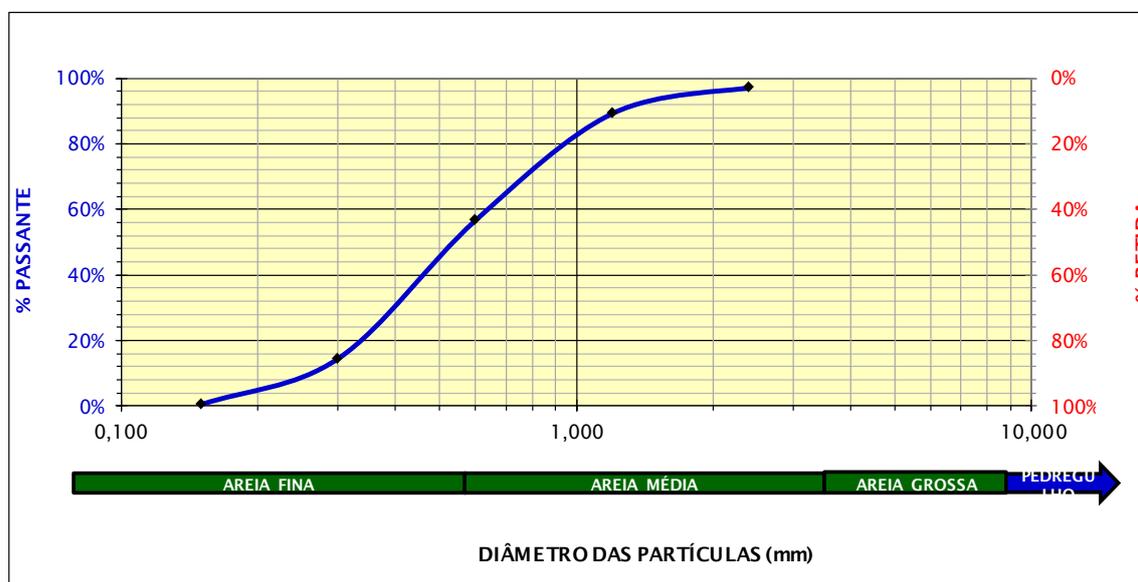
Composição granulométrica (ABNT NBR 7217:1987)			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem em massa (%)	
		Retida	Acumulada
2,4	28,95	2,9	2,9
1,2	79,09	7,91	10,81
0,6	326,32	32,65	43,46
0,3	420,85	42,11	85,56
0,15	140,28	14,04	99,6
Fundo	4	0,4	100
Soma	999,49	100	-
Módulo de finura		2,52	
Diâmetro máximo		2,36 mm	

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se para o módulo de finura o valor de 2,5%, estando dentro da zona ótima de utilização na qual o módulo de finura pode variar de 2,20 a 2,90%. E, portanto, classificado como areia de granulometria média, pois este valor encontra-se dentro do intervalo de $2,4 < MF < 3,2$ de acordo com a norma da ABNT NBR 7211 (ABNT, 1982). O diâmetro máximo obtido para este agregado é 2,36 mm. De acordo com os valores obtidos, essa areia é considerada bem graduada, favorecendo sua utilização em concreto, por promover uma melhor trabalhabilidade e uma pequena quantidade de vazios entre os grãos.

A composição granulométrica do agregado miúdo desempenha papel fundamental na preparação de concretos e argamassas. As dimensões do agregado tem efeito direto sobre os vazios, no fator água/cimento e na trabalhabilidade das misturas de concreto.

A curva granulométrica para o agregado miúdo (areia quartzosa) está ilustrada na Figura 46, e, conforme se observa graficamente, trata-se de uma areia bem graduada.

Figura 46: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Na Tabela 24, estão apresentados os resultados obtidos para caracterização do agregado miúdo, seguindo as prescrições estabelecidas pelas normas da ABNT.

Tabela 24: Caracterização física do agregado miúdo.

Ensaio	Valor obtido
Massa Específica real (ABNT NBR 9776:1987)	2,618 g/cm ³
Massa Unitária no Estado Solto (ABNT NBR 7251:1982)	1,429 g/cm ³
Teor de Materiais Pulverulentos (ABNT NBR 7219:1987)	0,07%

Verifica-se que o resultado obtido para massa específica real foi 2,61g/cm³. Souza (2008) relata que a massa específica real obtido é de aproximadamente 2,60 g/cm³, estando esse valor dentro dos limites sugeridos por Petrucci (1998).

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 24, para massa unitária, verifica-se que o valor encontrado foi 1,429 g/cm³, similar ao valor encontrado por Souza (2008). Este parâmetro é muito importante para o estudo de dosagem do concreto, referindo-se à densidade do agregado com os vazios existentes. Para a determinação da massa unitária, foi realizado o procedimento estabelecido pela norma da ABNT NBR 7251 (ABNT, 1982), adotando todos os cuidados para evitar a segregação das partículas que constituem a amostra.

O teor de materiais pulverulentos encontrado foi 0,07%, sendo muito inferior aos dados da literatura (3,0% a 5,0%), podendo-se afirmar que esta areia apresenta poucos finos, não prejudicando desta forma na quantidade de água a ser utilizada para obtenção da consistência adequada, pois o aumento da quantidade de água intensificaria a retração e diminuiria a resistência de argamassas e concretos.

A presença desses materiais é indesejável na constituição do concreto, já que um alto teor de materiais pulverulentos diminui a aderência do agregado à argamassa e dificulta a reação de hidratação do cimento com os agregados, prejudicando de forma direta a resistência do concreto.

4.1.3 Caracterização física do cimento

A Tabela 25 apresenta os resultados para a massa específica e o índice de finura do cimento.

Tabela 25: Caracterização física do cimento.

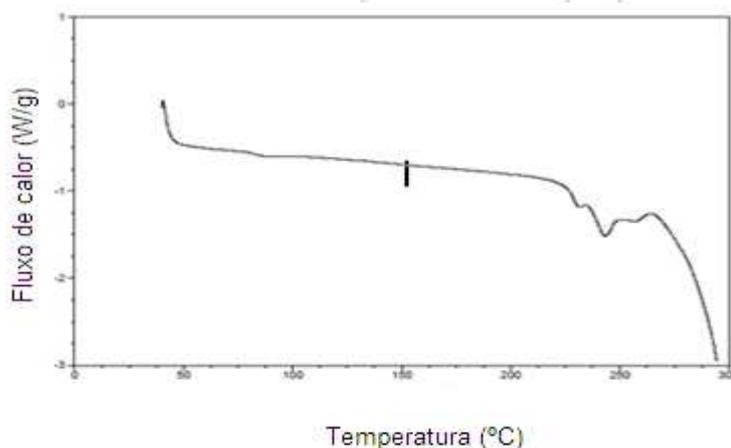
Ensaio	Valor obtido
Massa específica (DNER – ME 085/1994)	3,10 g/cm ³
Finura (ABNT NBR 11579:1991)	1,40%

Analisando-se os resultados da Tabela 25, verifica-se que a massa específica do cimento CP V é de 3,10 g/cm³. O módulo de finura obtido foi igual a 1,40%. Este valor satisfaz ao limite máximo estabelecido pela norma da ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012) que é igual a 12%.

4.1.4 Caracterização do Politereftalato de Etileno – PET triturado

A Figura 47 ilustra as curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o Politereftalato de etileno triturado.

Figura 47: Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o Politereftalato de etileno triturado.

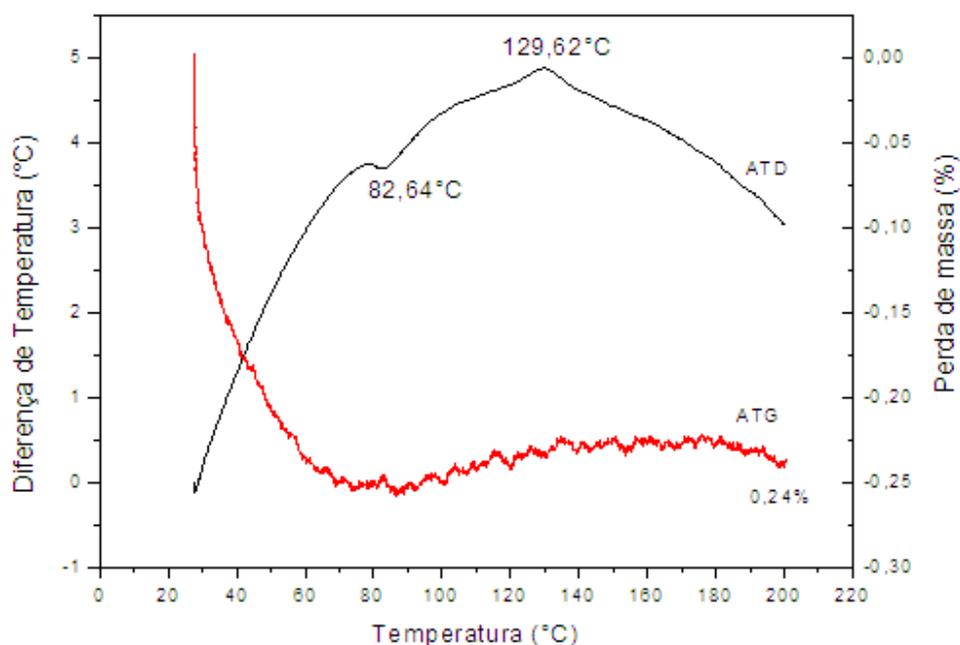


FONTE: Silva, 2015.

De acordo com a Figura 47, observa-se a ocorrência de picos endotérmicos a partir da temperatura de 200°C, indicando a ocorrência de modificações físicas e químicas na composição do Politereftalato de etileno.

A Figura 48 ilustra as curvas de análises termodiferencial e termogravimétrica do Politereftalato de Etileno triturado.

Figura 48: Análise termodiferencial e termogravimétrica do PET triturado.



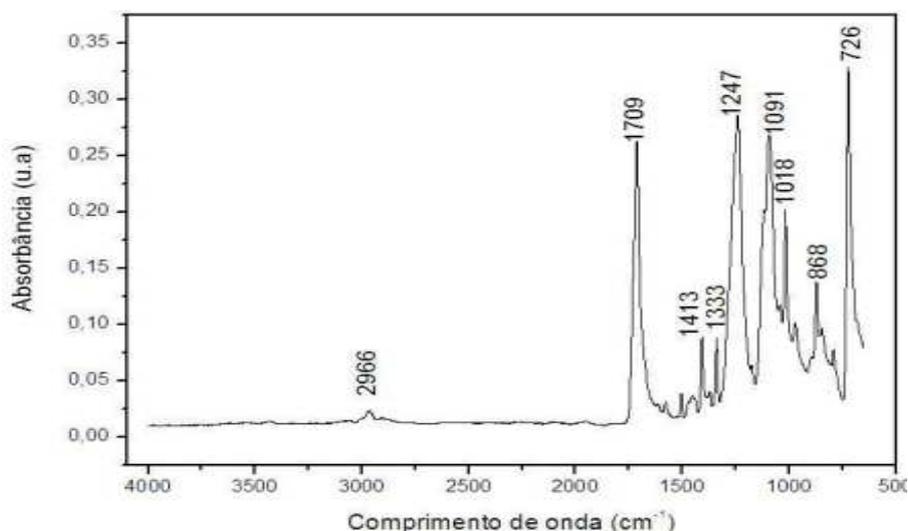
FONTE: Silva (2015).

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que aproximadamente a 82,64°C na ocorrência de um pico endotérmico, indicando a mudança de estado físico do material (sólido para líquido), havendo uma pequena perda de massa. A temperatura de 129,62°C observa-se a ocorrência de um pico exotérmico indicando uma nova mudança de estado físico (líquido para vapor).

De acordo com a curva termogravimétrica, pode-se verificar que houve uma perda de massa total de 0,24%.

A Figura 49 ilustra a espectroscopia de infravermelho do Politereftalato de etileno triturado.

Figura 49: Espectroscopia de infravermelho do Politereftalato de etileno.



FONTE: Silva (2015).

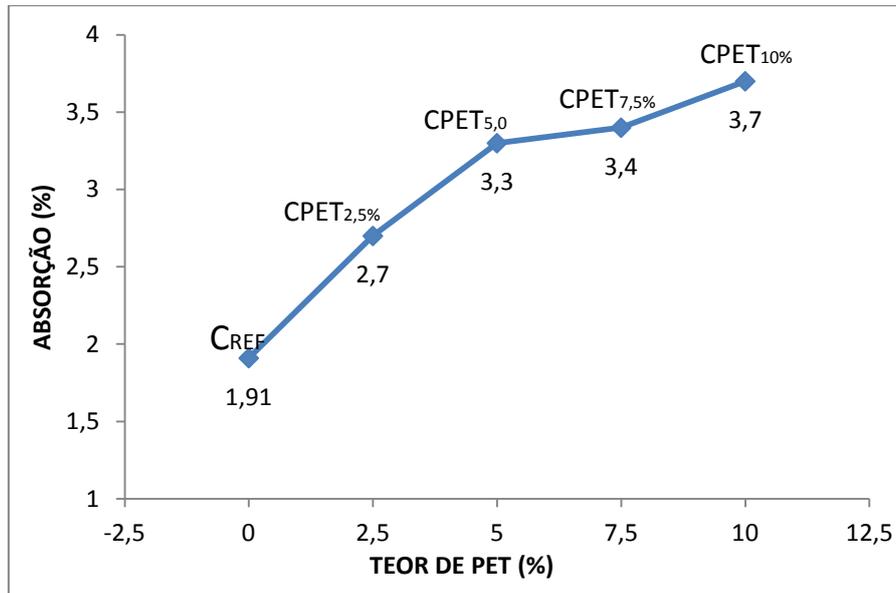
O espectro de infravermelho do Politereftalato de etileno (Figura 49) indica a existência de várias estruturas funcionais típicas existentes na cadeia do Politereftalato de etileno, destacando-se as seguintes bandas características: em aproximadamente 3000cm^{-1} , identificada pela vibração de deformação axial do grupo ($=\text{C}-\text{H}$), presentes em compostos aromáticos (benzeno); em 1709cm^{-1} estiramento $\text{C}=\text{O}$ de ácido carboxílico, indicativo da banda; em 1247cm^{-1} estiramento $\text{C}(\text{O})-\text{O}$ de grupos éster; em 1091 e em 1018cm^{-1} indicativo de estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ e aproximadamente 726cm^{-1} , deformação angular dos carbonos dis-substituídos no anel aromático.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS BLOCOS DE CONCRETO

4.2.1 Determinação da Absorção de água dos blocos de concreto incorporados com Politereftalato de etileno (PET) triturado.

A Figura 50 ilustra a curva de absorção de água para os blocos de concreto (C_{REF} : Concreto de Referência; $\text{CPET}_{2,5\%}$; $\text{CPET}_{5,0\%}$; $\text{CPET}_{7,5\%}$; $\text{CPET}_{10\%}$).

Figura 50: Absorção de água de blocos de concreto.
(C_{REF}: Concreto de Referência; CPET_{2,5%}; CPET_{5,0%}; CPET_{7,5%}; CPET_{10%})



Analisando os resultados apresentados na Figura 50, observa-se que o concreto de referência apresentou absorção de água de 1,91%, enquanto o concreto com adições de PET apresentou resultados superiores, indicando um valor máximo de absorção para adição de 10% de PET.

A substituição do agregado miúdo, por PET triturado promoveu o aumento da absorção de água para todos os teores de PET utilizados. Este fato ocorre devido às características hidrofóbicas do PET, onde a água presente é absorvida pela matriz cimentícia, excedendo a quantidade necessária à sua hidratação, resultando no aumento da porosidade e, conseqüentemente, do percentual de absorção de água.

De acordo com Pandolfelli (2009), as partículas de cimento apresentam uma grande tendência à aglomeração quando entram em contato com um líquido tão polar quanto a água, devido a vários tipos de interação: forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assim, a água em excesso após hidratação do cimento é eliminada gerando a formação de capilares e vazios na estrutura, o que configura uma maior absorção de água.

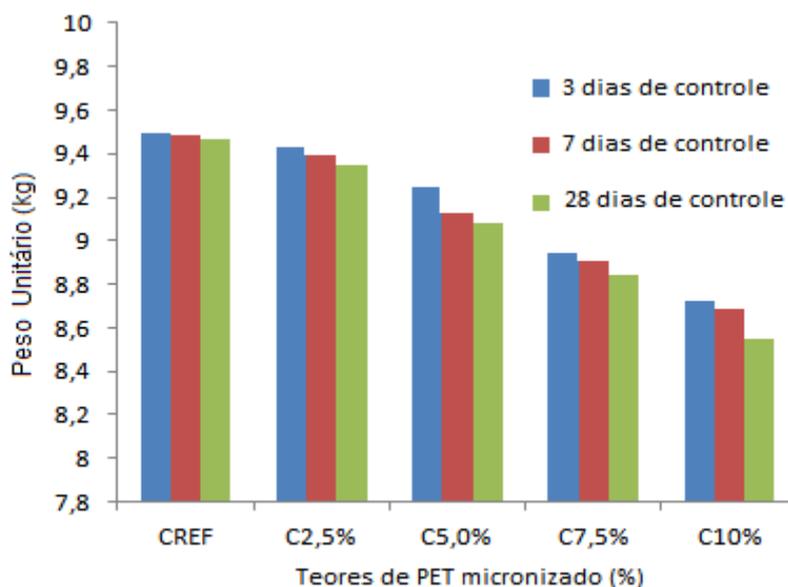
Comparando-se os resultados obtidos para absorção de água dos blocos de concreto estrutural com PET, com os valores estabelecidos pela norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014) verifica-se que estes satisfazem aos requisitos normativos para blocos de concreto estrutural em que se utiliza agregado normal ou leve, cujos valores limites são ($\leq 10,0\%$) e ($\leq 13,0$ (média) e $\leq 16,00$ (individual), respectivamente. E, que apesar de o PET ser hidrofóbico a absorção máxima obtida é bem inferior ao limite máximo exigido pela norma.

4.2.2 Determinação do peso unitário dos blocos de concreto

O peso específico aparente dos materiais depende do grau de adensamento e da compactidade do material, ou seja, da quantidade de vazios existentes entre suas partículas.

No Brasil, ainda é comum a dosagem de concretos e argamassas em volume, nos canteiros de obra, o que torna o peso específico aparente dos agregados uma informação indispensável, para o cálculo dos traços em volume. A Figura 51 ilustra os resultados de peso unitário dos blocos de concreto (C_{REF} : Concreto de Referência; $CPET_{2,5\%}$; $CPET_{5,0\%}$; $CPET_{7,5\%}$; $CPET_{10\%}$).

Figura 51: Peso unitário dos blocos de concreto.
(C_{REF} : Concreto de Referência; $CPET_{2,5\%}$; $CPET_{5,0\%}$; $CPET_{7,5\%}$; $CPET_{10\%}$)



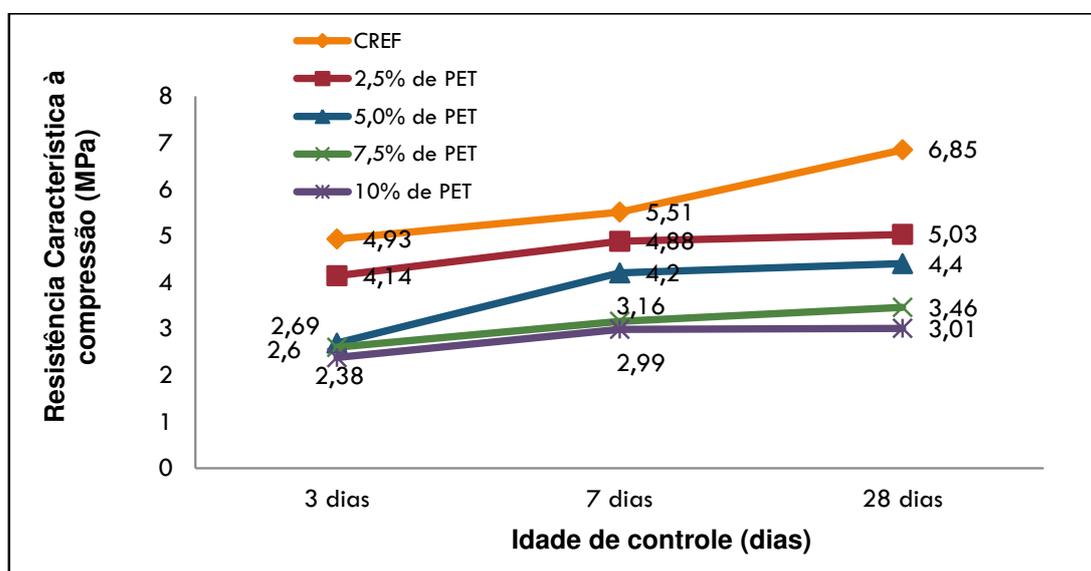
De acordo com a Figura 51, observa-se que o aumento dos percentuais de PET triturado promoveu uma redução no peso unitário dos blocos de concreto estrutural, verificando-se a maior redução para o teor de 10% de substituição do agregado miúdo por PET triturado, onde obteve-se uma redução de aproximadamente 10% do peso aos 28 dias, no entanto, para os demais teores de substituição observou-se uma redução gradual do peso unitário com a crescente substituição do agregado miúdo. Este fato deve-se ao peso específico do PET triturado ser inferior ao do agregado miúdo (areia quartzosa) utilizada na produção dos blocos.

Desta forma, a redução do peso unitário ocasiona melhoria na produtividade devido à facilidade de transporte, e manuseio, reduzindo esforços durante a execução da obra e desta forma reduzindo também o peso da estrutura.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BLOCOS DE CONCRETO

A Figura 52 ilustra os valores de resistência característica à compressão (f_{bk}) dos blocos de concreto de referência e do concreto com substituição do agregado miúdo por 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de PET em função do tempo de cura.

Figura 52: Resistência característica (f_{bk}) de blocos de concreto (C_{REF} : Concreto de Referência; CPET2,5%; CPET5,0%; CPET7,5%; CPET_{10%}).



De acordo com os resultados apresentados na Figura 52, observa-se que a adição do Politereftalato de etileno triturado provocou à redução da resistência característica (f_{bk}) para todos os teores de substituição do agregado miúdo por PET triturado, e para todos os tempos de cura analisados.

Este comportamento deve-se principalmente à menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros, em comparação aos agregados minerais que são mais resistentes mecanicamente, e, à ausência de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, gerando a porosidade residual e, conseqüente, elevação da absorção de água e redução da resistência.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 52, observa-se que a substituição do agregado miúdo por PET triturado nos teores de 2,5% e 5,0% promoveram a redução da resistência quando comparado ao concreto de referência.

Para a substituição do agregado miúdo por 7,5% de PET triturado observou-se uma redução da resistência característica do concreto (f_{bk}) em aproximadamente 46% para todas as idades de controle. Este fato deve-se ao aumento do percentual de substituição do agregado miúdo. Nesta condição, o concreto apresentou absorção de água de 3,4%, justificando que o aumento do volume de PET compromete o processo de hidratação do cimento devido às suas características hidrofóbicas, ocasionando o aumento da porosidade e, conseqüentemente, do percentual de absorção de água, reduzindo a resistência mecânica.

Para o teor de substituição do agregado miúdo por 10% de PET triturado verificou-se uma redução na resistência característica (f_{bk}) do bloco de concreto estrutural em percentuais de 50% a 80% quando comparado com o concreto de referência.

Verificou-se que para todos os percentuais de substituição, os valores de f_{bk} obtidos foram inferiores aos observados para o concreto de referência. Por outro lado, e apesar da redução da resistência característica à compressão com o aumento dos percentuais de substituição do agregado miúdo por PET triturado, a resistência aumentou de maneira análoga à medida que a idade de controle dos blocos de concreto aumentou.

Aquino (2013) em estudo sobre a reciclagem de PET, visando à substituição de agregado miúdo em argamassa, observou que teores de substituição de 30% e 50% provocaram a redução da resistência mecânica em 50%, enquanto teores de substituição de 70% resultaram em valores de resistência mecânicas mínimas que tornaram a substituição desprezível.

Nesta pesquisa, os melhores resultados obtidos foram para o concreto com substituição do agregado miúdo por 2,5% e 5,0% de PET triturado. De acordo com a norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014) os valores encontrados para a resistência característica (f_{bk}) dos blocos de concreto com estes teores de substituição podem ser classificados como blocos estruturais classe B, com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Para a substituição do agregado miúdo por teores de 7,5% e 10% de Politereftalato de etileno triturado, obteve-se resistência característica à compressão aproximadamente 60% inferior aos valores observados para o concreto de referência. Segundo a norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2014) os valores obtidos para resistência característica à compressão (f_{bk}), dos blocos de concreto com estes teores de substituição permitem classificá-los como classe C, com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

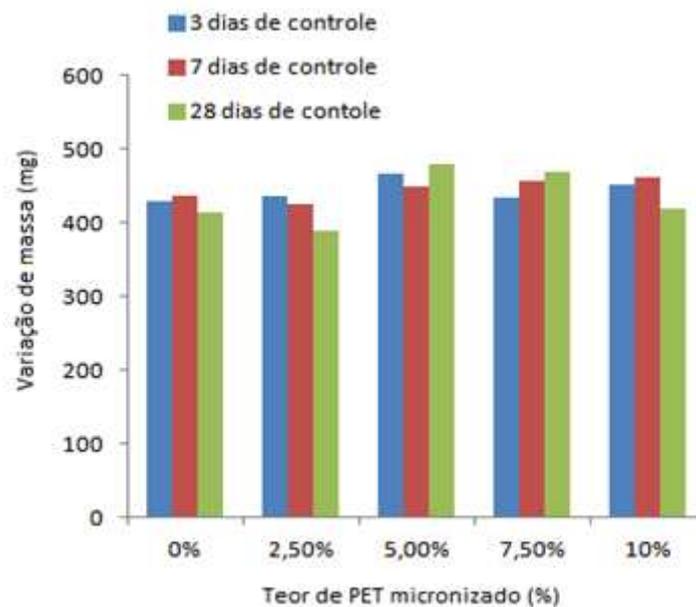
4.4 DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE

4.1.1 Resistência ao ataque por sulfato

Para a realização deste ensaio, os blocos foram serrados para obtenção de placas com as dimensões de 8 cm x 7 cm x 3 cm, as quais foram imersas numa solução de sulfato de sódio, conforme prescreve a norma da ABNT NBR 13583 (ABNT, 1996).

A Figura 53 mostra a variação de massa apresentada pelas placas de concreto com substituição do agregado miúdo por teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de PET triturado.

Figura 53: Variação de massa de placas de concreto após ataque por sulfatos.



De acordo com os resultados apresentados na Figura 53, verifica-se que as placas de concreto produzidas com substituição do agregado miúdo por PET triturado apresentam variação de massa para todos os teores de PET, obtendo-se variações mais evidentes para o teor de 2,5%. Estes resultados estão relacionados às características hidrofóbicas do PET onde possivelmente a solução foi absorvida pela matriz cimentícia não sendo eliminada totalmente da estrutura interna do concreto.

Para o teor de substituição do agregado miúdo por 2,5% de PET triturado, verifica-se uma variação de massa praticamente igual à obtida para o concreto de referência, indicando que este percentual de substituição não interfere na reação de hidratação do cimento, conferindo-lhe resistência a sulfato, característica do cimento CP V.

Para os demais teores de substituição do agregado miúdo por PET triturado, verificou-se uma variação de massa mais acentuada, devido, provavelmente ao volume de partículas de PET triturado terem atuado na pasta de cimento como uma barreira, impedindo que a água proporcionasse a hidratação total do cimento, gerando um concreto com menor resistência ao ataque por sulfatos. A resistência do cimento até os 3 dias, é assegurada pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos; Para 7 dias deve-se

praticamente pelo aumento da hidratação de C_3S ; e, até os 28 dias continua a hidratação do C_3S responsável pelo aumento de resistência, com pequena contribuição do C_2S . Outro fator que pode ter contribuído para ocasionar a maior variação de massa para o teor de 5% de PET triturado é que o empacotamento das partículas de PET podem ter conferido ao concreto a propriedade de aprisionar a solução de sulfato de sódio, gerando um desgaste maior na estrutura, e, conseqüentemente, gerando uma maior perda de massa.

A Figura 54 ilustra a deterioração de placas de concreto após ataque por sulfatos.

Figura 54: Deterioração de placas de concreto devido ao ataque por sulfatos.



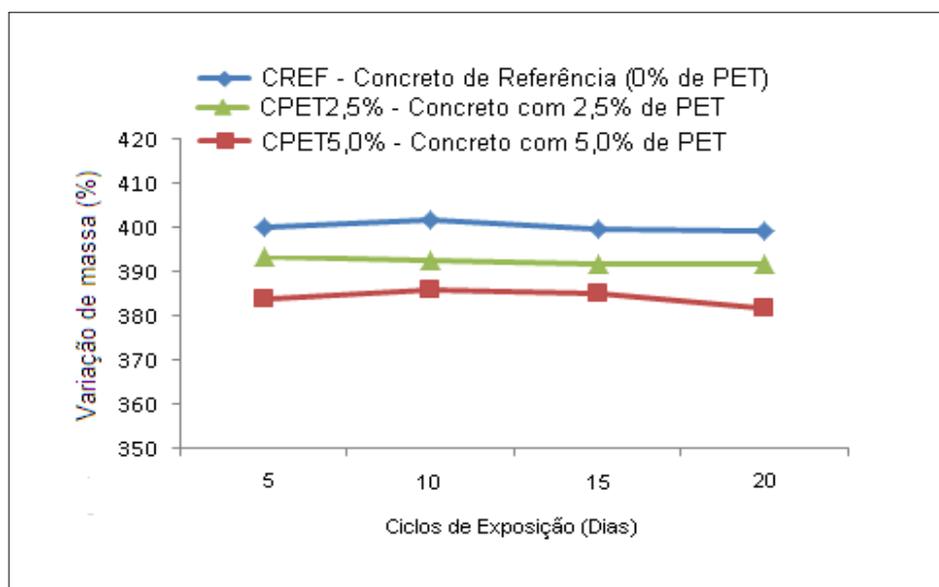
Verifica-se que ao final do ensaio, as placas de concreto apresentaram pequena deterioração localizada nas arestas formadas pela face lateral e na superfície (Fig. 54), devido à intrusão dos sulfatos em duas faces adjacentes.

4.1.2 Resistência à ação da chuva

Para a realização do ensaio de resistência à ação da chuva, foram selecionadas placas de concreto incorporadas com 2,5% e 5,0% de PET triturado, pois, com estes teores de PET foram obtidos os melhores resultados relacionados às propriedades mecânicas.

A Figura 55 ilustra a variação de massa apresentada pelas placas de concreto com 28 dias de cura ,após o ensaio de resistência à ação da chuva

Figura 55: Variação de massa do concreto de referência (CREF) e do concreto com teores de 2,5% e 5,0% de PET triturado após ensaio de resistência a ação da chuva.



De acordo com os resultados apresentados na Figura 55, verifica-se que a perda de massa ocorrida com o concreto de referência foi 0,25%, enquanto que para o concreto com teores de substituição do agregado miúdo por PET triturado nos teores de 2,5% e 5,0%, as perdas de massa foram 2g (0,52%) e 1,6g (0,36%) respectivamente. Observa-se que essa perda intensifica-se após o 15º dia do ciclo. Para períodos anteriores ocorrem mínimas variações de massa.

Observa-se que as placas de concreto produzidas com substituição do agregado miúdo por Politereftalato de etileno apresentam maior suscetibilidade à erosão causada pelos respingos de água dos aspersores do que as placas do concreto de referência.

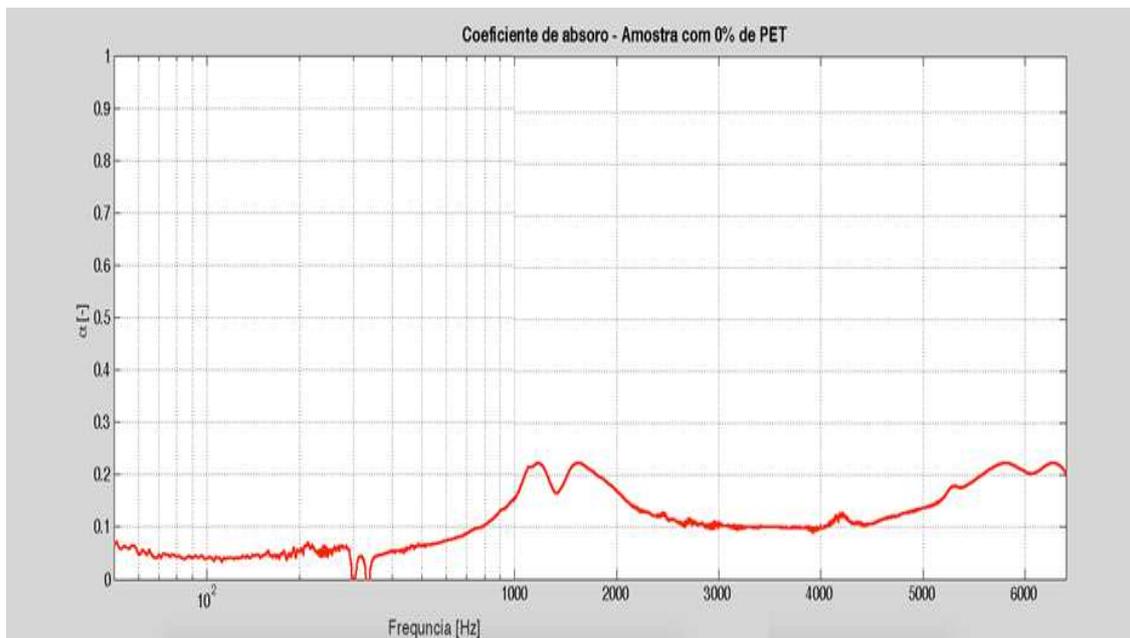
Rezende (2013) obteve resultados semelhantes aos da presente pesquisa para avaliação da durabilidade de concretos incorporados com resíduos de caulim, verificando que quanto maior o teor de substituição, mais intensa é a perda de massa.

De acordo com a norma da ABNT NBR 13554 (ABNT, 2013) estima-se uma perda de massa máxima de 4%. Assim, os valores obtidos para perda de massa de blocos de concreto estrutural incorporado com PET triturado nos teores de 2,5% e 5,0% atende às especificações.

4.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

A Figura 56 ilustra a variação do coeficiente de absorção sonora em função da frequência para a amostra do concreto de referência.

Figura 56: Coeficiente de absorção sonora para amostra do concreto de referencia.



De acordo com os resultados obtidos (Fig. 56), verifica-se que a amostra com 0% de PET (concreto de referencia) apresentou coeficiente de absorção máximo de 0,23, situado entre as frequências de 1kHz e 2kHz. O coeficiente nulo para frequências entre 300Hz e 400Hz. Entre 2kHz e 5kHz, o coeficiente foi da ordem de 0,1, mostrando um leve aumento se comparado às frequências mais baixas. Acima de 5kHz, o coeficiente de absorção tem um ténue aumento, e segue aproximadamente linear até pouco antes dos 12kHz, quando sofre outra queda, chegando a se anular.

A Figura 57 apresenta a variação do coeficiente de absorção sonora para a amostra do concreto do concreto com 2,5% de PET triturado em função da frequência.

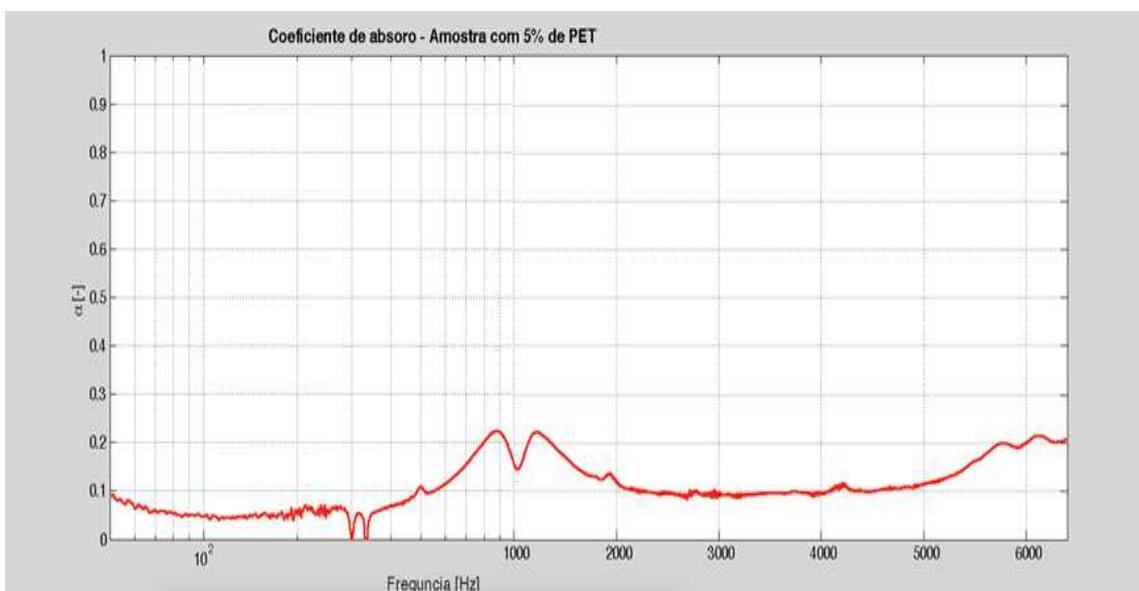
Figura 57: Coeficiente de absorção sonora para amostra com 2,5% de PET triturado.



De acordo com os resultados ilustrados na Figura 57, observa-se que a amostra do concreto com 2,5% de PET triturado, apresentou picos de 0,23 nas frequências de 900Hz e de 1200Hz. Entre 2kHz e 5kHz o coeficiente se mostrou aproximadamente linear, com valor de aproximadamente 0,1. Entre 5kHz e 6kHz há um aumento exponencial, quando os valores do coeficiente de absorção chegam a 0,2. Entre 7kHz e 12kHz o coeficiente se mantém abaixo de 0,1.

A Figura 58 apresenta o coeficiente de absorção sonora para a amostra do concreto do concreto com 5,0% de PET triturado.

Figura 58: Coeficiente de absorção sonora para amostra com 5,0% de PET triturado.



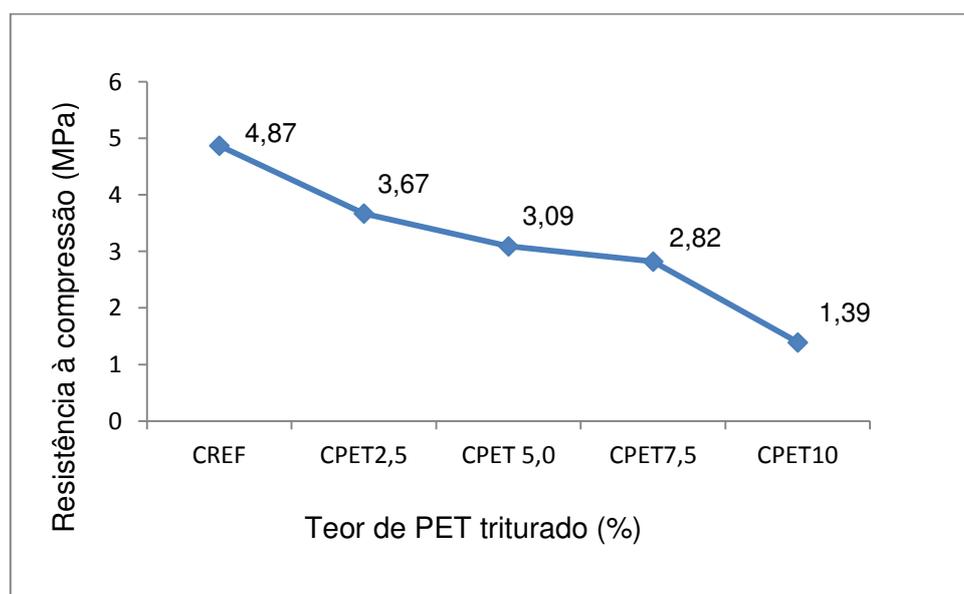
De acordo com os resultados ilustrados na Figura 58 , verifica-se que o coeficiente mínimo dessa amostra foi de aproximadamente 0 nas frequências de 300Hz e 400Hz, 12kHz e 12,4kHz. Entre 2kHz e 5kHz manteve-se aproximadamente linear, no valor de 0,1. O pico foi de 0,22 nas frequências de 900Hz e 1200Hz.

Assim, verifica-se que as amostras analisadas, de uma forma geral, não se apresentaram como um bom material para absorção sonora. As amostras não são porosas ou possuem poros muito pequenos, impossibilitando a incidência das ondas sonoras e, conseqüentemente, não dissipam de forma eficaz a energia sonora que sobre elas incidem.

4.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PRISMAS COM INCORPORAÇÃO DE PET TRITURADO

A Figura 59 ilustra a resistência dos prismas após 28 dias de cura, produzidos com blocos de concreto de referência (0% de PET) e com teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de PET triturado em substituição ao agregado miúdo.

Figura 59: Resistência dos prismas aos 28 dias de cura, produzidos com blocos de concreto de referência (0% de PET) e com teores de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de PET triturado.



De acordo com os resultados obtidos (Fig. 59), verifica-se que houve redução da resistência dos prismas produzidos com substituição do agregado miúdo por PET triturado quando comparado aos resultados obtido para o prisma produzido com blocos sem substituição do agregado miúdo. Este comportamento já era esperado, visto que os blocos produzidos com substituição do agregado miúdo por PET triturado apresentaram redução da resistência quando comparados ao concreto de referência. Este fato deve-se à falta de interação química entre a matriz cimentícia e os grãos de PET, ocasionando um maior volume de vazios e conseqüentemente redução da resistência.

Segundo a norma da ABNT NBR 15961 (ABNT 2011) a resistência à compressão de prismas deve ser aproximadamente 70% da resistência à compressão do bloco, ou seja, pode-se reduzir a resistência do bloco em aproximadamente 30%. A Tabela 26 apresenta o comparativo das resistências obtidas para os blocos de concreto estrutural e para os prismas utilizados neste estudo, para o tempo de cura de 28 dias.

Tabela 26: Comparativo entre a resistência de blocos e prismas.

Concreto	Resistência à compressão dos blocos	Resistência à compressão de prismas	Redução da resistência (%)
CRERF	6,85	4,87	28,9
CPET2,5%	5,03	3,67	27,0
CPET5,0%	4,4	3,09	29,8
CPET7,5%	3,46	2,82	18,5
CPET10%	3,01	1,39	53,8

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 26, constata-se que os primas dosados com 2,5%, 5,0% e 7,5% de PET triturado apresentam resultados de resistência a com pressão que satisfazem os parâmetros normativos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 15961 (ABNT 2011), apresentando redução da resistência à compressão inferior a 30% quando comparado aos valores obtidos para a resistência a compressão dos prismas do concreto de referência.

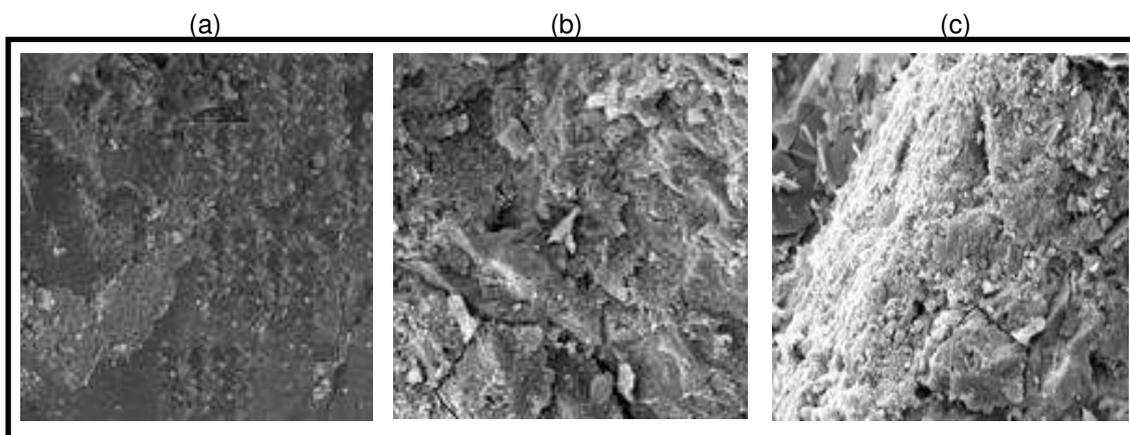
Para os prismas produzidos com blocos de concreto estrutural dosados com 10% de PET triturado, verificou-se que há uma redução da resistência à compressão superior a 30%, não satisfazendo aos parâmetros normativos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 15961 (ABNT 2011).

4.7 MICROESTRUTURA DO CONCRETO

As Figuras 60 (a, b e c), apresentam as micrografias das amostras do concreto de referencia e do concreto com teores de 2,5% e 10% de PET triturado.

Figura 60: Micrografias do concreto com aumento de 5000 vezes.

(a) Concreto de referencia; (b) concreto com teor de 2,5% de PET; (c) concreto com 10% de PET.



De acordo com as micrografias mostradas na Figura 60, observa-se para o concreto de referência (Fig. 60a) uma superfície densa, homogênea, com algumas irregularidades e presença de poucos poros. Para a amostra contendo 2,5% de PET triturado (Fig. 60b), verifica-se uma superfície ligeiramente rugosa e irregular, com partículas dispersas na matriz características do PET triturado que não reagiu com o cimento, cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e, cristais aciculares e agulhas de etringita que são originários da hidratação dos aluminatos (formados por C_3A + gesso), presença de poros e partículas inclusas na matriz que podem ser impurezas. Para o concreto com teor de 10% de PET triturado (Fig. 60c), observa-se

uma superfície bastante heterogênea, com presença de grãos de agregados que não ofereceram uma boa aderência com a pasta de cimento, e grãos de PET triturado dispersos na matriz, o que corrobora o baixo desempenho do concreto dosado com 10% do PET triturado.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Após estudos referentes ao uso do Politereftalato de etileno em substituição ao agregado miúdo em concretos destinados à produção de blocos estruturais, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

Dos teores de PET triturado utilizados nesta pesquisa, o teor mais satisfatório de PET para o mistura foi 2,5%, onde o concreto apresentou os melhores resultados para propriedades mecânicas.

A substituição do agregado miúdo por PET gerou um aumento da absorção de água quando comparado ao concreto de referência, apresentando uma maior absorção para o teor de substituição de 10% de PET. No entanto, os valores obtidos satisfazem aos parâmetros normativos.

O uso do PET triturado em substituição ao agregado miúdo provocou uma redução parcial do peso unitário dos blocos de concreto, com o aumento gradual do teor de substituição.

Com relação à resistência à compressão simples dos blocos estruturais, observou-se que a substituição do agregado miúdo por PET triturado

ocasionou a redução da resistência quando comparado ao concreto de referência. Este comportamento ficou mais evidente quando se elevou o teor de PET na mistura, obtendo-se para o teor de 10% de PET a menor resistência à compressão simples para os blocos estruturais. No entanto, para os demais percentuais de substituição, a resistência obtida permite utilizar os blocos de concreto estrutural para uso acima do nível do solo.

Quanto à durabilidade do concreto produzido com substituição do agregado miúdo por teores de PET triturado, ficou evidenciado que o PET provocou uma variação de massa, tanto para resistência ao ataque por sulfatos, quanto pela ação da chuva, para todos os teores em estudo.

Quanto as propriedades acústicas verificou-se que a substituição do agregado miúdo por PET triturado não promoveu modificações quanto ao comportamento acústico do concreto quando comparado com os resultados obtidos para o concreto de referência.

Os prismas produzidos com blocos com substituição do agregado miúdo nos percentuais de 2,5%, 5,0% e 7,5% por PET apresentaram valores resistência à compressão que satisfazem a os parâmetros normativos.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- ✓ Estudar as propriedades térmicas de blocos de concreto estrutural incorporados com PET triturado;
- ✓ Estudar a durabilidade de blocos de concreto estrutural incorporados com PET triturado utilizando outros tipos de cimento;
- ✓ Fazer um estudo econômico da produção de blocos de concreto estrutural com uso do PET triturado;
- ✓ Realizar ensaios de resistência à compressão e à tração sob temperatura controlada.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

ABDALA, R. A.; SANTOS, D. O. ; PEREIRA, C. S. C.; MACHADO, D. V. L. M.; Agrícola. Curso de Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ – Pós Graduação em Engenharia Civil, 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Cimento Portland de alta resistência inicial. **NBR 5733 EB 2**, 5 p. Rio de Janeiro, 1991.

_____ - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. **NBR 5739**, 9 p. Rio de Janeiro, 2007.

_____ - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. **NBR 6136**, 9p. Rio de Janeiro, 2014.

_____ - Agregados para concreto - Especificação. **NBR 7211**, 9 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____ - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. **NBR 7215**, 8 p. Rio de Janeiro, 1996.

_____ - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. **NBR 7222**, 5p. Rio de Janeiro, 2010.

_____ - Argamassas e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. **NBR 9778**, 4 p. Rio de Janeiro, 2005.

_____ - Cimento Portland – Variação dimensional de barras de argamassas expostas à solução de sulfato de sódio. **NBR 13583**, 12 p. Rio de Janeiro, 1996.

_____ - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo – Método de ensaio. **NBR NM 53**, 8p. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7217**: Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7219**: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7251**: Agregados no estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland Comum – Determinação do módulo de finura. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15961**: Alvenaria estrutural – Blocos de Concreto. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13554**: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2013.

AL-AKHRAS N. M. Durability of metakaolin concrete to sulphate attack. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 1727-1734, 2006.

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; HERNÁNDEZ, M.; MATHEUS, A.; GUTIÉRREZ, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management** , v. 29, n. 10, p. 2707-2716, 2009.

ALVES, J. D. **Blocos de concreto: práticas de dosagem e controle de qualidade**. Goiânia, GO: Editora da UEG, 2004(a).

ALVES, J. D. **Blocos pré-moldados de concreto**. Goiânia: Editora da UEG, 2004(b).

AQUINO, José Lourenço Santos. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de politereftalato de etileno (PET) e de areia de britagem na produção de concretos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 123fls, 2013.

ATKINSON, R. H.; NOLAND, J. L. Investigation into the failure theory for brick masonry in compression. Canadian Masonry Symposium, 3., 1985, Edmonton, Canada. **Proceedings**. 1985. p. 5.1-5.17.

BAUER, L.A.Falcão, **Materiais de Construção**. 5º ed. vol 1 e 2, Ed. LTC, 1995.

BRASIL, Secretaria Nacional de Habitação **Déficit Habitacional no Brasil 2008**. Ministério das Cidades: Brasília, 2011.

BEZERRA, S. Minha Casa, Minha Vida: 1 Milhão de Moradias Construídas. Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2012.

BEZERRA DA SILVA, J.; MENDONÇA, A. M. G. D.; COUTINHO LIRA, Y.; RODRIGUES, J. K. G.; COSTA, D. B. Study of dosage and production of structural blocks in concrete with incorporation of micronized polyethylene terephthalate, **16° NOCMAT- - Construction for Sustainability - Green Materials & Technologies**, 2015.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. About the origins and development of reinforced concrete. *Revista Tecnológica*, v. 17, 2008.

CHAGAS FILHO, M. B. **Estudo de Agregados Lateríticos para Utilização em Concretos Estruturais**. Tese - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

CHAGAS FILHO, CÂNDIDO, TAÍSSA GUEDES; COUTINHO, YANE. Use of Construction and Demolition Waste in Lateritic Concrete. *Key Engineering Materials (Online)*, v. 600, p. 386-395, 2014.

CHOI, Y.W.; MOON, D.J.; KIM, Y.J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction and Building Materials**, v. 23: p. 2829–35, 2009.

CHEN, J., WU, J. “Method for Preparing Polyethylene Terephthalate Succinic Acid Ester Copolymers”, CN101125915, 2008.

CHEEMA, T.S.; KLINGNER, R E. (1986). **Compressive strength of masonry prisms**. *ACI Journal*, vol. 83, n.1, pp. 88–97.

COUTINHO LIRA, Y.; MENDONÇA, A.M.G.D.; CANDIDO, T.G; NASCIMENTO, M.H.A.; COSTA, D.B.; CHAGAS FILHO, M.B.; CHAGAS, R. M. P. Evaluation of

durability of mortars produced with granitic crushed stone and addition of oily waste from the oil e & p industry using AAR, **16° NOCMAT - Construction for Sustainability - Green Materials & Technologies**, 2015.

COLVILLE, J.; WOLDE-TINSAE, A. M. Compressive strenght of a grouted concretemasonry. In: International Brick/Block Masonry Conference, 9., 1991 b. Berlin, Germany. **Proceedings...** Berlin 1991. v. 1, p. 149-156.

DNER – ME 085/1998 – Agregados – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994.

DUARTE, L. T. Produção e Caracterização de Recobrimentos de Poli - (Tereftalato de Etileno) Depositados em Aço por Aspersão Térmica, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação de Engenharia Química - UFMG, pp 42-46, 1997, Belo Horizonte.

DU, P., XUE, B., SONG, Y. “Fracture Surface Characteristics and Impact Properties of Poly(butylene terephthalate)”, *Polymer Bulletin*, v. 64, pp. 185–196, 2010.

FRASSON JR., A.. **Metodologia de dosagem e processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000

FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. Editora Universitária, UFPE, 2007.

FOTI, D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1906–1915, 2011.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de

recauchutagem de pneus. **Acta Scientarum Technology**. Maringá, v. 32, p. 237-244, 2010.

GANESAN, T. P., RAMAMURTHY, K. Behavior of concrete hollow-block masonry prisms under axial compression. *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, July, 1992.

GANDINI, A., COELHO, D., GOMES, M. "Materials from Renewable Resources Based on Furan Monomers and Furan Chemistry: Work in Progress", **Journal of Materials Chemistry**, v. 19, pp. 8656–8664, 2009.

GIONGO, M.; PARADATZ, I. J.; LAMBERTZ, R. Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semiempíricos. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 11, n.1, p. 7-23, jan./mar. 2011.

GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. Durability of concrete – Degradation phenomenon involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 226-246, 2008.

Gomes, n. s. (1983). A resistência das paredes de alvenaria. São Paulo. 190p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

HEATHCOTE, K. A. **An investigation in to the erodibility of earth wall units**. 284 p. Tese (Doctor of Philosophy) – Sydney, Austrália: University of Technology Sydney, 2002.

HILSDORF, H. K. (1965). Untersuchungen uber die grundlagen de mauerwerksfestigkeit. Bericht Nr. 40, Materialprüfungsamt fur das bauweser der Technischen Hochschule , munchen.

IRASSAR, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. **Cement and Concrete Research**. v. 39, n. 3, p. 241-254, 2009.

ISMAIL Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**. v. 28, p. 2041-2047, 2008.

KARAGIANNIDIS, P. G., STERGIOU, A. C., KARAYANNIDIS, G. P., 2008, "Study of Crystallinity and Thermomechanical Analysis of Annealed Poly(ethylene terephthalate) Films", **European Polymer Journal**, v. 44, pp. 1475–1486.

KIM, S.B.; YI, N.H.; KIM, H.Y.; KIM, J.J.; SONG, Y.C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 232–240, 2010.

MADHKHAN, M.; AZIKHANI, R.; HARCHEGANI, M. E. Effects of pozzolans with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. **Construction and Buildings Materials**. v. 26, n. 1, p. 102-112, jan. 2012.

MANCINI, S. D., ZANIN, M., Recyclability Of Pet From Virgin Resin, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Materials Research, Vol. 2,, No. 1, 33-38, 1999.

MARINI, J. Influencia da nanocarga na estruturação, orientação e propriedades de filmes tubulares de nonocompósitos. PA6. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; BURROWS, R. W. Point of view: Building durable structures in the 21st century. **Concrete International**, Michigan, v. 23, n. 3, p. 57-63, Mar. 2011.

MELO, J. W. Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo. Master Dissertation, Rede

Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, UFOP P CETEC – UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MENDONÇA, A.M.G.D; ALMEIDA, S.; COUTINHO LIRA, Y.; RODRIGUES, J. K.G.; BEZERRA DA SILVA J. Study of concrete dosage with use of pet partially replacing fine aggregate, 16° NOCMAT - Construction for Sustainability - Green Materials & Technologies, 2015.

MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R.; MODRO, N.R. ; OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET, *Matéria*, vol.14, n1, Rio de Janeiro , 2009.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de alvenaria de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MOHAMAD, G.; LOURENCO, P.B.; ROMAN, H. R. **Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects**. Cement & Concrete Composites, 29, 2007.

MOHAMAD, G.; ROMAN, H. R.; RIZZATTI, E.; ROMAGNA, R. **Alvenaria Estrutural**. In: ISAIAS, G. C. (Ed.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais*. Ipsis Gráfica e Editora, São Paulo, 2007. Cap. 30. p. 1007 - 1036.

MULLER, M. S. K. (1989). Estudo das correlações entre resistências à compressão de paredes e peirnas de alvenaria estrutural cerâmica não armada submetidas a esforços de compressão axial. São Paulo. 269p. Universidade de São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed., São Paulo: Editora PINI, 1997.

OCHI, T., OKUBO, S., FUKUI, K., "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforced fiber", **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 6, pp. 448-455, February 2007.

ODIAN, G. "**Principles of Polymerization**", 4 Ed. New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2004.

OLIVEIRA, J. A., 2006, "Oligomerização e Policondensação em Estado Fundido do Poli(tereftalato de etileno) – Estudo Experimental e de Modelagem da Curva de Distribuição de Pesos Moleculares", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

PANDOLFELLI, A. L. de Castro, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil, *Cerâmica* 55 (2009) 18-32.

PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J.P. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar, **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1712-1717, 2011.

PETRUCCI, Eladio G.R., **Concreto de Cimento Portland** – 13. Ed. rer./ por Vladimir Antonio Paulon. – São Paulo: globo, 1995.

PRUDENCIO JR, L. R.; OLIVEIRA, A. L., BEDIN, C.A. **Alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Florianópolis, 2003. Editora Grafica Palloti. 208 p.

RABELLO, M.S.; WELLEN, R.M.R., 2008, "Estudo da Cristalização a Frio do Poli (tereftalato de etileno) (PET) para Produção de Embalagens", **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.3, n. 2, pp. 1-9.

RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 1. ed. Porto Alegre: Editora PUC, 2002.

REIS, J. M. L.; CHIANELLI-JUNIOR, R.; CARDOSO, J. L.; MARINHO, F. J. V. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2799-2804, 2011.

REZENDE, MARIA LUIZA DE SOUZA. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola-Construções Rurais e Ambiente), 2013, Campina Grande-PB, 179fls.

RIZZATTI, E. **Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão**. 2003. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

RODRIGUES, L. S.; SÁ DA COSTA, K. J.; VASCONCELOS, R. P.; VIEIRA, R. K.; SÁ, R. J. Utilização do resíduo sólido PET (polietileno tereftalato) na fabricação de blocos de concreto estrutural para pavimentos rígidos. In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008, Porto de Galinhas. **Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008**.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.A.S., DE PAOLI, M.A., 2009, “Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem”, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, pp. 121-132.

SANTOS, F. A. **Efeito do não preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria Estrutural**. 2001. 154f. Tese (Doutorado de Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS, Sandro P.; PINHEIRO, Libânio M; MUZARDO Cassiane D. Estruturas de Concreto, Cap. I, II, 2004.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: a review. **Waste Management**, v. 28, p. 1835–52, 2008.

SOBRAL, Hernani Sávio. Dosagem Experimental dos Concretos. 3ª Ed. São Paulo: **IBRACON** – Instituto Brasileiro do Concreto, 1980.

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz no traço**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB, 2008.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 77-90, jan./mar. 2010.