



Uso de Resíduos de Embalagens PET em Betões

LEONARDO LIBANO CSERNIK MONTEIRO

novembro de 2017

USO DE RESÍDUOS DE EMBALAGENS PET EM BETÕES

LEONARDO LIBANO CSERNIK MONTEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: Maria da Luz Garcia

Co-Orientador: Simão Prizskulnik (Universidade Presbiteriana Mackenzie)

OUTUBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Índice Geral.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Quadros	xix
Abreviaturas.....	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Revisão da Literatura	7
CAPÍTULO 3 Campanha Experimental.....	33
CAPÍTULO 4 Resultados.....	57
CAPÍTULO 5 Considerações Finais.....	79
Referências Bibliográficas	83

RESUMO

A construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais e, por isso, tem o dever de inovar em suas técnicas e ser pioneira na utilização de tecnologias ambientalmente responsáveis.

Dentre as possíveis ações inovadoras, pode-se atuar no emprego de diferentes materiais já transformados em substituição aos recursos naturais. É neste aspecto que esta dissertação se concentra, na reutilização de embalagens PET para produção de compostos cimentícios, oferecendo assim mais uma destinação para este resíduo tão presente nos resíduos sólidos urbanos.

Para o aproveitamento de argamassas ou betões produzidos com resíduos de embalagens PET, é indispensável o estudo de suas características e propriedades. Ao se investigar as dosagens e os impactos nas propriedades físicas e mecânicas, compôs-se assim uma base de informações que permite abriremos um leque de possibilidade de emprego deste composto.

Foram estudadas argamassas e betões fazendo uso de flocos de PET de baixa granulometria como agregado fino, substituindo porções de areia. Em argamassas, foram analisados traços com relação em massa de cimento/agregado 1:2, 1:3 e 1:4. E, para cada uma das relações, impuseram-se taxas de substituição em massa de areia por resíduos de PET de 10% e 20%. Para betões utilizou-se um traço 1:2:3 de cimento, agregado fino e agregado grosso respectivamente e a mesma taxa de substituição em massa de areia por resíduos de PET de 10% e 20%.

Todos os agregados foram caracterizados. As argamassas foram submetidas aos ensaios de índice de consistência, massa volúmica fresca, massa volúmica aparente seca, resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e condutividade térmica. Já os betões foram submetidos aos ensaios de abaixamento do tronco de cone, massa volúmica fresca, resistência à compressão axial e resistência à tração.

Os resultados obtidos convergem para uma diminuição das resistências mecânicas à medida que é aumentada a porção de resíduos de PET empregados. Mesmo com resíduos de baixa granulometria, houve dificuldade de aderência entre o PET e a matriz cimentícia. Apesar disto, o aumento da taxa de substituição se mostrou vantajosa quanto à diminuição da massa volúmica e diminuição da condutividade térmica.

Palavras-chave: betão; betão sustentável; reciclagem; PET; agregados plásticos; condutividade térmica.

ABSTRACT

Civil construction is a large consumer of natural resources, therefore, it has the duty to innovate in its techniques and to be a pioneer in the use of environmentally responsible technologies.

Among the possible innovative actions, we can use different materials that had already been transformed before, as substitutes of natural resources. In this context, this dissertation focuses on the reuse of PET packaging to produce cement compounds, offering, therefore, a further destination for this residue so present in urban solid waste.

For the use of mortars or concrete produced with waste PET packaging, it is indispensable to study its characteristics and properties. When investigating the dosages and the impacts on the physical and mechanical properties, a base of information is made, which allows us to open a range of possibility of use of this compound.

Mortars and concretes were studied using low-grit PET flakes as fine aggregate, replacing portions of sand. In mortars, compositions with 1:2, 1:3 and 1:4 cement/aggregate ratio were analyzed. For each of the fractions, mass substitution rates of sand by PET residues were fixed in 10% and 20%. For concrete with a 1:2:3 composition of cement, fine aggregate and coarse aggregate respectively, was imposed and the same rate of mass substitution of sand by PET residues of 10% and 20%.

All aggregates were characterized. The mortars were submitted to consistency, fresh density, dry bulk density, axial compression, water absorption by capillarity and thermal conductivity tests. The concretes were submitted to slump, fresh density, axial compressive strength and tensile strength tests.

The results obtained converge to a decrease in mechanical strength as the proportion of PET residues used increases. Even with low particle size residues, there was difficulty of adhesion between the PET and the cementitious matrix. Despite this, the increase of the substitution rate, was advantageous in the matter of the reduction of the density and the reduction of the thermal conductivity.

Keywords: concrete; sustainable concrete; recycling; PET; plastic aggregates; thermal conductivity.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Engenheira Maria da Luz Garcia, deixo meu mais sincero agradecimento pela sua infindável paciência e dedicação em me orientar na realização deste trabalho. Diante de incontáveis entraves, sem sua atitude positiva e objetiva eu não seria capaz de alcançar a conclusão desta empreitada.

À contribuição de meu coorientador Dr. Simão Prizskulnik pelo seu imensurável conhecimento que me conduziu de maneira pontual e objetiva aos melhores resultados.

Ao ISEP e ao Mackenzie por viabilizar este acordo de colaboração que permite uma experiência ímpar e enormemente engrandecedora aos seus alunos.

Aos técnicos laboratoriais que me auxiliaram incansavelmente na realização de todos os ensaios.

E por fim, mas não menos importante, meu agradecimento à minha querida Bianca que sempre esteve ao meu lado me motivando e me capacitando a enfrentar todos os obstáculos.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes” Isaac Newton

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Metodologia.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho.....	5
CAPÍTULO 2	Revisão da Literatura.....	7
2.1	Considerações Iniciais.....	7
2.2	Plástico no Resíduo Sólido Urbano.....	7
2.3	Poli(etileno tereftalado) (PET).....	10
2.3.1	Síntese.....	10
2.3.2	Uso e Produção de garrafas.....	13
2.3.3	Reciclagem.....	13
2.4	Uso de PET como agregado fino ou grosso em betões.....	14
2.4.1	Descrição das campanhas.....	15
2.4.2	Origem e Preparação do polímero.....	24
2.4.3	Ensaio e resultados obtidos.....	24
2.5	Conclusão.....	30
CAPÍTULO 3	Campanha Experimental.....	33
3.1	Introdução.....	33
3.2	Métodos.....	33

ÍNDICE DE TEXTO

3.2.1	Provetes	34
3.2.2	Mistura.....	35
3.2.3	Moldagem dos provetes	36
3.2.4	Condições de cura.....	36
3.2.5	Execução dos ensaios	37
3.2.6	Ensaio à argamassa no estado fresco	45
3.2.7	Ensaio à argamassa no estado endurecido	46
3.2.8	Ensaio ao betão no estado fresco	51
3.2.9	Ensaio ao betão no estado endurecido.....	52
3.3	Estudo de Argamassas	53
3.3.1	Composição	54
3.4	Estudo de Betões	54
3.4.1	Composição	55
CAPÍTULO 4	Resultados.....	57
4.1	Caracterização dos Materiais Empregados.....	57
4.1.1	Aglomerante hidráulico	57
4.1.2	Origem e características nominais dos agregados empregados	58
4.1.3	Resultados dos ensaios aos agregados.....	60
4.2	Argamassas	63
4.2.1	Massa volúmica	63
4.2.2	Resistência à compressão axial.....	65
4.2.3	Absorção de água por capilaridade	67
4.2.4	Condutividade térmica	70
4.3	Betões	75
4.3.1	Abaixamento do tronco de cone	75
4.3.2	Massa volúmica fresca.....	76
4.3.3	Resistência à compressão axial.....	77

4.3.4	Resistência à tração	78
CAPÍTULO 5	Considerações Finais	79
5.1	Conclusões	79
5.2	Desenvolvimentos Futuros	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características físicas médias dos Resíduos Urbanos produzidos no Continente. (Agência Portuguesa do Ambiente et al., 2015).....	8
Figura 2.2 – Destino dos Resíduos Urbanos para a região determinada. (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2016, adaptado).....	9
Figura 2.3 - Metas do Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos 2020. (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2016)	9
Figura 2.4 – Esquema da reação de esterificação direta do TPA com o EG. (Soares, 2010).....	11
Figura 2.5 – Esquema da reação de transesterificação do DMT com o EG. (Soares, 2010).....	11
Figura 2.6 - Métodos de síntese do PET (Romão, Spinacé e De Paoli, 2009).....	12
Figura 2.7 - Etapa de policondensação do BHET para obter PET (Soares, 2010).....	12
Figura 2.8 – Símbolo de reciclagem para embalagens PET.....	14
Figura 2.9 - Flocos de PET (Canellas, 2005, p. 53).....	15
Figura 2.10 - Amostra de PET (esquerda) e de PC (direita) (Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010, p. 2313).	15
Figura 2.11 - Três tipos de plásticos utilizados denominados: (a)Pc; (b)Pf; e (c)Pp. (Ferreira, Brito e Saikia, 2012, p.197).	17
Figura 2.12 - Tipos de resíduos de PET utilizados (a) Filme de PET; (b) Areia de PET; (c) <i>Flake</i> de PET (Modro, 2008, p.22).	17
Figura 2.13 - Foto ampliada dos grãos de areia de PET (Almeida <i>et al.</i> , 2004, p.4419)	18
Figura 2.14 - Microfotografia das amostras. (a) Grande; e (b) Pequeno. (Albano <i>et al.</i> , 2009, p.2709). ...	19
Figura 2.15 – Agregado artificial composto por PET e escória de alto-forno (Choi <i>et al.</i> , 2005, p.777).....	20
Figura 2.16 – Detalhamento do agregado artificial (Choi <i>et al.</i> , 2005, p.777, adaptado).....	20
Figura 2.17 - PVC antes (esquerda) e depois (direita) da trituração.(Kou et al., 2009, p.623)	21

Figura 2.18 - Agregado de argila expandida. (a) dimensão nominal de 6mm; e (b) dimensão nominal de 15mm. (Kou <i>et al.</i> , 2009, p.622).....	22
Figura 2.19 - Variação nas medidas de abatimento em função do teor de areia de PET obtido na campanha de Almeida et al. (2004).	25
Figura 2.20 - Diminuição da densidade com o aumento do teor de PET obtido por Almeida <i>et al.</i> (2008, p.4421)	26
Figura 2.21 - Gráfico da resistência à compressão em função do traço em volume obtido por Canellas (2005, p.66).	27
Figura 2.22 - Resistência a compressão de argamassas em ensaio de compressão axial obtido por Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010, p.288).	27
Figura 2.23 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo Areia de PET obtido por Modro (2008, p.54).	28
Figura 2.24 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo Filme de PET obtido por Modro (2008, p.55)	28
Figura 2.25 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo <i>Flake</i> de PET obtido por Modro (2008, p.56)	28
Figura 2.26 - Resultados obtidos por Albano et al. (2009, p.2714) para absorção de água por imersão, aos 28 dias.	29
Figura 2.27 - Reação da fenolftaleína em provetes obtidos na campanha de Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010, p.289).	30
Figura 3.1 - Fluxograma de desenvolvimento da campanha experimental.....	34
Figura 3.2 – Dimensões do provete cilíndrico para argamassas. NBR 7215 (ABNT, 1996)	35
Figura 3.3 - Máquina de agitação mecânica para agregados finos e conjunto de peneiras.....	39
Figura 3.4 - Agregado fino saturado com superfície seca	41
Figura 3.5 - Avaliação do estado de saturação da amostra de agregados finos segundo a NP EN 1097-6 (2016)	41
Figura 3.6 – Argamassa espelhada sobre a mesa para índice de consistência	46
Figura 3.7 – Perfil da variação da temperatura para o método do fio quente (Santos, 2002).	50
Figura 3.8 – Esquema simplificado de montagem do ensaio.	51

Figura 4.1 - Fotografia da amostra de PET utilizada neste estudo. Menor divisão da escala equivale a 1mm. Fonte: O Autor	59
Figura 4.2 - Análise granulométrica dos agregados.....	61
Figura 4.3 - Correlação entre as diferentes massas específicas dos agregados	62
Figura 4.4 - Comparação entre massas volúmicas húmidas dos provetes.	64
Figura 4.5 - Comparação entre massas volúmicas seca dos provetes aos 28 dias de idade.....	65
Figura 4.6 - Resistência à compressão axial das amostras de argamassa.....	66
Figura 4.7 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série A.....	68
Figura 4.8 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série B.....	68
Figura 4.9 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série C.....	69
Figura 4.10 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série A (1:2).....	71
Figura 4.11 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série A (1:1,8:0,2).....	71
Figura 4.12 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série A (1:1,6:0,4).....	71
Figura 4.13 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série B (1:3).....	72
Figura 4.14 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série B (1:2,7:0,3).....	72
Figura 4.15 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série B (1:2,4:0,6).....	72
Figura 4.16 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série C (1:4).....	73
Figura 4.17 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série C (1:3,6:0,4).....	73
Figura 4.18 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série C (1:3,2:0,8).....	73
Figura 4.19 – Comparação entre os valores de condutividade térmica determinados para cada série e para cada taxa de substituição de areia por PET.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.20 – Abaixamento do tronco de cone vs Percentagem de substituição de agregado fino.....76

Figura 4.21 – Massa volúmica fresca vs Percentagem de substituição de agregado fino76

Figura 4.22 – Resistência à compressão axial vs Idade.....77

Figura 4.23 – Resistência à tração vs Percentagem de substituição.....78

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Traço em peso das argamassas estudadas - 1:4 (Canellas, 2005, p. 54).....	15
Quadro 2.2 - Designação e composição das misturas (Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010, p.2314, adaptado).....	16
Quadro 2.3 - Composição das amostras (Ferreira, Brito e Saikia, 2012, p.198, adaptado).	16
Quadro 2.4 - Traços ensaiados. FI: Filme de PET; AR: Areia de PET; e FL: <i>Flake</i> de PET. (Modro, 2008, p.26)	18
Quadro 2.5 - Composição das amostras ensaiadas (Albano <i>et al.</i> , 2009, p.2709).....	19
Quadro 2.6 – Composição e propriedades das amostras frescas contendo PET (Batayneh, Marie e Asi, 2007, p.1874).	20
Quadro 2.7 – Composição em percentagem de peso das amostras ensaiadas (Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu, 2010, p.287).....	21
Quadro 2.8 – Composição das amostras ensaiadas (Kou <i>et al.</i> , 2009, p.623)	22
Quadro 2.9 - Características dos estudos reportados na literatura. (Saikia e Brito, 2012, adaptado)	23
Quadro 2.10 - Resultados dos ensaio de profundidade de carbonatação obtidos na campanha de Silva, Brito, de e Saikia (2013, p.27, adaptado) para cura em câmara húmida.	30
Quadro 2.11 - Propriedades do betão reportados na literatura. (Saikia e Brito, 2012, adaptado)	31
Quadro 3.1 - Abertura das peneiras. NBR NM 248 (ABNT b, 2003).....	37
Quadro 3.2 - Massa mínima da amostra de ensaio - NBR NM 248 (ABNT b, 2003)	38
Quadro 3.3 - Massa mínima da amostra para o método do picnómetro (NP EN 1097-6, 2003).....	40
Quadro 3.4 - Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado NP EN 1097-3 (2002)	43
Quadro 3.5 – Massa mínima da amostra de ensaio NBR 9939 (ABNT, 1987).....	44
Quadro 3.6 - Traço em massa para execução de argamassas.....	54

Quadro 3.7 - Traço em massa para execução de betões	55
Quadro 4.1 - Correlação entre especificações de ensaios físicos e Normas Técnicas Brasileiras em que estão contidas para CP II-Z-32 (Fonte: http://cimento.org/cp-ii-z-32-cimento-portland-composto-com-pozolana/ , adaptado).....	58
Quadro 4.2 - Correlação entre especificações de ensaios químicos e Normas Técnicas Brasileiras em que estão contidas para CP II-Z-32 (Fonte: http://cimento.org/cp-ii-z-32-cimento-portland-composto-com-pozolana/ , adaptado).....	58
Quadro 4.3 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	60
Quadro 4.4 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados	61
Quadro 4.5 - Baridade, volume de vazios e teor de humidade dos agregados	62
Quadro 4.6 – Massa volúmica seca e a variação percentual relativa aos traços de controlo de cada série.	64
Quadro 4.7 – Resistência à compressão axial de argamassas (f_{cm}) [MPa]	65
Quadro 4.8 – Perda percentual de resistência à compressão axial	67
Quadro 4.9 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade de cada traço	69
Quadro 4.10 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica e sua correlação com massa volúmica de cada amostra.....	75
Quadro 5.1 –Comparação qualitativa das variações apresentadas por cada amostra em relação às suas respectivas amostras de controlo.....	81

ABREVIATURAS

- ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET
- APA - Agencia Portuguesa do Ambiente
- APEC - Cooperação Econômica da Ásia e do Pacífico
- BHET - Bis(2-hidroxietileno)
- DMT - Tereftalado de dimetileno
- EG - Etileno Glicol
- EN – Norma Europeia
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- NBR - Norma Técnica Brasileira
- NP - Norma Portuguesa
- PERSU - Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
- PET - (poli)Etileno Tereftalado
- PVC - Policloreto de vinila
- RUB - Resíduos Urbanos Biodegradáveis
- SRGU - Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos
- SSP - Policondensação no Estado Sólido
- TPA - (TA) Ácido Tereftálico
- UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por uma parcela significativa do impacto ambiental gerado pela sociedade. Grandes quantidades dos recursos naturais extraídos e da energia produzida são destinadas para este setor.

A busca pelo desenvolvimento de betão mais “verde” fez-se mais presente a partir dos anos 90 do século XX. O ciclo de vida do betão compreende elevados gastos energéticos em todas as fases. Dentre as primordiais pode-se citar: a preparação da matéria-prima; o consumo de água; a mistura; o transporte do material de elevada massa específica; a betonagem das peças e, por fim, sua demolição após sua vida útil.

Neste contexto, uma das frentes que pode ser explorada é a da diminuição da energia empregada na produção do betão, devido à diminuição do uso de compostos naturais, os quais necessitam de grande emprego de energia para sua extração, transporte e preparação para uso. O uso de resíduos como plástico, resíduos da construção civil, fibras e cinzas têm se mostrado como alternativas que, junto com o aprimoramento da composição, são promissoras na produção de betões mais sustentáveis.

As tentativas de aplicação de materiais alternativos aos tradicionais para a produção de betão, fazem uso das mais variadas técnicas e matérias primas. A incorporação de resíduos plásticos na dosagem está contida nesta linha de desenvolvimento.

O plástico possui muitas frentes de aplicação, coerente ao desenvolvimento da sociedade nos dias de hoje. Devido a sua baixa densidade, facilidade e baixo custo de fabricação, durabilidade e versatilidade. Os materiais plásticos acabam por se mostrar muito viáveis para emprego em diversos ramos industriais.

Justamente pela sua visibilidade, os materiais plásticos têm apresentado um consumo crescente. Como consequência deste aumento de consumo, há um aumento da quantidade de resíduos compostos por estes materiais que devem ser coletados, triados e destinados à reciclagem. Este problema crescente no gerenciamento dos resíduos sólidos gera prejuízos financeiros e ambientais pelo fato de os plásticos serem constituídos por compostos químicos, muitas vezes tóxicos ao meio ambiente, apesar de serem, muitas vezes, de fácil reciclagem.

A análise do comportamento mecânico, químico e a durabilidade do betão composto parcialmente por PET ((poli)Etileno Tereftalado) é foco de muitas pesquisas, principalmente nos últimos anos. De acordo com a granulometria e a forma de preparação do PET, é possível substituir parcelas de agregado miúdo ou de agregado graúdo na tentativa de produção de argamassas, betão leve ou mesmo betão estrutural.

A associação de todas as variáveis conferidas aos agregados, juntamente com a dosagem e a preparação da mistura, possibilita uma vasta gama de betões de características peculiares que, com o desenvolvimento de mais pesquisas, há possibilidade de se tornarem viáveis para utilização em grande escala.

A presente dissertação tem como fundamento o estado atual da literatura sobre o uso de embalagens pós-consumo, compostas por PET, como agente de substituição dos agregados naturais em argamassas e betões de cimento Portland. Para tanto, compreende uma etapa de experimentos para o enriquecimento da literatura e o melhor entendimento dos efeitos causados pela utilização de resíduos de embalagens PET na produção de betões.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor uma composição de betão com consumo significativo de material plástico, proveniente de embalagens PET, que apresente características positivas.

1.1.2 Objetivos específicos

Investigar o estado da arte contendo os assuntos: uso de resíduos de embalagens PET em compostos cimentícios; produção, uso e reciclagem de PET; e a problemática da reciclagem na gestão de resíduos sólidos.

Analisar o comportamento mecânico e físico de provetes de argamassa e de betão sob os efeitos da substituição de agregados naturais por resíduo de PET em diversas proporções.

Identificar os benefícios e prejuízos do emprego de resíduos de embalagens PET em compostos cimentícios.

1.2 JUSTIFICATIVA

As tentativas de aplicação de materiais alternativos aos tradicionais para a produção de betão, fazem uso das mais variadas técnicas e matérias primas. A incorporação de plástico segue esta mesma linha de desenvolvimento. Apesar de o PET ser de fácil reciclagem, o grande volume de material dificulta a completa destinação adequada.

No Brasil, a Associação brasileira da indústria do PET (ABIPET) estima que em 2011 o consumo de PET foi de 572.000t e destas, 57,1% foram destinadas a reciclagem. Apesar de baixo, ainda um bom índice a nível mundial. Mas isso significa que cerca de 245.000t de embalagens PET foram descartadas como lixo comum.

O Brasil ainda sofre de muitos problemas de carácter sociais, sendo a participação nas cooperativas de reciclagem, fonte de subsistência para muitas pessoas. Pode-se compreender a dimensão do problema do lixo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Segundo IBGE (2010), a quantidade diária de resíduos sólidos encaminhados para destinação final em 2008 é de 188.814 toneladas por dia. Deste, apenas 1,4% é destinado para unidades de triagem para reciclagem. A maior parcela, 58,3%, ainda é destinada para aterros sanitários.

O governo brasileiro fomenta ainda em fase preliminar o Programa Nacional de Resíduos Sólidos que propõe dentre as estratégias, a promoção de ações compatíveis com os princípios de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, incentivando a reciclagem materiais, o reaproveitamento e a inclusão social dos catadores (PNRS, 2012).

Em Portugal, existe uma política de gestão de resíduos sólidos mais madura, na qual o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU) 2020 prevê metas ambiciosas no que diz respeito à quantidade e qualidade de resíduos gerados em território português. Segundo Relatório Anual de Resíduos Urbanos de 2014 (Agência Portuguesa do Ambiente *et al.*, 2015), o plástico corresponde à 10,9% de todos os resíduos produzidos. Ainda que a coleta seletiva seja melhor estruturada e eficiente que no Brasil, o relatório demonstra que mais da metade dos SRGU recolhe seletivamente menos de 10% do total de resíduos que produz, sendo considerado um valor preocupante frente às atuais metas nacionais.

É possível concluir que a problemática do plástico se dá principalmente pela questão da sua coleta, valorização e destinação. Dessa forma, com mais campos de aplicação e quanto mais difundido o uso de materiais reciclados, espera-se maior interesse governamental e empresarial para investimento em tecnologias e programas, além da maior conscientização pública quando a separação e destinação adequada dos resíduos plásticos.

O uso de resíduos de embalagens na produção de betão pode ser mais uma destas destinações. O benefício gerado neste caso seria de destinar resíduos sólidos recicláveis e ao mesmo tempo conferir ao betão características que este comumente não tem. Pode-se citar o próprio cimento, usualmente usado para a produção de betão, têm adições como escória de alto forno ou mesmo cinzas pozolânicas, por exemplo, para melhorar o desempenho quanto a características específicas.

1.3 METODOLOGIA

Para o atendimento dos objetivos desta dissertação, os métodos de pesquisa e desenvolvimento experimental foram cuidadosamente analisados e detalhados para que sua validade seja relevante.

Os estudos relacionados ao tema de forma mais próxima tiveram início a partir dos anos 2000. Dada a atualidade do assunto, a pesquisa bibliográfica e as fontes foram obtidas a partir de dissertações e artigos em diversos idiomas e publicados nos últimos anos em volumes físicos e principalmente em versões digitais.

O levantamento do estado da arte compreende o universo que envolve o tema desta dissertação e foi desenvolvido com base na quantidade razoável de publicações que tratam sobre o assunto. Ao tratar de assuntos de caráter político e da problemática ambiental, optou-se por privilegiar os dados portugueses com o intuito de manter a coerência em todo o trabalho.

A campanha experimental foi em sua totalidade realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Presbiteriana Mackenzie. O resíduo de PET foi obtido a partir de uma indústria local, brasileira, de beneficiamento de materiais recicláveis.

Os procedimentos para realização dos ensaios seguiram prioritariamente as recomendações das Normas Portuguesas assim como as documentações normativas e especificações propostas pelo LNEC em suas versões mais atuais. Na impossibilidade de atendimento das regulamentações portuguesas, seja pela incompatibilidade dos equipamentos ou para a manutenção da coerência dos procedimentos e seus resultados, adotou-se então as Normas Técnicas Brasileiras. Em todos os casos, as adoções foram devidamente tratadas de forma a manter a mesma linha de pesquisa e o melhor aproveitamento dos resultados.

O estudo prático se subdividiu em duas etapas, o estudo de argamassas e de betões. Inicialmente o estudo de argamassa foi realizado de forma profunda e abrangente. Em posse dos resultados, propôs-se o estudo de betões, otimizando-se assim a pesquisa e contribuindo para o consumo consciente dos insumos.

Os resultados dos ensaios foram analisados, discutidos e comparados com os resultados obtidos em estudos contidos na revisão da literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação será estruturada em cinco capítulos.

O capítulo 1 contempla a Introdução, que é composta pelos seguintes subitens: Conceituação e caracterização do tema; Objetivos; Justificativa; Metodologia; e Estrutura do Trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre reciclagem, características químicas do PET e sobre o uso de plásticos, em especial, provenientes de garrafas PET, em compostos cimentícios.

O capítulo 3 consiste na apresentação dos ensaios, na descrição dos procedimentos e pormenores dos ensaios a serem realizados.

A apresentação, análise e discussão dos resultados estão contidos no capítulo 4 onde se verifica o atendimento de resultados esperados e, com base no estado da arte levantado e analisa-se a contribuição e a validação da campanha.

O capítulo 5 relata as conclusões gerais decorrentes do desenvolvimento da dissertação e levanta-se as lacunas de conhecimento, não passíveis de serem alcançadas neste trabalho, como propostas de temas de desenvolvimento futuro de forma a complementar a literatura sobre o assunto.

Finalmente, é apresentada a bibliografia que contribuiu para o desenvolvimento da dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A revisão da literatura é fundamentada na investigação, análise e comparação de estudos que tratam da reciclagem de PET e sua utilização na produção de compostos cimentícios. Foram levantadas pesquisas que possam contribuir de forma direta ou indireta para formação de um panorama que compreende a temática desta dissertação.

Para tanto, este capítulo foi dividido de forma que sua primeira parte se foca na presença e efeitos dos plásticos nos resíduos sólidos urbanos. Em seguida, apresenta-se as principais características químicas e que definem o Poli(etileno Tereftalado). E, por fim, a última parte apresenta a produção de betão com a reciclagem de PET, apresenta as campanhas, os ensaios e os principais resultados obtidos.

A revisão da literatura contribui para o entendimento do tema, identificação da problemática de pesquisa, fundamentação do estudo e para a comparação e validação dos resultados obtidos.

2.2 PLÁSTICO NO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Nas últimas décadas, o plástico se tornou insumo principal para a produção de diversos produtos. Segundo (Raynaud *et al.*, 2014), a produção de plástico obteve um aumento global de 8,7% ao ano. Aumentou de 1,7 milhões de toneladas em 1950 para 288 milhões de toneladas em 2012. Dentre estes, devido à sua dureza, baixa massa volúmica, alta maleabilidade e baixo custo de produção, o plástico é a principal matéria prima de embalagens, que correspondem a aproximadamente a metade do volume dos resíduos urbanos na Europa ocidental. Problema que se evidencia quando observado que a taxa de reciclagem de resíduos sólidos urbanos em Portugal é de apenas 30% e destes, 16% de vão para reciclagem e 14% para compostagem. (Direção-Geral do Ambiente da Comissão Europeia, 2017)

O destino final inadequado para o plástico provoca impactos negativos no ambiente, principalmente nos ecossistemas marinhos. De acordo com (Raynaud *et al.*, 2014) estima-se que entre 22% e 43% dos

resíduos plásticos globais são descartados em aterros não controlados. Quando é disposto a céu aberto, os químicos usados em sua fabricação podem vazar e contaminar o solo, água, vegetação, animais e pessoas nas proximidades. Além disso, os resíduos plásticos acabam por atingir cursos d'água e, conseqüentemente, o oceano. Segundo o mesmo documento, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) estimava, em 1975, que 6,4 milhões de toneladas de lixo entravam no oceano a cada ano. Resíduos plásticos no oceano matam e ferem a fauna e a flora. Atualmente, muitos animais são mortos, estrangulados ou intoxicados pela ingestão desse tipo de material. A Cooperação Econômica da Ásia e do Pacífico (APEC) quantifica as perdas para o turismo, indústria da pesca e navegação em cerca de \$1,3 bilhões naquela região.

No cenário português, plásticos correspondem a 10,9% da composição física média dos resíduos urbanos produzidos no continente, de acordo com o Relatório Anual de Resíduos Urbanos de 2014 (Agência Portuguesa do Ambiente *et al.*, 2015) conforme ilustrado na Figura 2.1 seguir:

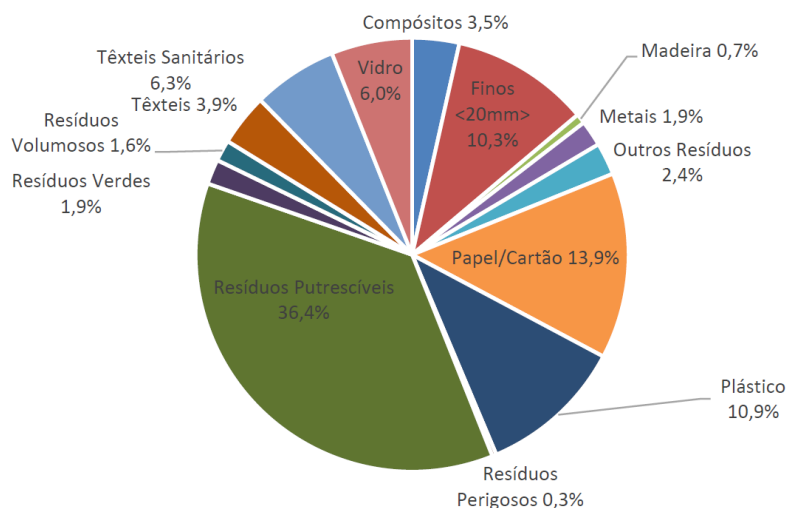


Figura 2.1 – Características físicas médias dos Resíduos Urbanos produzidos no Continente. (Agência Portuguesa do Ambiente *et al.*, 2015).

A partir destes dados, verifica-se uma elevada fração de resíduos recicláveis, cerca de 75%, o que justifica investimento em estrutura que objetive a valorização dos mesmos. Além disso, o aumento na quantidade de plástico promove métodos diferenciados de reciclagem deste material, que promovam o uso do plástico reciclados em outros setores da indústria, tais quais na construção civil.

Segundo publicação da APA (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2016), o destino encaminhado para o RU está representado na Figura 2.2. Estes dados se referem especificamente à região que compreende os municípios de Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde, localizados ao norte de Portugal.



Figura 2.2 – Destino dos Resíduos Urbanos para a região determinada. (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2016, adaptado)

Pode-se observar que o destino mais frequente é a valorização energética (combustão deste material para a geração de energia elétrica). Seguida pela valorização material, valorização orgânica (geração de matéria orgânica para tratamento de solo) e, por último, resíduos destinados a aterro.

Se comparada a meta do PERSU de 2020, Figura 2.3, todos os itens em questão atingiram ou superaram as metas propostas para 2016.

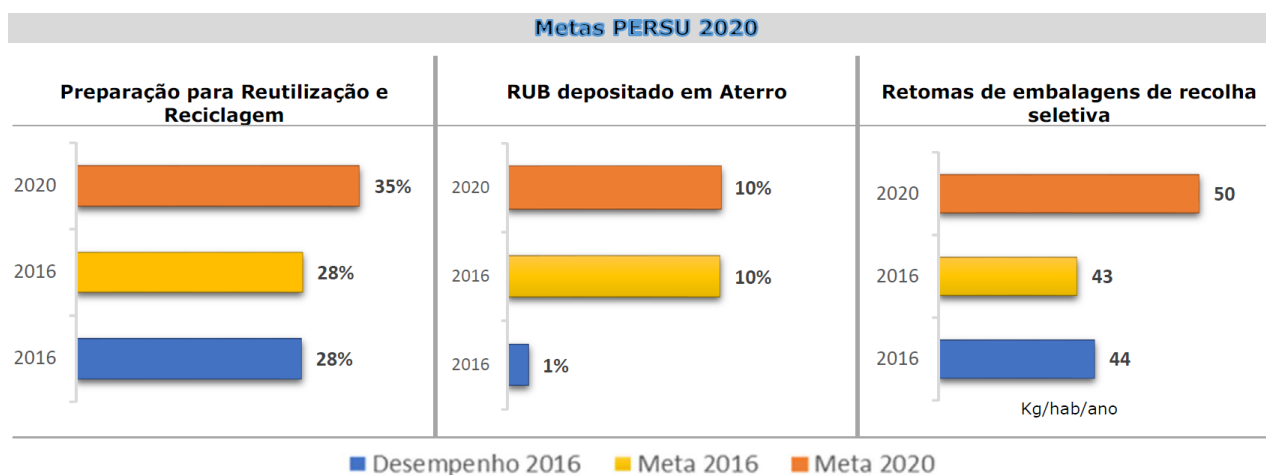


Figura 2.3 - Metas do Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos 2020. (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2016)

Com a interpretação destes dados, pode-se concluir que há grande quantidade de material, dentre eles os plásticos, a serem encaminhado para reciclagem. Isso justifica o investimento em estudos que propiciem a reciclagem de plásticos destinando-os a novos fins, como por exemplo, a construção civil.

2.3 POLI(ETILENO TEREFALADO) (PET)

O poli(etileno Tereftalado) conhecido pela sigla PET é o mais notável poliéster produzido em grande escala. É um polímero termoplástico semi-cristalino que possui características térmicas e mecânicas positivas como: resistência à tração, resistência química, fácil formação de fibras, trabalhabilidade quando derretido e baixa permeabilidade a O₂ e a CO₂ (Karagiannidis, Stergiou e Karayannidis, 2008).

A versatilidade da resina de PET permite muitas aplicações. Seu uso é bastante difundido, principalmente em embalagens, em substituição ao vidro, folhas de flandres ou mesmo ao alumínio. Mas sua maior aplicação é nas indústrias de bebidas para produção de embalagens de bebidas carbonatadas e água mineral (Barão, 2011).

2.3.1 Síntese

O poliéster poli(etileno tereftalado), conhecido como PET, de acordo com as recomendações IUPAC, denomina-se poli(oxiteraftaloíla de oxietileno). A síntese do PET pode ser realizada por dois processos químicos distintos. Um deles é baseado na substância tereftalado de dimetileno (DMT) e outro no ácido tereftálico (TA ou TPA). Inicialmente, a síntese era realizada com base no DMT devido a dificuldades na obtenção do ácido tereftálico com adequado grau de pureza. Atualmente, isto não é mais um problema e ambos os processos são utilizados nas indústrias (O dian, 2004).

Ainda segundo Odian (2004), o processo mais usual é o baseado no ácido tereftálico (TA), que é composto normalmente por três etapas sendo elas:

- Pré-Polimerização: Na etapa de pré-polimerização, o que se busca é a produção do monômero bis(2-hidroxietileno), mais conhecido pela sigla BHET. Este composto pode ser obtido tradicionalmente através de dois processos distintos: a esterificação direta do ácido tereftálico (TPA) com o etileno glicol (EG) ou a transesterificação do tereftalato de dimetila (DMT) com o etileno glicol (EG). Soares (2010) complementa que a rota de esterificação direta se tornou mais atrativa devido ao desenvolvimento de tecnologias mais adequadas à purificação do monômetro TPA, o que pode tornar o método DMT ultrapassado. Nesta, a reação é heterogênea, autocatalítica e é realizada em temperaturas entre 240 a 260 °C, conforme ilustrado pela Figura 2.4 . Na transesterificação, porém, é necessário o uso de catalisadores e temperaturas na faixa de 170 a 210°C. A Figura 2.5 demonstra a rota de transesterificação do DMT (Romão, Spinacé e De Paoli, 2009).

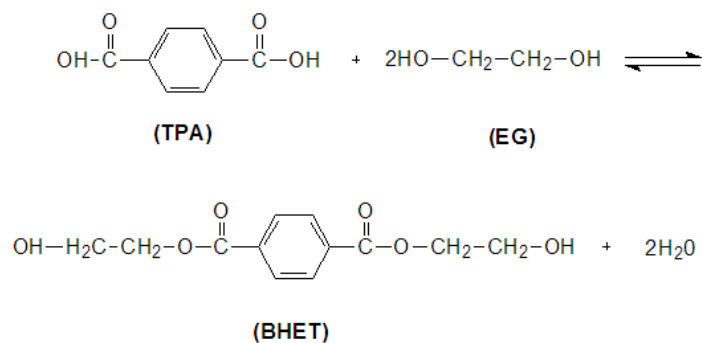


Figura 2.4 – Esquema da reação de esterificação direta do TPA com o EG. (Soares, 2010)

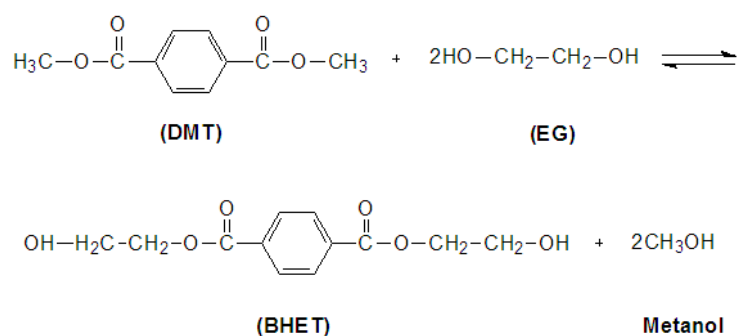


Figura 2.5 – Esquema da reação de transesterificação do DMT com o EG. (Soares, 2010)

- Policondensação: Nesta etapa, o produto da pré-polimerização, o BHET, é gradualmente aquecido a 280°C, conforme representado pela Figura 2.6. Durante o aquecimento, o EG é removido continuamente sob vácuo crescente. Além disso, o catalisador utilizado é usualmente um composto à base de óxido de antimônio, pois apresentam estabilidade química na presença de estabilizantes fosforados, não induzem coloração no produto final e possuem baixo custo. Ao final da policondensação são obtidos polímeros com grau de polimerização por volta de 100 e com massa molar em torno de 33.000 g.mol⁻¹, dado que o aumento da viscosidade do material prejudica a difusão do EG e, portanto, reduz a taxa da reação. A reação é indicada na Figura 2.7. Os polímeros obtidos ao final desta etapa podem ser utilizados para fins que apresentam pouca sollicitação mecânica e propriedades reológicas intermediárias, como na indústria têxtil. Para sollicitações mecânicas mais elevadas e propriedades reológicas mais nobres, deve-se prosseguir com a última etapa de síntese. (O dian, 2004; Romão, Spinacé e De Paoli, 2009)

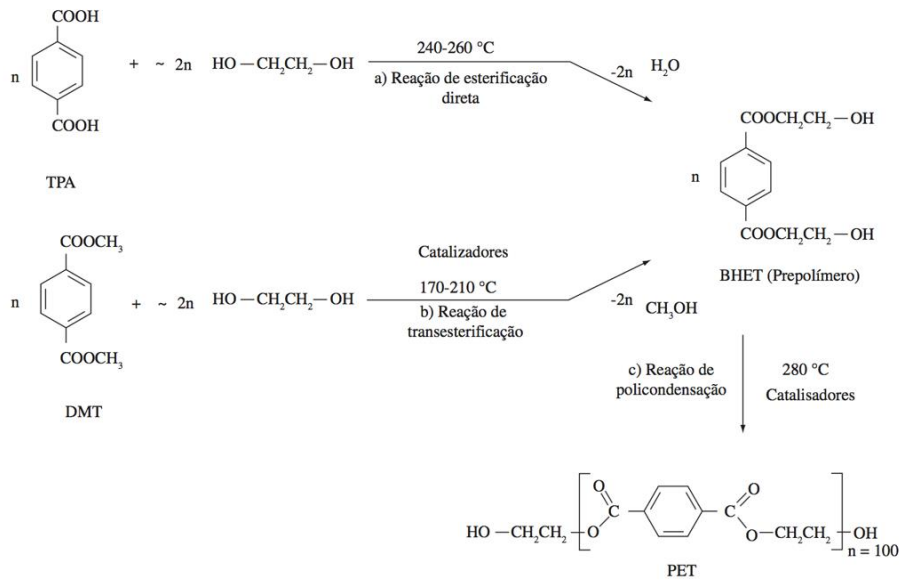


Figura 2.6 - Métodos de síntese do PET (Romão, Spinacé e De Paoli, 2009)

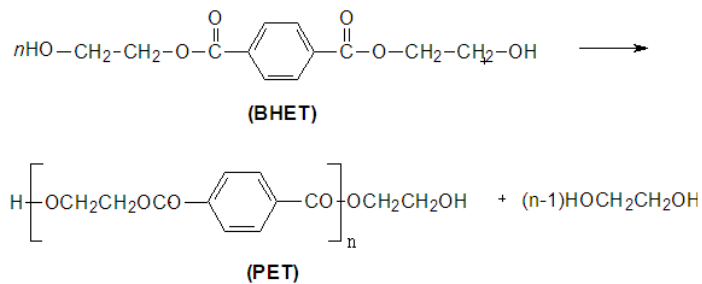


Figura 2.7 - Etapa de policondensação do BHET para obter PET (Soares, 2010)

- **Policondensação no Estado Sólido:** A etapa de policondensação no estado sólido, conhecida pela sigla SSP, é realizada com objetivo de elevar a massa molar do PET para valores maiores que $33.000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, elevando assim o grau de cristalinidade do material, destinado principalmente aos produtos fabricados por injeção-sopro, como garrafas de bebidas. A SSP é realizada numa temperatura maior que a temperatura de transição vítrea e menor que a temperatura de fusão por um período entre 10h e 30h, sob alto vácuo ou com um sistema de atmosfera inerte, e sob agitação constante. (Romão, Spinacé e De Paoli, 2009)

Após a conclusão da síntese do polímero, o material é extrusado e comercializado no mercado industrial no formato de grãos.

2.3.2 Uso e Produção de garrafas

O PET pode ser usado na fabricação de fibras têxteis, filmes e embalagens. Tratando de embalagens, são várias as substâncias que podem estar em contato com estas como por exemplo: óleos, medicamentos, cosméticos, produtos de limpeza, diversas bebidas e água mineral. Devendo assim ser garantida a não contaminação do conteúdo pela embalagem concomitante com a manutenção do conteúdo, principalmente o gasoso, protegido no interior da embalagem. (Pereira, Machado e Silva, 2002)

A fabricação da embalagem passa pelo estágio de pré-forma e finalmente alcança a forma de garrafa. Segundo Prado (2007), a moldagem pode ser feita pelo método da injeção e sopro, que consiste nas seguintes etapas:

- Processo de secagem e plastificação: o PET é levado à temperatura de 150 °C para secar qualquer quantidade de água residual. Ao alcançar aproximadamente 300 °C, ao ser aquecido por resistências, o material passa do estado sólido para um estado pastoso.
- Injeção no molde: o PET pastoso é compactado e passa por um canhão injetor de uma máquina extrusora. Este injetor transfere o material ainda pastoso para um molde aonde ocorre o primeiro resfriamento e chega a temperatura de 90 °C. Após o resfriamento total, tem-se um novo subproduto que também pode ser comercializado neste formato. As pré-formas são semelhantes a tubos de ensaio já com a aba suporte e a rosca de fechamento e definida coloração.
- Moldagem final por sopro: esta etapa pode ser realizada na mesma indústria de produção de pré-formas ou na própria indústria de envase. A pré-forma é inserida no molde final da garrafa, novamente aquecida e pela ação da pressão interna imposta por ar comprimido, é submetida a um estiramento, expandindo-se até alcançar o molde. Ao sair do molde, é finalizado o processo de produção de garrafas PET.

2.3.3 Reciclagem

Com o intuito de facilitar a identificação da composição dos materiais plásticos, em 1988 a *Society of Plastics Industry, Inc.*, uma instituição estadunidense, propôs um sistema de códigos para a identificação das resinas, onde cada tipo de plástico recebe uma numeração específica. Com o crescimento da implementação de programas de reciclagem por todo o mundo, este código passou a ser universal. Apesar de ser regulamentado por cada país, a numeração e definição de cada resina mantem-se a mesma.

Para as embalagens de PET, é designado o número 1 contido em um triângulo normalmente gravado em relevo na própria embalagem (Figura 2.8). Este símbolo indica que o item plástico é reciclável e qual o tipo de resina que o compõe. Desta forma, contribui para que esta embalagem seja destinada à

reciclagem da melhor forma possível, facilitando assim processos trabalhosos e dispendiosos de separação de resíduos de diferentes composições.



Figura 2.8 – Símbolo de reciclagem para embalagens PET

Os plásticos podem pertencer a duas categorias: os termoplásticos e os termofixos. Segundo Pereira, Machado e Silva (2002), quando analisadas as propriedades de solubilidade e fusibilidade, o PET é caracterizado como um termoplástico. Ou seja, não sofre alteração em sua estrutura química quando aquecido até seu ponto de fusão. Desta forma, os termoplásticos possibilitam o ciclo de reciclagem, podendo um material já resfriado ser fundido e moldado novamente.

Segundo a ABIPET (2012) o processo de reciclagem do PET passa por três etapas básicas:

-Recuperação: compreende o descarte, a separação e a embalagem prensada em fardos, configurando-se assim um subproduto comercializável.

-Revalorização: inicia-se com a aquisição dos fardos passando pela classificação, moagem, lavagem, enxague, descontaminação, pré-secagem, secagem, eliminação de pó e embalagem (Prado, 2007). O resultado desta etapa é uma matéria-prima reciclada que permite a produção inúmeros produtos compostos por PET.

-Transformação: conclui o processo de reciclagem com a transformação da matéria-prima reciclada, proveniente de garrafas de PET pós-consumo, em outros produtos de PET reiniciando assim o ciclo.

2.4 USO DE PET COMO AGREGADO FINO OU GROSSO EM BETÕES

Siddique, Khatib e Kaur (2008) em seu estudo sobre o uso de diversos tipos de plásticos reciclados na produção de betão, concluíram que resíduos plásticos conseguem substituir de forma bem-sucedida e efetiva os agregados convencionais. Nesta linha de pesquisa, muitos estudos foram desenvolvidos na tentativa de analisar as características físicas, mecânicas e as possibilidades de substituição de agregados naturais por materiais plásticos.

2.4.1 Descrição das campanhas

Canellas (2005) investigou a reciclagem de PET visando substituição de agregado miúdo em argamassas. Para esse propósito, usou argamassas com uma relação a/c igual a 1 e um traço em peso de 1:4. Substituiu a areia parcialmente nas taxas volumétricas de 10%, 30%, 50% e 70% (Quadro 2.1) por flocos de PET com dimensões entre 1,41 e 2mm (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Flocos de PET (Canellas, 2005, p.

53)

Quadro 2.1 - Traço em peso das argamassas estudadas - 1:4 (Canellas, 2005, p. 54)

Traço	Cimento	Areia	PET	Água
T1- 0%	100	400	0	100
T2 – 10%	100	360	40	100
T3 – 30%	100	280	120	100
T4 – 50%	100	200	200	100
T5 – 70%	100	120	280	100

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) em seu estudo sobre as propriedades físicas e mecânicas de argamassas contendo PET e policarbonato (PC) como agregados (Figura 2.10), optaram por fixar a relação a/c em 0,5 e substituir parcialmente a areia por plástico nas proporções em peso de 3%, 10%, 20% e 50% (Quadro 2.2). As dimensões do agregado polimérico, no caso do PET, foram estabelecidas entre 1,6 e 10mm.



Figura 2.10 - Amostra de PET (esquerda) e de PC (direita) (Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010, p. 2313).

Quadro 2.2 - Designação e composição das misturas (Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010, p.2314, adaptado).

Mistura	M0	M3E	M10E	M20E	M50E
Conteúdo de agregado plástico ^a	0%	3%	10%	20%	50%
Água (kg/m ³)	256,5	256,5	256,5	256,5	256,5
Cimento (kg/m ³)	513	513	513	513	513
Areia (kg/m ³)	1539	1493	1385	1231	769
Agregado Plástico (kg/m ³)	0,0	23,7	78,9	157,7	394,3
A/cm ^b	3,00	2,96	2,85	2,71	2,27
^a Volume de substituição de areia por agregado plástico.					
^b A/cm = relação agregados por cimento em massa.					

Ferreira, Brito e Saikia (2012) estudaram a influência das condições de cura no desempenho mecânico de betão com agregado de plástico reciclado. Para a dosagem, optaram pela fixação do abaixamento em $130 \pm 10\text{mm}$ e a relação a/c permaneceu entre 0,5 e 0,6 em todos ensaios. A dosagem utilizada está apresentada no Quadro 2.3. Combinaram três tipos de agregados poliméricos (PET) (Figura 2.11) com as taxas de substituição (PET/Agregado Natural) de 7,5% e 15% em volume.

Quadro 2.3 - Composição das amostras (Ferreira, Brito e Saikia, 2012, p.198, adaptado).

Misturas de betão	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregado natural (kg/m ³)		Agregado plástico (kg/m ³)			a/c
			Grosso	Fino	Pc	Pf	Pp	
Rc	350	189,0	1003,1	801,0	-	-	-	0,53
C7,5Pc	350	213,5	855,0	750,4	61,4	-	-	0,61
C7,5Pp	350	185,5	1008,3	668,4	-	-	66,9	0,53
C15Pp	350	178,5	1018,6	537,4	-	-	135,1	0,51
C7,5Pf	350	196,0	992,7	660,0	-	64,2	-	0,56
C15Pf	350	210,0	972,1	516,7	-	125,7	-	0,6

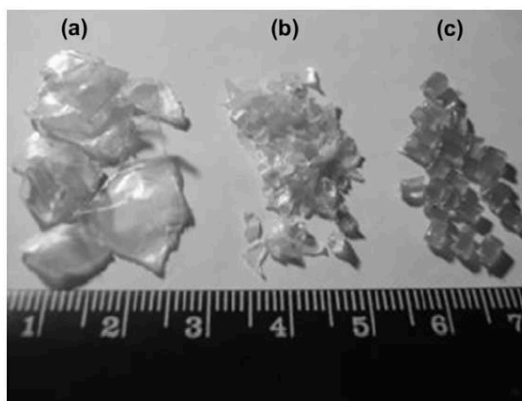


Figura 2.11 - Três tipos de plásticos utilizados denominados: (a)Pc; (b)Pf; e (c)Pp. (Ferreira, Brito e Saikia, 2012, p.197).

Modro (2008) estudou o desenvolvimento e a caracterização de betões de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET. Adotou uma relação a/c fixa de 0,8 assim como empregou a mesma quantidade de aditivo plastificante em todas as amostras (Quadro 2.4). Fez uso de três formas de PET, as quais denominou: filme de PET (partículas com elevado fator de forma e impurezas como poliestireno e alumínio); areia de PET (material passante na peneira com malha 4,8mm, com impurezas como terra, areia, pedrisco e cola); e *flake* de PET (material passante em uma peneira de 5mm e com formato de laminado) conforme Figura 2.12.

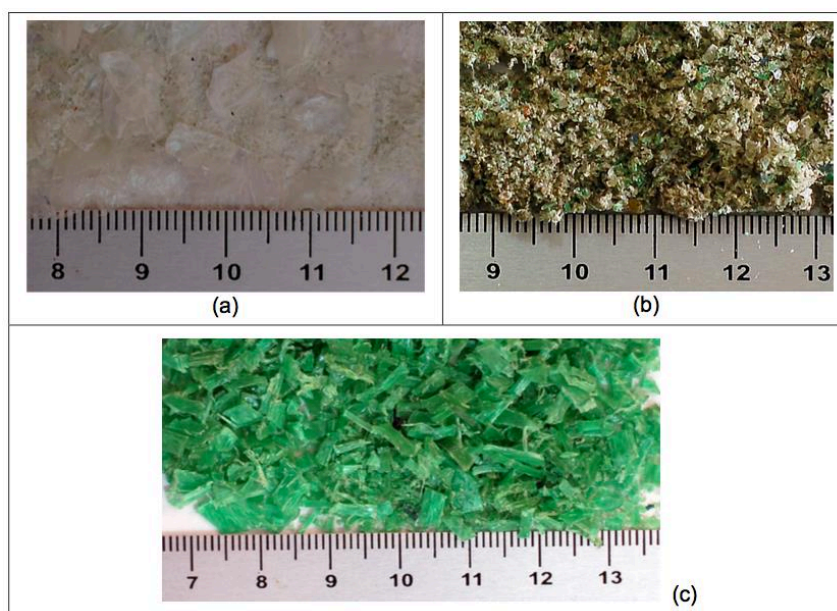


Figura 2.12 - Tipos de resíduos de PET utilizados (a) Filme de PET; (b) Areia de PET; (c) *Flake* de PET (Modro, 2008, p.22).

Quadro 2.4 - Traços ensaiados. FI: Filme de PET; AR: Areia de PET; e FL: Flake de PET. (Modro, 2008, p.26)

Traço	Cimento	Pó de pedra	Areia média	Pedrisco	Areia fina	Água	Aditivo	PET
Padrão	1,000	2,000	2,000	0,500	0,500	0,800	0,010	0,000
FI - 01	1,000	1,980	1,980	0,495	0,495	0,800	0,010	0,026
FI - 02	1,000	1,960	1,960	0,490	0,490	0,800	0,010	0,052
FI - 03	1,000	1,940	1,940	0,485	0,485	0,800	0,010	0,079
FI - 04	1,000	1,920	1,920	0,480	0,480	0,800	0,010	0,105
AR - 10	1,000	1,800	1,800	0,450	0,450	0,800	0,010	0,262
AR - 20	1,000	1,600	1,600	0,400	0,400	0,800	0,010	0,524
AR - 30	1,000	1,400	1,400	0,350	0,350	0,800	0,010	0,786
AR - 40	1,000	1,300	1,300	0,300	0,300	0,800	0,010	1,048
FL - 10	1,000	1,800	1,800	0,450	0,450	0,800	0,010	0,262
FL - 20	1,000	1,600	1,600	0,400	0,400	0,800	0,010	0,524
FL - 30	1,000	1,400	1,400	0,350	0,350	0,800	0,010	0,786
FL - 40	1,000	1,200	1,200	0,300	0,300	0,800	0,010	1,048

Almeida et al. (2004) avaliou o potencial de uso de areia de PET em substituição à areia natural. Fizeram uso de partículas de PET com dimensão máxima característica de 2,4mm (Figura 2.13). Fixaram um traço em peso padrão e substituíram a areia natural nas taxas de 25%, 50%, 75% e 100% em volume.



Figura 2.13 - Foto ampliada dos grãos de areia de PET (Almeida et al., 2004, p.4419)

Albano et al. (2009) por sua vez, estudaram a influência do conteúdo e da dimensão das partículas de PET no comportamento de betões com duas relações a/c diferentes (0,5 e 0,6). Substituíram a areia por resíduos de garrafas PET nas taxas de 10% e 20% (Quadro 2.5). Fizeram uso de agregados plásticos de

dimensões médias de 11,4mm e 2,6mm (amostras (a) e (b) da Figura 2.14, respetivamente) aplicados em ensaios individualmente e numa composição 50/50.

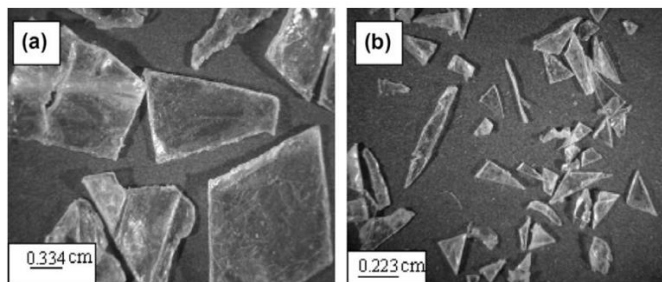


Figura 2.14 - Microfotografia das amostras. (a) Grande; e (b) Pequeno. (Albano *et al.*, 2009, p.2709).

Quadro 2.5 - Composição das amostras ensaiadas (Albano *et al.*, 2009, p.2709).

Componentes	Quantidade (kg)					
	a/c = 0,6			a/c 0,5		
	0%PET	10%PET	20%PET	0%PET	10%PET	20%PET
Cimento	19,10	19,10	19,10	24,10	24,10	24,10
Água	9,4	9,70	9,90	10,20	10,40	10,60
Areia	68,60	61,80	54,90	64,90	58,40	51,90
Pedra	43,60	43,60	43,60	41,20	41,20	41,20
PET	-	3,60	7,30	-	3,40	6,90

Batayneh, Marie e Asi (2007) estudaram sobre o uso de betão demolido, vidro e plástico aplicados a composição de novos betões. Fizeram uso de PET e incorporaram esse plástico em misturas com relação a/c igual a 0,56. O traço em peso impôs mesma quantidade de agregado graúdo e a substituição do agregado miúdo fez-se nas taxas de 5%, 10%, 15% e 20% (Quadro 2.6). O plástico utilizado como agregado miúdo possuía dimensões entre 0,15 e 4,75mm.

Quadro 2.6 – Composição e propriedades das amostras frescas contendo PET (Batayneh, Marie e Asi, 2007, p.1874).

Plástico [%]	Proporção de mistura (kg/m ³ de betão)					a/c (nominal)	Abatimento [mm]	Massa específica [kg/m ³]
	Água	Cimento	Agregado Grosso	Agregado Fino	Plástico			
0	252	446	961	585	0	0,56	78	2320
5	252	446	961	555,7	17,8	0,56	73	2307
10	252	446	961	526,5	35,5	0,56	69	2856
15	252	446	961	497,2	53,2	0,56	63	2693
20	252	446	961	468,0	71,0	0,56	57	2495

Choi et al. (2005) focaram seu estudo nos efeitos do uso dos subprodutos de garrafas PET e sua interação com a adição de escória granulada de alto-forno nas propriedades do betão. O PET foi envolto pela escória de alto-forno como apresentado na Figura 2.16. O agregado artificial resultante pode ser observado na Figura 2.15. Dosaram misturas de betão com relação a/c de 0,45, 0,49 e 0,53. Substituíram o agregado miúdo em proporções volumétricas de 25%, 50% e 75% e mantiveram o teor de ar incorporado em $4,5 \pm 1\%$. O plástico utilizado possuía uma granulometria compreendida entre 5 e 15mm.

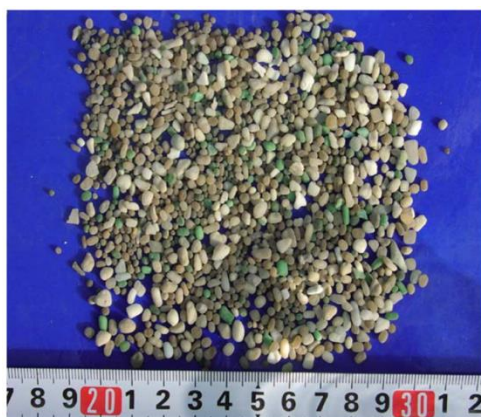


Figura 2.15 – Agregado artificial composto por PET e escória de alto-forno (Choi et al., 2005, p.777)

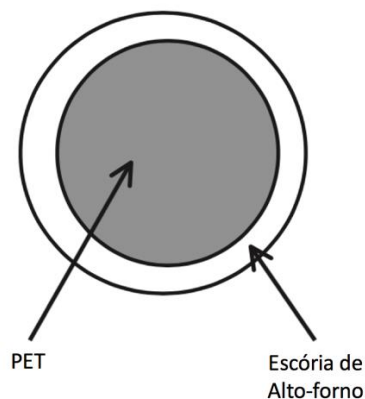


Figura 2.16 – Detalhamento do agregado artificial (Choi et al., 2005, p.777, adaptado)

No campo da durabilidade e possíveis exposições ambientais, Lima (2012) estudou o comportamento ao fogo de betões produzidos com PET como agregado. Seguiu a formulação do betão, o dimensionamento e a preparação proposta por Saikia e Brito (2010, apud Lima 2012) que não difere da que estes autores continuaram usando em sua campanha (Saikia e Brito, 2012)

Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010) investigaram o uso de frações de garrafas PET como agregado para produção de betão leve. Efetuaram a mistura com relação a/c constante de 0,45 e traços em peso de 1:1,5 e 1:0,5 com taxas singulares de substituição de agregado natural de 50% e 100%, respetivamente (Quadro 2.7). Analisaram também a substituição de porções de cimento por escória de alto-forno e a interação destes elementos. Para tanto, adotaram granulometria de PET com dimensões entre 0,25 e 4mm.

Quadro 2.7 – Composição em percentagem de peso das amostras ensaiadas (Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü, 2010, p.287).

Mistura	Aglomerante		Agregado			
	Cimento	Escória de alto-forno	PET	Areia	Água	Total
M1	51,28	-	25,64	-	23,08	100
M2	25,64	25,64	25,64	-	23,08	100
M3	33,90	-	16,95	33,90	15,25	100
M4	16,95	19,95	16,95	33,90	15,25	100

Ainda no campo de estudo de betão leve, Kou et al. (2009), por sua vez, estudaram as propriedades de betão leve preparado com granulados de PVC provenientes de condutas descartadas (Figura 2.17). Fizeram uso de um traço padrão onde apenas se substituiu a dose de areia por plástico nas proporções, em peso, de 5%, 15%, 30% e 45% (Quadro 2.8). Para obtenção de betão leve, utilizaram argila expandida (Figura 2.18) e a partir de 15% de substituição aumentou-se a dose de aditivo superplastificante para garantir a trabalhabilidade. Os grânulos de plástico utilizados possuíam dimensão não superior a 5mm.



Figura 2.17 - PVC antes (esquerda) e depois (direita) da trituração. (Kou et al., 2009, p.623)

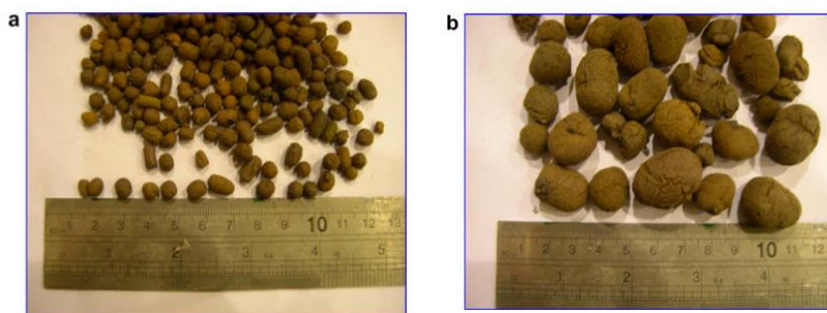


Figura 2.18 - Agregado de argila expandida. (a) dimensão nominal de 6mm; e (b) dimensão nominal de 15mm. (Kou *et al.*, 2009, p.622)

Quadro 2.8 – Composição das amostras ensaiadas (Kou *et al.*, 2009, p.623)

Mistura	P0	P5	P15	P30	P45
Percentagem de substituição (%)	0	5	15	30	45
Cimento (kg/m ³)	415	415	415	415	415
Areia (kg/m ³)	850	805	720	595	470
Argila expandida 15mm (kg/m ³)	67	67	67	67	67
Argila expandida 6mm (kg/m ³)	333	333	333	333	333
Água (kg/m ³)	180	180	180	180	180
Grânulos de PVC (kg/m ³)	0	15	45	90	135
Superplastificante (ml)	2050	2050	2100	2300	2700
Densidade estimada (kg/m ³)	1845	1815	1760	1680	1600
**A percentagem de substituição é em referência a areia por grânulos de PVC em volume.					

O Quadro 2.9 a seguir, apresenta um resumo das principais características e parâmetros adotados pelos principais estudos que compõem esta pesquisa. Ao relacioná-los, nota-se a tendência ao emprego de PET como agente de substituição de agregados miúdos naturais. O ponto onde não há consenso é quanto a forma de substituir, em massa ou em volume. Nas taxas de substituição e massa, estima-se que o volume do agregado polimérico seja desproporcional ao volume dos outros componentes da mistura dado que a massa volúmica do PET é substancialmente inferior à dos agregados naturais como areia e brita.

Quadro 2.9 - Características dos estudos reportados na literatura. (Saikia e Brito, 2012, adaptado)

Referência	Composto estudado	Origem do resíduo plástico	Dimensão e forma	Agregado natural substituído	Taxa de substituição
(Canellas, 2005)	Argamassa	Embalagem PET	1,41 - 2,00mm	Miúdo	0% 10% 30% 50% 70% (volume)
(Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü, 2010)	Argamassa	Embalagem PET	0,25 - 4 mm	Miúdo	0% 50% 100% (peso)
(Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010)	Argamassa	PET e Policarbonato industrial	PET: 1,6 - 10mm PC: 1,6 - 5mm	Miúdo	0% 3% 10% 20% 50% (volume)
(Remadnia <i>et al.</i> , 2009)	Argamassa	Embalagem PET	≤4mm	Miúdo	0% 30% 50% 70% (volume)
(Ferreira, Brito e Saikia, 2012)	Betão	Embalagem PET	-Pc e Pf - trituração -Pp - tratamento térmico	Miúdo/ Graúdo	0% 7,5% 15%
(Lima, 2012)	Betão	Embalagem PET	-Pc e Pf - trituração -Pp - tratamento térmico ≤24mm	Miúdo/ Graúdo	0% 7,5% 15%
(Albano <i>et al.</i> , 2009)	Betão	Embalagem PET	2,6 mm e 11,4mm (dimensão média)	Miúdo	0% 10% 20%
(Batayneh, Marie e Asi, 2007)	Betão	-	0,15 - 4,75mm	Miúdo	0% 5% 10% 15% 20% (peso)
(Choi <i>et al.</i> , 2005)	Betão	Embalagem PET	5 - 15mm (forma esférica lisa)	Miúdo	0% 25% 50% 75% (volume)
(Kou <i>et al.</i> , 2009)	Betão	Tubo de PVC	≤5mm (granular)	Miúdo	0% 5% 15% 30% 45% (volume)
(Frigione, 2010)	Betão	Embalagem PET	1 - 1,5mm (espessura) 0,1 - 5mm	Miúdo	5% (peso)
(Ismail e AL-Hashmi, 2008)	Betão	Embalagens plásticas (80% Polietileno e 20% Poliestireno)	-Largura 0,15-4mm -Comprimento 0,15-12mm	Miúdo	0% 10% 15% 20% (volume)
(Modro, 2008)	Betão	-Embalagem PET -Fita de PET	- -<4,8mm -<5mm	Miúdo/ Graúdo	Filme: 1% 2% 3% 4% Areia/Flake: 10% 20% 30% 40% (volume)
(Almeida <i>et al.</i> , 2004)	Betão	Embalagem PET	<2,4mm	Miúdo	25% 50% 75% 100% (volume)

2.4.2 Origem e Preparação do polímero

Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu (2010), utilizaram garrafas fornecidas por uma indústria produtora. As garrafas foram lavadas e trituradas mecanicamente. Canellas (2005) utilizaram garrafas PET provenientes de coleta seletiva. Fizeram uso de garrafas de 1,5l e de 2l sem separá-las por coloração. O rótulo, a tampa e o anel do lacre foram retirados porque são compostos por outro tipo de plástico que não PET. Foram lavadas, secas e trituradas por um fragmentador de facas.

Ferreira, Brito e Saikia (2012) trituraram garrafas PET e lavaram o material. Uma parcela passou por tratamento térmico onde o material foi aquecido por um equipamento a vácuo até a temperatura de secagem. O composto resultante foi passado em uma fuso-extrusora de 26 furos e coletado em um banho de arrefecimento que permite a solidificação. Em seguida, foi granulado em um cortador rotativo em água e posteriormente seco. Lima (2012) utilizou um procedimento semelhante de pós tratamento de uma parcela de material que foi transformado em um granulado aproximadamente cilíndrico. Depois de as garrafas serem lavadas a quente, triadas, moídas o material resultante foi separado por densidade.

Modro (2004) fez uso de três tipos de resíduos de PET. Filme de PET: proveniente de embalagens, com formato de plaquetas, elevado fator de forma e contaminada com impurezas como poliestireno e alumínio. Areia de PET: proveniente de embalagens, material passante na peneira de 4,8mm e com impurezas como terra, areia, pedrisco e cola. Flake de PET: proveniente de fitas para fixar mercadorias em pallets, com formato de lâminas e dimensões inferiores a 5mm.

Seguindo opções mais simplificadas, Remadnia et al. (2009) fizeram uso de garrafas PET de água que foram separadas, lavadas e trituradas uma ou duas vezes para atingir a dimensão desejada. Frigione (2010) optou por utilizar garrafas PET sem lavar nem separar por coloração. O material foi triturado em um fragmentador de lâminas.

2.4.3 Ensaios e resultados obtidos

Pode-se afirmar que há uma tendência de aproximação dos resultados obtidos nas diversas pesquisas. De acordo com os objetivos de cada pesquisa, os autores optaram por determinados tipos e condições de ensaios conforme apresentadas a seguir. Ao serem relacionados, os estudos possibilitam a montagem de um panorama do estado atual dos avanços alcançados neste tema.

2.4.3.1 Trabalhabilidade

A substituição de agregados naturais por agregados plásticos interfere diretamente na trabalhabilidade de argamassas e no betão tomadas as referências frente a amostras de controle. Remadnia et al. (2009)

concluiu que a substituição de areia por agregado de PET concede uma diminuição significativa na fluidez da argamassa.

Com elevadas taxas de substituição é possível obter abatimento próximo de zero (Figura 2.19). A perda de trabalhabilidade e a dificuldade de adensamento podem ser justificadas pela forma angulosa dos grãos de PET e sua interação com o aglomerante. (Almeida et al., 2004).

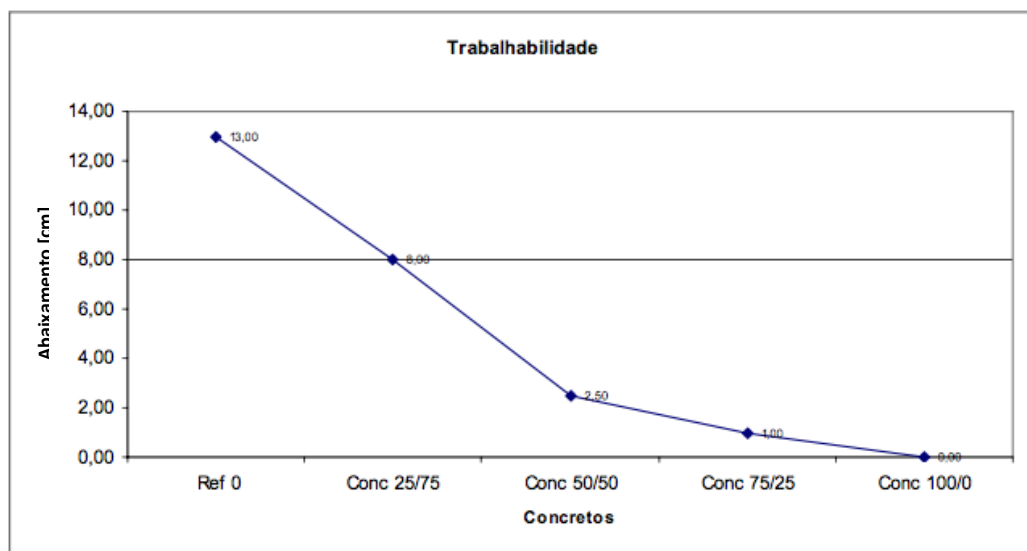


Figura 2.19 - Variação nas medidas de abatimento em função do teor de areia de PET obtido na campanha de Almeida et al. (2004).

Ferreira, Brito e Saikia (2012) ajustaram a composição do betão para a manutenção do valor do abaixamento em todas as amostras. Desta forma, concluíram que a forma, o tamanho e a rugosidade do agregado plástico mostraram grande influência na consistência da mistura. O uso de agregados triturados, por terem formato lamelar e angulado, torna as misturas menos viáveis, uma vez que necessitam do aumento da relação água/cimento para atingir a gama de abaixamento estabelecida. Já o uso de agregados plásticos tratados termicamente, com formato mais regular e cilíndrico, conferiu à mistura resultado inverso aos obtidos anteriormente, melhorando seu desempenho à trabalhabilidade.

2.4.3.2 Densidade

Os estudos convergem para a conclusão que betões contendo plástico como agregado tendem a apresentar menor densidade frente a betões compostos somente por agregados naturais conforme Figura 2.20. O PET apresenta baixa massa específica relativa, portanto, de acordo com a taxa de substituição de agregados naturais empregada, é possível que se produza betão leve. (ALMEIDA, 2004; HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE, 2010).

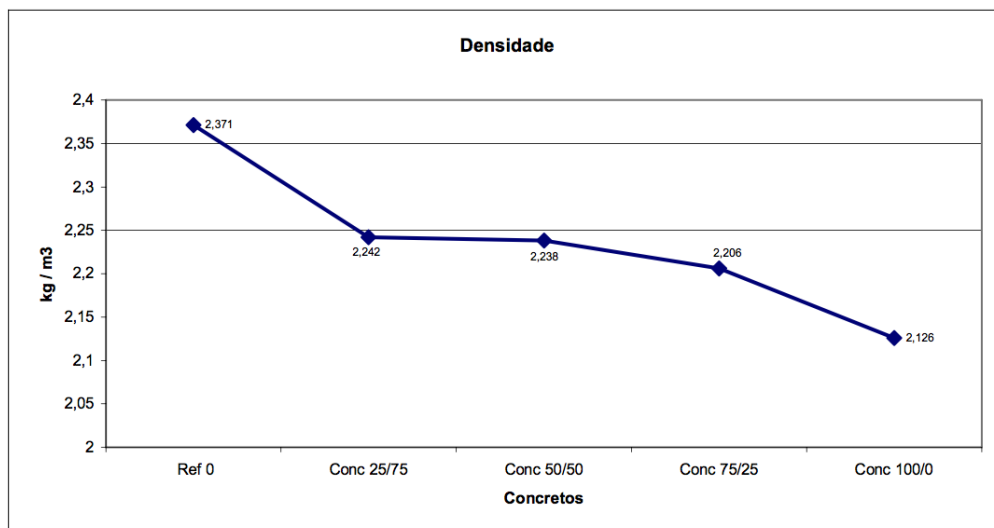


Figura 2.20 - Diminuição da densidade com o aumento do teor de PET obtido por Almeida *et al.* (2008, p.4421)

Amostras com maiores quantidades de substituição apresentam maiores perdas de trabalhabilidade, desta forma, isto possibilitaria uma maior incorporação de ar na mistura e, conseqüentemente, uma diminuição da densidade. (Modro, 2004)

Remadnia et al. (2009) acrescenta ainda que a utilização de plástico com agregado, permite uma um aumento significativo no emprego de água na mistura. E, que a parcela de água que não é consumida na hidratação do cimento e, ao ser eliminada durante a secagem, promove um aumento da porosidade.

2.4.3.3 Resistência à compressão

Canellas (2005) concluiu que para taxas de substituição de agregado natural acima de 30%, a perda de capacidade de resistência à compressão é significativa (Figura 2.21). A justificativa do fenômeno dá-se pela “(..)diminuição do adensamento devido ao arranjo entre grãos e em virtude do módulo de elasticidade do PET que retorna a sua posição inicial após a compactação aumentando consideravelmente a porosidade do material. “

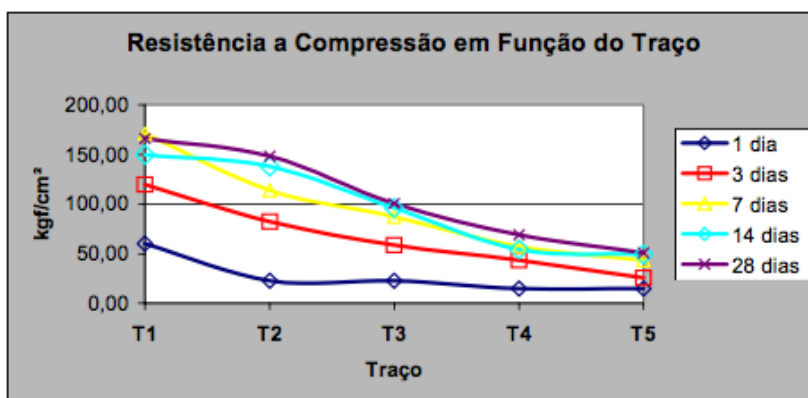


Figura 2.21 - Gráfico da resistência à compressão em função do traço em volume obtido por Canellas (2005, p.66).

Segundo Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu (2010), o desempenho de argamassas contendo mistura de PET e areia é superior ao de argamassas contendo somente PET como agregado conforme Figura 2.22. Concluíram também que o uso de grânulos de PET em betões ou em argamassas podem reduzir significativamente o peso próprio da estrutura.

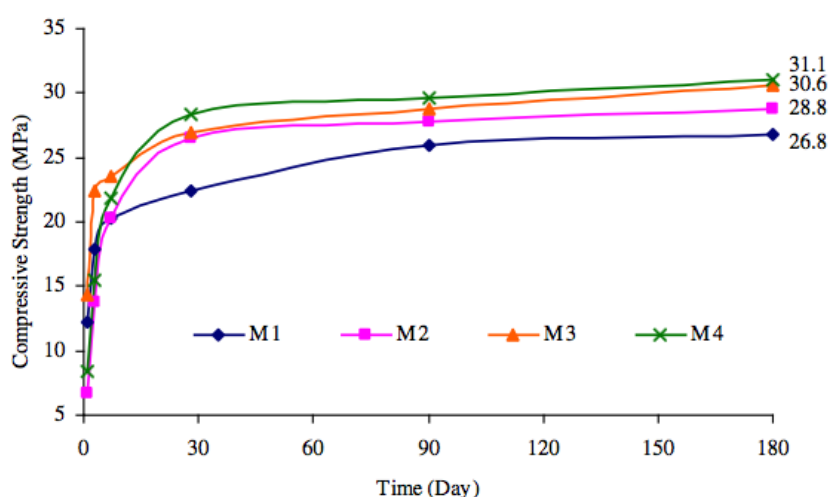


Figura 2.22 - Resistência a compressão de argamassas em ensaio de compressão axial obtido por Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu (2010, p.288).

A diminuição da capacidade de resistência à compressão pode ser atribuída à dimensão do agregado plástico, bem como pela fraca ligação entre a matriz cimentícia e os grânulos plásticos (Ferreira, Brito e Saikia, 2012; Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010). Lima (2012) condiciona a diminuição da resistência à compressão à rigidez significativamente menor dos agregados plásticos frente aos outros constituintes do betão. Ismail e AL-Hashmi (2008) adiciona ainda que: “(...) o plástico é considerado um material

hidrofóbico, pelo que esta propriedade pode restringir a entrada de água necessária para que a hidratação do cimento atravesse a estrutura dos espécimes de betão (...)

Modro (2008) alcançou seus melhores resultados fazendo uso de *flake* de PET (Figura 2.25) frente ao uso de areia (Figura 2.23) ou filme de PET (Figura 2.24). A perda na capacidade de resistência à compressão, neste melhor caso, foi inferior a 5%.

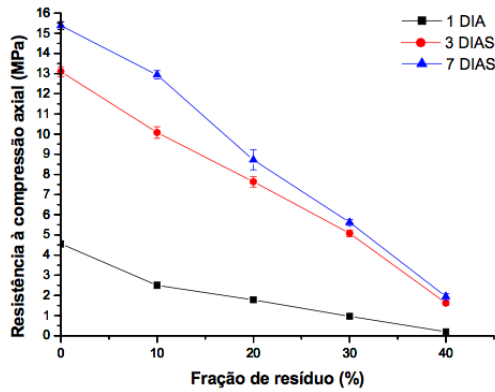


Figura 2.23 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo Areia de PET obtido por Modro (2008, p.54)

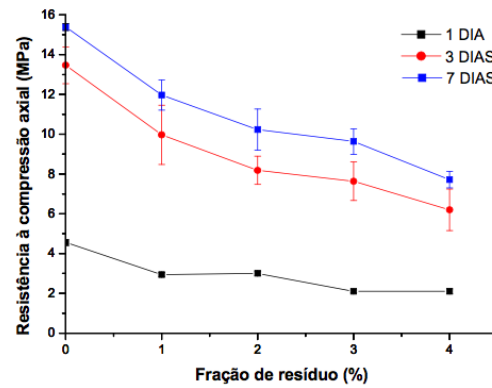


Figura 2.24 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo Filme de PET obtido por Modro (2008, p.55)

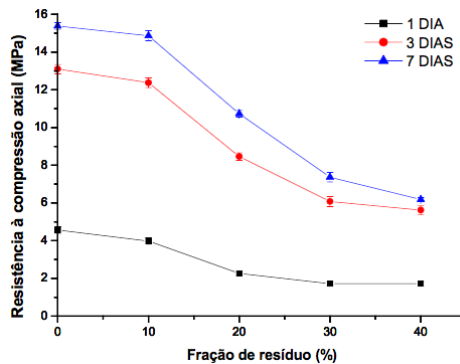


Figura 2.25 - Resistência a compressão axial dos traços com resíduos de o tipo *Flake* de PET obtido por Modro (2008, p.56)

Apesar dos problemas relacionados ao uso de agregado plástico em compostos cimentícios quanto a resistência à compressão, há possibilidades de uso na composição de peças estruturais. Como por exemplo na campanha experimental de Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010), que concluiu que argamassas contendo PET como agregado se enquadraram nos parâmetros da categoria de betão leve estrutural.

2.4.3.4 Absorção de água

A capacidade de absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade do composto. Amostras com pequenas taxas de substituição não apresentaram variação significativa da capacidade de absorção de água. (Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010)

A substituição do agregado natural pelo agregado polimérico apresenta uma tendência a conferir uma maior taxa de absorção de água por imersão frente à amostra de controle. O aumento da quantidade de água absorvida é acentuado quanto maior for a taxa de substituição de agregado natural conforme apresentado na Figura 2.26. Tal fator pode ser justificado pela menor compactação do betão devido a fraca ligação entre o agregado artificial e a matriz cimentícia (Lima, 2012).

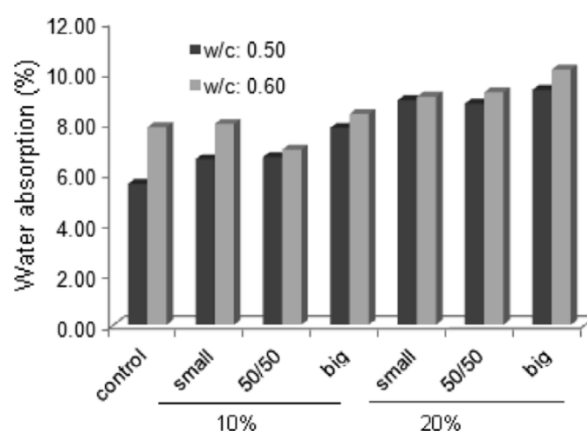


Figura 2.26 - Resultados obtidos por Albano et al. (2009, p.2714) para absorção de água por imersão, aos 28 dias.

O betão leve absorve mais água do que comparado ao betão comum. É possível concluir que amostras que substituem porções maiores de agregado natural apresentam maior porosidade e conseqüentemente maior capacidade de absorção de água, mas ainda dentro dos parâmetros necessários para enquadramento como betão leve. (Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu, 2010)

2.4.3.5 Profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação aumenta de acordo com a penetração de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera que reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da amostra. Ensaios indicam que o a substituição de agregados naturais por PET influi negativamente nos resultados, que resulta do aumento da profundidade de alcance do CO_2 . (Akçaözoğlu, Atiş e Akçaözoğlu, 2010)

A ação do CO₂ pode ser analisada com uso de uma solução de fenolftaleína. Quando aplicada numa superfície interior, resultada da rutura de um provete, as regiões carbonatadas tornam-se roxas enquanto as regiões não carbonatadas, permanecem sem coloração (Figura 2.27).



Figura 2.27 - Reação da fenolftaleína em provetes obtidos na campanha de Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010, p.289).

A substituição de agregado natural por agregado polimérico confere menor resistência à penetração de CO₂ nas amostras. O Quadro 2.10 apresenta os resultados obtidos por Silva, Brito, de e Saikia (2013), onde dentre as condições de cura estudadas, a cura em ambiente externo apresentou-se como a pior condição.

Quadro 2.10 - Resultados dos ensaio de profundidade de carbonatação obtidos na campanha de Silva, Brito, de e Saikia (2013, p.27, adaptado) para cura em câmara húmida.

Mistura	Profundidade de carbonatação aos 91 dias	Varição
	(mm)	(%)
RC	14,0	0,0
C7,5PC	34,2	144,2
C7,5PP	18,3	30,4
C15PP	18,6	32,6
C7,5PF	21,3	52,2
C15PF	28,8	105,8

2.5 CONCLUSÃO

A partir da vasta pesquisa que compões a revisão da literatura, pode-se concluir a importância da abordagem do tema e a vasta capacidade de desenvolvimento de novas tecnologias englobadas neste universo de pesquisa. Constatou-se a importância do emprego soluções alternativas para o gerenciamento e destinação dos resíduos sólidos. Além de uma grande defasagem de políticas públicas e dados estatísticos que possibilitem a solução desses problemas ambientais em um menor espaço de tempo.

Ao se tratar do emprego de PET na produção de compostos cimentícios, o Quadro 2.11 a seguir, resume quais foram as linhas de pesquisa de alguns dos estudos compreendidos por esta revisão da literatura. Nota-se que o foco se dá, principalmente, quanto às características mecânicas dos compostos. Outras características mais específicas foram abordadas individualmente nos estudos. Ao relacionar este significativo número de pesquisas, pode-se montar um panorama das possibilidades de aplicação e exploração de argamassas ou betões com PET.

Quadro 2.11 - Propriedades do betão reportados na literatura. (Saikia e Brito, 2012, adaptado)

Referência	Trabalhabilidade	Densidade Fresca	Densidade Seca	Resistência à compressão	Resistência à tração	Resistência à flexão	Resistência à abrasão	Módulo de elasticidade	Curva tensão x deformação	Velocidade de propagação de	Dureza superficial	Absorção de água	Permeabilidade a gás	Índice de vazios	Profundidade de Carbonatação	Penetração de íon de Cl	Fissuração	Microestrutura	Comportamento a altas temperaturas
(Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü, 2010)				O	O	O						O		O	O		O		
(Albano <i>et al.</i> , 2009)	O			O	O	O		O		O		O							O
(Almeida <i>et al.</i> , 2004)	O	O		O															
(Batayneh, Marie e Asi, 2007)	O	O		O	O	O													
(Canellas, 2005)	O			O	O	O													
(Choi <i>et al.</i> , 2005)	O			O	O	O		O											
(Ferreira, Brito e Saikia, 2012)	O	O		O	O	O		O	O										
(Frigione, 2010)	O			O	O				O								O		
(Hannawi, Kamali-Bernard e Prince, 2010)				O	O	O		O				O	O	O				O	
(Ismail e AL-Hashmi, 2008)	O	O		O	O	O													
(Kou <i>et al.</i> , 2009)	O	O		O	O	O		O								O	O		
(Lima, 2012)	O	O		O	O			O		O	O	O							
(Modro, 2008)	O	O		O	O							O		O				O	
(Remadnia <i>et al.</i> , 2009)	O	O		O	O														

CAPÍTULO 3

CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

A campanha experimental teve como objetivo desenvolver um estudo que permitisse a melhor compreensão dos impactos no desempenho do betão composto parcialmente por frações de PET.

Para tanto, foi aprofundado o estudo de argamassas em que parte do agregado foi substituído por resíduo de PET. Estas argamassas foram analisadas quanto ao seu desempenho com o intuito de auxiliar na composição de betões.

3.2 MÉTODOS

Seguindo os objetivos deste estudo, as análises das características físicas, químicas e de desempenho dos compostos cimentícios procuraram ser efetuadas de acordo com as normas em vigor preferencialmente em Portugal. Toda a campanha experimental foi realizada no Brasil, portanto, na impossibilidade de seguir as recomendações normativas portuguesas, as normas técnicas brasileiras foram aplicadas. As considerações e adoções empregadas foram detalhadamente descritas, permitindo o aproveitamento e a comparação dos resultados obtidos.

Para o desenvolvimento da campanha experimental, seguiu-se a organização funcional ilustrativa apresentada na Figura 3.1 a seguir.

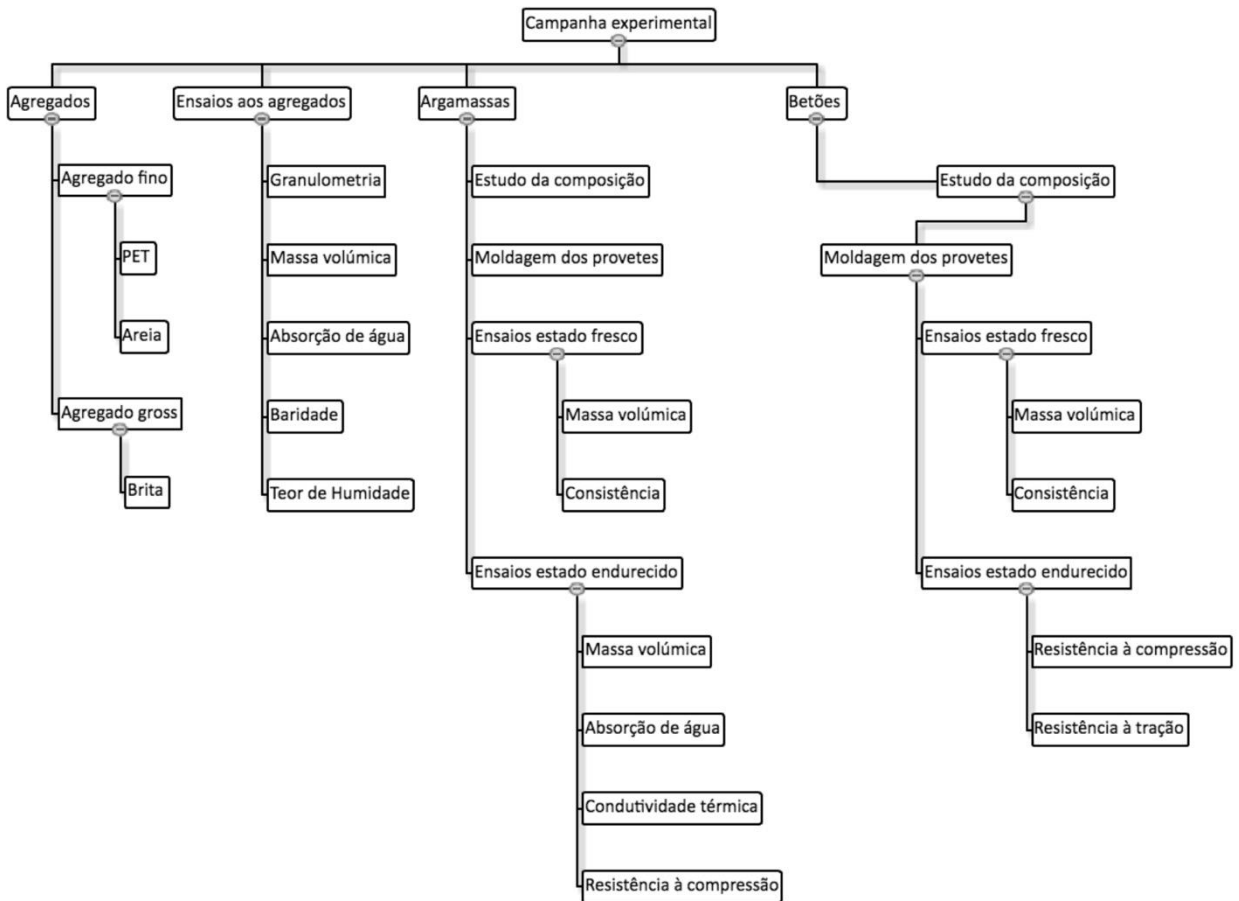


Figura 3.1 - Fluxograma de desenvolvimento da campanha experimental

3.2.1 Provetes

Diferente da Europa, no Brasil, assim como nos EUA e em outras nações, os provetes de ensaio de compostos cimentícios utilizados são cilíndricos e com relação altura/diâmetro igual a 2. A variação dos resultados de ensaios, principalmente de compressão, são temas de muitos estudos e formulações matemáticas. A resistência à compressão de provetes cúbicos tende a ser maior que de provetes cilíndricos por, além de outros fatores, influência do atrito das placas da prensa na superfície do provete e sua menor relação altura/diâmetro que influencia a propagação de esforços no interior da amostra. (Hamassaki e dos Santos, 2013)

O emprego dos moldes cilíndricos para argamassas e para betões justifica-se por este fato e pela disponibilidade física dos moldes no laboratório de ensaio.

Para todos os ensaios em argamassas no estado endurecido, foram utilizados provetes cilíndricos de dimensões 50x100 mm de diâmetro e altura respetivamente. A Figura 3.2 exemplifica as dimensões normalizadas dos moldes utilizados que são compostos pela forma cilíndrica e base rosqueada, ambas de metal não corrosivo.

Para os ensaios em betão, foram utilizados provetes cilíndricos com dimensões 100x200 mm de diâmetro e altura respetivamente. As dimensões dos provetes e o método de adensamento recomendado para o ensaio de betões constam na ABNT NBR 5738 (ABNT, 2008).

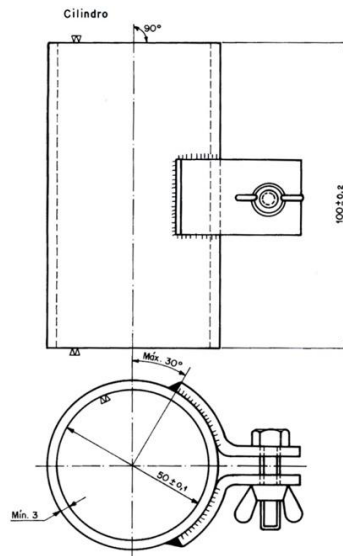


Figura 3.2 – Dimensões do provete cilíndrico para argamassas. NBR 7215 (ABNT, 1996)

3.2.2 Mistura

Devido às características dos moldes e os objetivos perseguidos, os procedimentos de mistura e moldagem dos provetes de argamassas foram baseados na Norma Técnica Brasileira ABNT NBR 7212 (ABNT, 2012).

O procedimento de mistura mecânica consistiu na seguinte sequência:

- Foi introduzida na cuba toda a quantidade de água e adicionar o cimento;
- Estes componentes foram misturados à velocidade baixa (140 ± 5 rpm) durante 30 s;
- Sem paralisar a mistura, a areia e o agregado polimérico (quando empregado) foram adicionados gradualmente num período de 30 s;
- A velocidade do misturador foi alterada para 285 ± 5 rpm durante 30 s;
- O misturador foi desligado por 90 s. Nos primeiros 15 s, foi devolvida à mistura a argamassa aderida na parede da cuba e na pá do misturador. Nos 75 s restantes, a argamassa manteve-se em repouso com a cuba coberta com pano limpo e húmido;
- A mistura foi finalizada com uma última mistura à velocidade alta (285 ± 5 rpm) durante 60 s.

Os procedimentos de preparo do betão foram fundamentados no Norma Técnica Brasileira NBR 12655 (ABNT, 2006). Para mistura mecânica foram empregados os seguintes processos:

- a) Com o misturador em funcionamento, inseriu-se a brita e metade do total de volume de água a ser empregado naquele traço, misturando-se por cerca de um minuto;
- b) Em seguida foi introduzido o cimento, a porção de areia e, dependendo do traço, a porção de PET.

O tempo total da mistura é de aproximadamente 4 minutos, quando se atinge a homogeneidade.

3.2.3 Moldagem dos provetes

Inicialmente todos os moldes foram devidamente preparados com óleo desmoldante de origem mineral e de baixa viscosidade.

Após os ensaios em argamassa no estado fresco, seguiu-se para a moldagem dos provetes com a maior velocidade possível. A colocação da argamassa na forma foi realizada com auxílio de uma espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes aplicados manualmente, uniformemente distribuídos e com soquete padronizado. A face superior foi arrasada e protegida com uma placa de vidro plano.

Para o betão, foi escolhida a aplicação do adensamento manual. A moldagem dos provetes se sucedeu com a aplicação em três camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 25 golpes de uma haste de adensamento normalizada.

A quantidade de provetes de cada traço, destinados para cada ensaio em argamassa no estado endurecido, foi determinada de acordo com as normas de cada ensaio.

3.2.4 Condições de cura

Durante as primeiras 24 h após a moldagem, os provetes permaneceram no interior dos moldes, com uma placa de vidro apoiada sobre a sua face superior, no interior da câmara húmida, com temperatura e humidade afixadas em 21°C e 95% respetivamente.

Após as primeiras 24 h, os provetes foram desmoldados e retornaram à câmara húmida onde permaneceram até a data dos respetivos ensaios ou foram destinados a algum outro procedimento conforme especificado na descrição de cada ensaio.

3.2.5 Execução dos ensaios

As características da argamassa ou do betão estão diretamente ligadas as características dos agregados que os compõe. Desta forma, a correta análise dos agregados nos fundamenta para a formulação e otimização dos traços a serem empregados.

3.2.5.1 Composição Granulométrica

A análise da composição granulométrica dos agregados, tem como objetivo a determinação estatística da distribuição das dimensões dos grânulos de acordo com uma série de peneiras normalizadas.

Este ensaio foi realizado principalmente com base nas recomendações da norma NBR NM 248 (ABNT b, 2003) “Agregados – Determinação da composição granulométrica” devido às condições laboratoriais. A norma NP EN 933-1 (2000) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método da peneiração” foi considerada em todos os pontos possíveis e as adoções feitas nos pontos de discordância estão devidamente descritas.

O conjunto de peneiros utilizado atende à normas NBR NM ISO 3310-1 (2010) e a série utilizada condiz com a prevista pela NBR NM 248 (ABNT b, 2003) com aberturas de malha de acordo com o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Abertura das peneiras. NBR NM 248 (ABNT b, 2003)

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
--	63 mm
--	50 mm
37,5 mm	--
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	--
--	12,5 mm
9,5 mm	--
--	6,3 mm
4,75 mm	--
2,36 mm	--
1,18 mm	--
600 m	--
300 m	--
150 m	--

As normas definem a massa mínima da amostra de acordo com a dimensão nominal máxima do agregado. A NP EN 933-1 (2000) impõe uma correção de massa mínima para agregados que apresentem massa volumica inferior a 2000kg/m^3 ou superior a 3000kg/m^3 , diferente da ABNT NBR NM 248 (ABNT b, 2003)

que não corrige os valores para os diferentes agregados, mas exige, no geral, massas maiores. Portanto, para a amostragem, foi adotado a recomendação da Norma Brasileira conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Massa mínima da amostra de ensaio - NBR NM 248 (ABNT b, 2003)

Dimensão máxima nominal do agregado [mm]	Massa mínima da amostra de ensaio [kg]
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
*Após secagem.	

Procedimento de ensaio:

- As amostras foram secas em estufa até o alcance de massa contante. Dado que a temperatura vítrea do agregado polimérico de PET que, segundo Bannach *et al.* (2011) é de aproximadamente 69,9°C, a temperatura da estufa foi ajustada de 105±5°C para 65 ±5°C afim de que material não ultrapassasse sua temperatura de transição vítrea, pois esta poderia alterar as características da amostra.

Ainda segundo Bannach *et al.* (2011), um polímero com temperatura abaixo de sua temperatura de transição vítrea, apresenta-se rígido, de pouca mobilidade. Quando o material supera essa temperatura, as cadeias poliméricas adquirem certo grau de liberdade, conferindo ao material um estado maleável. O que pode prejudicar a condição de medição deste ensaio.

- A amostra foi colocada sobre o conjunto de peneiras adequado à dimensão do agregado e promoveu-se a agitação mecânica do conjunto (Figura 3.3) até que a massa retida em cada peneira não variasse mais de 1% durante 1 minuto de agitação.
- Determinou-se a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto.



Figura 3.3 - Máquina de agitação mecânica para agregados finos e conjunto de peneiras.

Com os cálculos das percentagens acumuladas em cada peneira, é possível traçar a curva da distribuição granulométrica das amostras assim como a determinação da máxima dimensão do agregado.

3.2.5.2 Módulo de Finura

O módulo de finura é um parâmetro único que nos permite analisar e comparar diferentes amostras de agregados quanto à dimensão de seus grãos.

A determinação foi realizada de acordo com as recomendações da NBR NM 248 (ABNT b, 2003) “Agregados – Determinação da composição granulométrica”.

O módulo de finura é calculado pela soma dos percentuais acumulados nos peneiros da série normal aplicável (Quadro 3.1), do ensaio de composição granulométrica, dividida por 100. Quanto maior o módulo de finura, maior serão as partículas deste agregado.

3.2.5.3 Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica das partículas é calculada a partir da relação massa por volume. A massa é determinada por pesagem da amostra de ensaio na condição saturada com superfície seca e novamente na condição seca em estufa. Neste estudo será utilizado o método do picnômetro, onde o volume é determinado a partir da massa da água deslocada e medido por pesagem.

Os ensaios para a determinação da massa volúmica e a absorção de água seguiram os procedimentos descritos pela NP EN 1097-6 (2003) “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. - Parte

6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. Na norma técnica brasileira NBR NM 52 (ABNT a, 2003) os procedimentos se assemelham à norma portuguesa, mas é válida somente para agregados finos. Para determinação da massa de amostragem foi utilizado o Quadro 3.3, contido na respetiva norma.

Quadro 3.3 - Massa mínima da amostra para o método do picnómetro (NP EN 1097-6, 2003)

Dimensão máxima nominal do agregado [mm]	Massa mínima da amostra de ensaio [kg]
31,5	5
16	2
8	1

Procedimento de ensaio:

Para agregados com dimensão máxima entre 0,063 mm e 4 mm:

- A amostra de ensaio foi imersa em água (22 ± 3 °C) no picnómetro. O ar aprisionado foi removido rodando suavemente e agitando o picnómetro numa posição inclinada;
- O picnómetro foi levado ao banho de água a uma temperatura de 22 ± 3 °C por $24 \pm 0,5$ h. No final deste período, removeu-se novamente o ar residual aprisionado na amostra;
- O picnómetro foi preenchido de água a mesma temperatura e tampado sem que permanecesse algum ar no seu interior;
- Após secar sua superfície exterior, o picnómetro foi pesado e a massa do conjunto foi registrada como M_2 ;
- A amostra foi espalhada em uma bandeja que foi exposta a uma corrente de ar e agitada para assegurar uma secagem uniforme;
- Para avaliar se o estado de saturado com superfície seca foi alcançado, um molde troco-cónico metálico foi preenchido vagarosamente com o material e com uso de um pilão a amostra foi ligeiramente compactada por 25 golpes. Seguidamente, o molde foi cuidadosamente levantado e o comportamento da amostra foi avaliado. Até que após a retirada do molde a amostra não entrasse em colapso (Figura 3.4) assim como no item c) da Figura 3.5, o procedimento de secagem continuou;
- Esta amostra saturada com superfície seca permitiu a obtenção da massa M_1 .
- Esta mesma amostra foi seca em estufa até atingir massa constante registrada como M_4 ;

- Em seguida o picnómetro foi preenchido somente com água e sua tampa colocada sem que permanecesse ar em seu interior, sua superfície exterior foi seca e a massa do conjunto foi obtida e registrada como M_3 .



Figura 3.4 - Agregado fino saturado com superfície seca

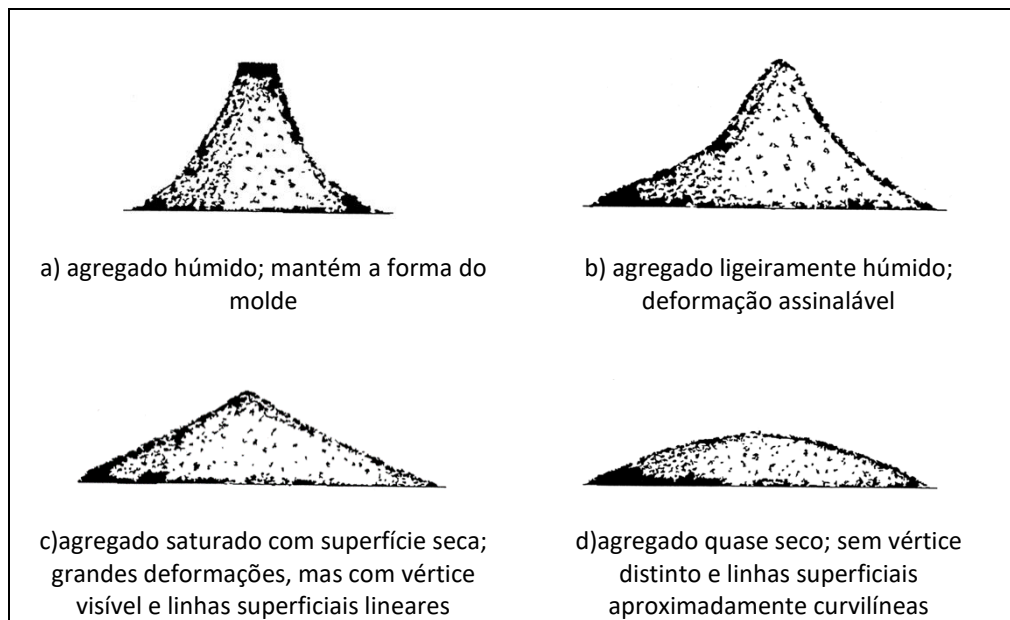


Figura 3.5 - Avaliação do estado de saturação da amostra de agregados finos segundo a NP EN 1097-6 (2016)

Para a obtenção dos resultados, prossegue-se os cálculos a seguir:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas [kg/dm^3]:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]}$$

3.1

- Massa volúmica das partículas secas em estufa [kg/dm³]:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} \quad 3.2$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/dm³]:

$$\rho_{rd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} \quad 3.3$$

- Absorção de água (como percentagem de massa seca) após a imersão por 24 horas [%]:

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 3.4$$

onde:

M₁ é a massa dos agregados saturados com superfície seca [g];

M₂ é a massa do picnómetro contendo o agregado imerso em água [g];

M₃ é a massa do picnómetro cheio de água [g];

M₄ é a massa da amostra após a secagem em estufa [g].

3.2.5.4 Baridade e volume de vazios

Baridade ou massa volúmica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume aparente, incluindo os poros permeáveis à água. Nos permite analisar o volume que o agregado naturalmente ocupa, o que leva em conta o formato das partículas, sua disposição espacial e seu grau de compactação. A determinação do volume de vazios se dá pela diferença volumétrica entre o volume do recipiente e o volume ocupado pela amostra de acordo com sua massa volúmica absoluta.

Estas propriedades são importantes no estudo da composição do betão e na conversão de traços em massa para traços em volume.

Para obter esses parâmetros, seguiu-se os procedimentos descritos na NP EN 1097-3 (2002) “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”.

A capacidade mínima do contentor para realizar este ensaio é relacionada com a dimensão máxima do agregado no Quadro 3.4. A massa da amostra de ensaio deve estar compreendida entre 120 % e 150 % da massa necessária para encher o contentor.

Quadro 3.4 - Capacidade mínima do contentor em função da máxima dimensão do agregado NP EN 1097-3 (2002)

Dimensão máxima do agregado [mm]	Capacidade [l]
Até 4	1,0
Até 16	5,0
Até 31,5	10
Até 63	20

Procedimento de ensaio:

- Pesou-se o recipiente de volume conhecido vazio, seco e limpo e sua massa foi registrada como m_1 ;
- Encheu-se o recipiente com a amostra seca em estufa, com ajuda de uma pá, até transbordar e sem que a pá ultrapassasse 50mm abaixo do bordo superior do contentor;
- A superfície foi nivelada com ajuda de uma régua, sem que ocorresse compactação da amostra;
- Pesou-se o recipiente cheio e a massa do conjunto foi registrada como m_2 .

A baridade calcula-se pela média do valor obtido pela fórmula 3.5 com aplicação do ensaio em ao menos três amostras.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad 3.5$$

onde:

ρ_b é a baridade da amostra [kg/dm³];

m_1 é a massa do recipiente vazio, seco e limpo [kg];

m_2 é a massa do recipiente e do provete elementar [kg];

V é a capacidade do recipiente [l].

A percentagem de vazios é a proporção volumétrica de vazios no recipiente e é calculada pela seguinte equação:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} * 100 \quad 3.6$$

onde:

v é a percentagem de vazios;

ρ_b é a baridade em $[\text{kg}/\text{dm}^3]$;

ρ_p é a massa volúmica real do agregado seco em estufa $[\text{kg}/\text{dm}^3]$.

3.2.5.5 Teor de umidade

O teor de umidade reflete a quantidade de água já contida no agregado e é importante no estudo da composição do betão de forma que a quantidade de água adicionada possa corrigida.

Para obtenção destes valores, foi utilizado o método da estufa que para agregados grossos é descrito pela Norma Técnica Brasileira NBR 9939 (ABNT, 1987) “Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo”.

A massa amostra mínima de ensaio foi obtida a partir do Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Massa mínima da amostra de ensaio NBR 9939 (ABNT, 1987)

Dimensão máxima característica do agregado [mm]	Massa mínima da amostra de ensaio [g]
9,5	1500
12,5	2000
19	3000
25	4000
38	6000
50	8000
76	13000

Nota: para agregados leves, a massa mínima da amostra é obtida dividindo-se os valores desta tabela por 1,60 e multiplicando-se pela massa unitária do agregado leve, no estado seco e solto, em g/cm^3 .

Procedimento de ensaio:

- Determinou-se uma amostra inicial de ensaio e sua massa registrada com M_i ;
- Secou-se a amostra em estufa até que a diferença entre pesagens sucessivas com intervalos de pelo menos 2 horas e que sua não diferisse mais que 0,1% de perda de massa.

O cálculo do teor de umidade total da amostra é dado pela expressão 3.7.

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad 3.7$$

onde:

h é o teor de umidade total [%];

M_i é a massa inicial da amostra [g];

M_f é a massa final da amostra seca [g].

3.2.6 Ensaios à argamassa no estado fresco

Os ensaios à argamassa no estado fresco foram realizados no intervalo entre a amassadura e a moldagem dos provetes. Com base nos objetivos propostos, foram realizados apenas os ensaios de consistência e de determinação da massa volúmica fresca.

3.2.6.1 Índice de consistência

A análise do índice de consistência das argamassas tem como objetivo a avaliação de sua trabalhabilidade. Além disso, os valores obtidos auxiliaram diretamente no estudo da influência da substituição do agregado fino pelo agregado polimérico e no ajuste da relação a/c.

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma Técnica Brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016) “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”.

Procedimento de ensaio:

- Logo após da preparação da argamassa, o molde troncocônico foi colocado sobre a mesa para índice de consistência, foi preenchido com três camadas sucessivas com alturas aproximadamente iguais e foram aplicadas em cada uma das camadas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete;
- Foi realizado o rasamento do molde com auxílio de uma régua metálica e retirado o molde;
- Com uso da manivela, a mesa foi movimentada 30 vezes em aproximadamente 30 segundos;
- Imediatamente após o último golpe, foram feitas três medições do espalhamento da argamassa sobre a mesa (Figura 3.6).

O índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro.



Figura 3.6 – Argamassa espelhada sobre a mesa para índice de consistência.

3.2.6.2 Massa volúmica fresca

A determinação da massa volúmica fresca nos permite analisar e comparar as alterações ocasionadas pelas alterações do traço e projetar uma curva de alteração de massa volúmica ao decorrer do período de cura.

Para este ensaio, aplicou-se as recomendações da norma NP EN 12350-6 (2009). Fez-se uso de um recipiente plástico calibrado de 400 ml que foi preenchido em 3 camadas aproximadamente iguais. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes com uma barra de compactação. Após a compactação da última camada, alguns golpes foram aplicados com um soquete na parede externa do recipiente para a remoção das imperfeições e das bolhas de ar. Finalmente, a face superior foi nivelada e arrasada com auxílio de uma régua.

A massa volúmica pôde ser calculada através da fórmula:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad 3.8$$

onde:

D é a massa volúmica fresca [kg/m^3];

m_1 é a massa do recipiente vazio [kg];

m_2 é a massa do conjunto recipiente e amostra compactada [kg];

V é o volume do recipiente [m^3].

3.2.7 Ensaios à argamassa no estado endurecido

Os ensaios às argamassas no estado endurecido foram analisaram o comportamento dos compostos de diferentes traços e sua evolução às idades de 7, 14, 28 e 56 dias. Para cada ensaio foram determinadas as melhores idades a serem analisadas.

3.2.7.1 Massa volúmica aparente seca

A obtenção da massa volúmica aparente seca nos permite comparar os efeitos gerados pelas alterações nas composições das argamassas e, ao analisar a interseção com outros ensaios, identificar a propagação destes efeitos.

A medição deste parâmetro foi realizada diretamente nos provetes utilizados para o ensaio de absorção de água por capilaridade, pois estes já haviam passado por um processo de secagem em estufa.

O ensaio foi realizado com base nos procedimentos constantes na Norma Técnica Brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016) que consiste na obtenção das dimensões médias dos provetes e seu peso. Na posse destes valores, aplicou-se a Equação 3.9 para obter a massa volúmica seca de cada um dos provetes e, em seguida, realizar a análise estatística.

$$d = \frac{4m}{\pi D^2 h} \quad 3.9$$

onde:

d é a massa volúmica seca [kg/m³];

m é a massa do provete [kg];

D é o diâmetro médio do provete [m];

h é a altura média do provete [m].

3.2.7.2 Resistência à compressão axial

As dimensões dos provetes cilíndricos utilizados não estão previstas na norma NP EN 12390-3 (2011) portanto, a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007) foi empregada para o ensaio de resistência à compressão e para a avaliação estatística de desempenho do ensaio.

Preparados os provetes e garantida a planicidade dos pratos e calibração da prensa, o carregamento de ensaio foi aplicado continuamente, sem choque e com velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até alcançar a carga de rutura.

A resistência à compressão pôde ser calculada com a expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad 3.10$$

onde:

f_c é a resistência à compressão [MPa];

F é a força máxima alcançada [N];

D é o diâmetro médio do provete [mm].

3.2.7.3 Absorção de água por capilaridade

A obtenção dos parâmetros de absorção de água por capilaridade dos provetes proporciona uma análise da distribuição física do composto endurecido. Esses poros são vazios não preenchidos pelos compostos nem pelos produtos da hidratação do cimento. Quanto mais porosa a argamassa, quanto maior seu volume de vazios e maior será sua absorção de água por capilaridade.

O ensaio nos permite analisar e estimar os vazios contidos no provete que estão diretamente conectados às propriedades apresentadas pelos mesmos e são influenciados pela relação água/cimento empregada.

Em pastas bem hidratadas e com baixa relação a/c, os vazios capilares podem apresentar dimensões entre 10 e 50 nm³. Já em pastas nas primeiras idades e com alta relação a/c estes vazios podem apresentar dimensões de 3 a 5 μm. (Silva, 2013)

Este ensaio foi fundamentado na Especificação técnica do LNEC E393 (1993) Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade. E as alterações adotadas estão detalhadamente descritas.

Na ausência de provetes nas dimensões recomendadas, foi utilizado o mesmo formato utilizado nos demais ensaios, cilíndrico de 50mm de diâmetro por 100mm de altura. O procedimento de ensaio foi realizado conforme as recomendações e serão descritas na sequência.

Procedimento de ensaio:

- Os provetes foram secos em estufa, a uma temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$ por 14 dias, onde passaram a apresentar massa constante a partir do 5º dia. Após esta etapa, foram mantidos no ambiente laboratorial até atingirem a temperatura do ambiente e suas massas neste estágio registradas como M_0 ;
- Foram colocados sobre suportes dentro de um tabuleiro plano;
- Neste tabuleiro foi instalado um dispositivo que permite a manutenção do nível de água e estabeleceu-se um recobrimento dos provetes de 5 ± 1 mm. Todo o conjunto foi coberto por uma campânula e permaneceu estável até os horários de ensaio.
- Foram realizadas as medições das massas dos provetes nos tempos de 3, 6, 24 e 72 horas a partir da colocação em contato com a água. Para a pesagem, os provetes foram retirados dos suportes, escorridos e mantidos em repouso sobre base não absorvente por 60 ± 5 segundos. Esta massa foi registrada como M_i .

A determinação da absorção de água por capilaridade foi calculada pela fórmula:

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A} \quad 3.11$$

onde:

A_c é a absorção de água por capilaridade [g/mm²];

M_0 é a massa do provete seco em estufa [g];

M_i é a massa do provete submetido ao ensaio no tempo i [g];

A é a área da superfície inferior do provete [mm²].

3.2.7.4 Condutividade térmica

A condutividade térmica (λ) é uma propriedade física fundamental dos materiais, principalmente ao se tratar de materiais de construção civil. Sendo a diferença entre a temperatura das faces opostas do material a unidade, a condutividade térmica expressa a quantidade de calor que pode transmitido por material, em regime estacionário, por unidade de espessura, unidade de área e unidade de tempo, resultando em Wm⁻¹K⁻¹. (Stancato, 2000)

Como objetivo deste trabalho, foi aprofundado o estudo da condutividade térmica das argamassas em cada um dos traços estudados em que se variou a proporção de agregado natural fino substituído por partículas de PET e a relação em massa de cimento/agregado nas misturas.

Para tanto, foi adotado o método do Fio Quente com arranjo cruzado fundamentado nas recomendações da norma NBR ISO 8894-1 (2014) e indicado para materiais com condutividade térmica inferior a 1,5 Wm⁻¹K⁻¹. Segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005) o valor da condutividade térmica de uma argamassa comum é de 1,15 Wm⁻¹K⁻¹. A expectativa era que a argamassa com polímero tenha desempenho isolante melhor o que uma argamassa comum, o que se justifica a aplicação deste método.

Conforme uma corrente constante atravessa o fio imerso no provete, uma quantidade de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada e se propaga pelo material. Essa potência dissipada pelo fio gera campos de temperatura, cujas isoterms são superfícies cilíndricas no interior do material ensaiado. A variação da temperatura em um ponto no fio resistor está diretamente relacionada com a resistência do fio, da intensidade da corrente que o atravessa e da condutividade térmica do provete. (Stancato, 2000)

O método implica algumas simplificações físicas como: o material de composição do fio é infinitamente mais condutor que o material a ser ensaiado; a fonte de calor é ideal; o provete tem dimensões infinitas; e a quantidade de calor gerada pela resistência, por unidade de tempo e por unidade de comprimento se

propaga exclusivamente pelo material no qual se pretende determinar a condutividade térmica. (Santos, 1988)

O experimento em si é um método dinâmico que consiste no registro gráfico do aumento da temperatura *versus* o logaritmo do tempo, de uma linha de calor, em regime não permanente, envolta pelo material a ser estudado. A Figura 3.7 exemplifica o resultado de um ensaio e a condutibilidade térmica do material pode ser obtida a partir do cálculo do coeficiente angular do trecho linear do gráfico.

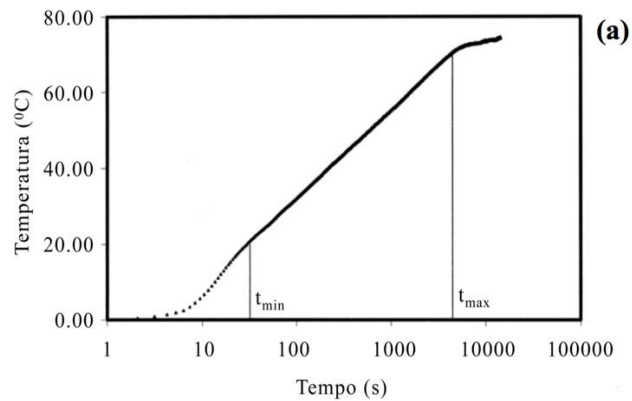


Figura 3.7 – Perfil da variação da temperatura para o método do fio quente (Santos, 2002).

Apesar das simplificações, na prática, a fonte de calor (fio quente) não é ideal, possui alguma capacidade térmica e há certa resistência de contato. Portanto, o trecho inicial do gráfico não é linear. A amostra não é infinita e depois de certo tempo, passa a trocar calor com o ambiente, portanto o trecho final do gráfico também é não linear. Desta forma, é possível estabelecer os tempos máximos e mínimos do ensaio. (Santos, 2002)

Em posse do gráfico e definidos o intervalo em estudo, a condutividade térmica pode ser calculada de acordo com a fórmula indicada na NBR ISO 8894-1 (2014):

$$\lambda = \frac{P_i}{4\pi} \times \frac{\ln(t_2/t_1)}{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1} \quad 3.12$$

onde:

λ é a condutividade térmica do material [$Wm^{-1}K^{-1}$];

P_i é a energia elétrica inserida por unidade de comprimento para o fio quente [Wm^{-1}];

t_1 e t_2 são os tempos definidos que delimitam o trecho linear da curva [s];

$\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ são os aumentos de temperatura em relação à ambiente nos tempos t_1 e t_2 [°C].

Para a composição do arranjo experimental (Figura 3.8), fez-se uso dos provetes cilíndricos de mesmas dimensões como utilizados em outros ensaios. A fonte de tensão tinha como característica a estabilização da tensão ou da corrente elétrica para tal arranjo. Como fio quente foi utilizado um fio kanthal DS 24 com 0,51mm de diâmetro e resistência de 6,583 Ω/m . Para medição da temperatura foi utilizado um multímetro ICEL modelo MD1002 conjugado a um termopar tipo K NiCr-NiAl.

O provete foi cortado ao meio em sua maior dimensão, foram feitas ranhuras para o embutimento da resistência e do termopar em uma das faces de forma que a ranhura tivesse espessura muito próxima a do fio. As duas faces do provete foram unidas com auxílio de uma pasta feita com o resíduo resultante do corte do provete, misturado com água e 2% de dextrina.

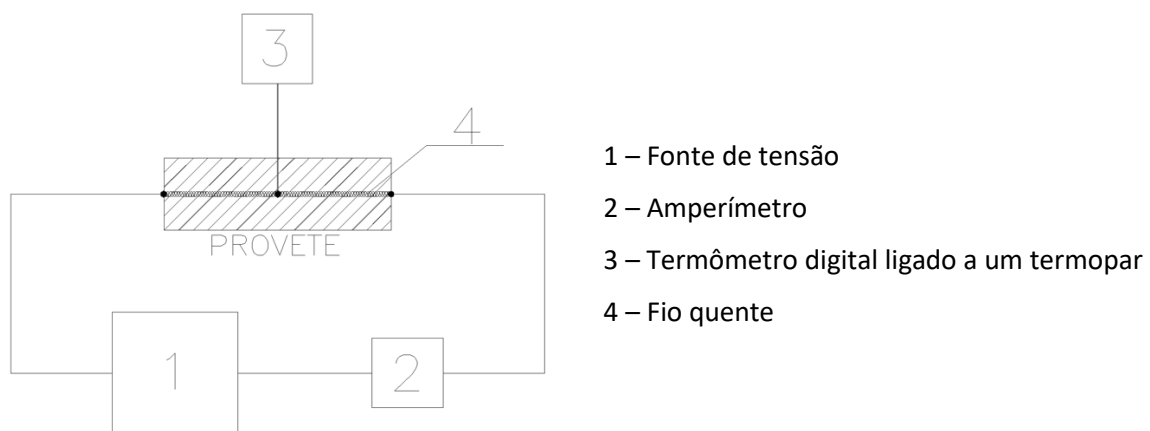


Figura 3.8 – Esquema simplificado de montagem do ensaio.

3.2.8 Ensaios ao betão no estado fresco

Os ensaios ao betão no estado fresco foram realizados no intervalo entre a amassadura e a moldagem dos provetes. Com base nos objetivos propostos, foram realizados apenas os ensaios de abaixamento e de determinação da massa volúmica.

3.2.8.1 Ensaio da determinação do abaixamento do tronco de cone

O ensaio de determinação do abaixamento do tronco de cone nos permite determinar a consistência do betão fresco.

Para este ensaio, seguiu-se as recomendações da norma NP EN 12350-2 (2009). Fez-se uso de um molde para moldar o provete, de dimensões: diâmetro da base de 200 mm; diâmetro do topo de 100 mm; e altura de 300 mm.

O molde foi humedecido e preenchido numa superfície horizontal em três camadas com aproximadamente um terço da altura do molde. Cada camada foi compactada com 25 golpes com o varão de compactação. Então, o molde foi retirado verticalmente. Após sua retirada, o abaixamento foi determinado.

3.2.8.2 Massa volúmica fresca

A determinação da massa volúmica para o betão nos permite analisar e comparar as alterações ocasionadas pelos diferentes traços quanto à sua densidade.

Este ensaio foi realizado com base nas recomendações da norma NP EN 12350-6 (2009). Utilizou-se um recipiente plástico calibrado de 3,9 l, preenchido em 3 camadas. Em cada camada foram aplicados 20 golpes com um varão de compactação. A face superior foi nivelada e arrasada com o auxílio de uma régua.

A massa volúmica pôde ser calculada através da fórmula:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad 3.13$$

onde:

D é a massa volúmica fresca [kg/m³];

m_1 é a massa do recipiente vazio [kg];

m_2 é a massa do conjunto recipiente e amostra compactada [kg];

V é o volume do recipiente [m³].

3.2.9 Ensaio ao betão no estado endurecido

Os ensaios ao betão no estado endurecido foram analisados pelo comportamento dos compostos de diferentes traços e sua evolução às idades de 7, 14 e 28 dias.

3.2.9.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial nos permite determinar a resistência à compressão dos diferentes traços de betão.

Este ensaio foi realizado com base nas recomendações da norma NP EN 12390-3 (2011). Utilizou-se provetes cilíndricos de dimensões 100mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foi selecionada uma velocidade constante de aplicação de carga de 0,6 MPa/s na máquina de ensaio.

A resistência à compressão é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad 3.14$$

onde:

f_c é a resistência à compressão [MPa] (N/mm²);

F é a carga máxima à rotura [N];

A_c é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada [mm²].

3.2.9.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração nos permite determinar a resistência à compressão diametral para os diferentes traços de betão.

Este ensaio foi realizado com base nas recomendações da norma NP EN 12390-6 (2011) que muito se assemelha à ABNT NBR 7222 (20011). Na prática do ensaio, as normas só se diferem pela geometria do provete utilizado. Utilizou-se provetes cilíndricos de dimensões 100mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após a retificação das superfícies irregulares, o provete foi inserido no aparelho de ensaios e foi seleccionada uma velocidade constante de aplicação de 0,05 MPa/s (N/mm².s).

A resistência à tração por compressão é dada pela equação:

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi L d} \quad 3.15$$

onde:

f_{ct} é a resistência à tração por compressão [Mpa];

F é a carga máxima [N];

L é o comprimento da linha de contato do provete [mm];

d é a diâmetro do provete [mm].

3.3 ESTUDO DE ARGAMASSAS

Como etapa necessária para se construir um estudo completo da utilização de PET como agregado em betões, o estudo do comportamento de argamassas nessas condições mostra-se essencial. Ao investigar o comportamento de argamassas pode-se encaminhar as melhores relações e taxas de proporção de materiais que auxiliarão na dosagem do betão.

3.3.1 Composição

Na tentativa de compor encontrar um ponto ótimo de substituição de agregado natural por PET, fixou-se um espalhamento em 180 ± 10 mm e a relação água cimento foi obtida como consequência do espalhamento. Foram desenvolvidos três traços base com relação em massa de cimento e agregado de 1:2, 1:3 e 1:4. Sendo a areia substituída em taxas de 10% e 20% em cada um dos traços conforme o Quadro 3.6.

Alterando-se a relação Cimento/Agregados o objetivo foi de encontrar a composição com menor consumo de cimento, maior consumo de plástico e melhor desempenho nos ensaios analisados visando sua aplicabilidade.

Quadro 3.6 - Traço em massa para execução de argamassas

Cimento/Agregados	Amostra	Cimento	Areia	PET	a/c
1:2	AC	1	2	0,0	0,44
	A10	1	1,8	0,2	0,47
	A20	1	1,6	0,4	0,50
1:3	BC	1	3	0	0,61
	B10	1	2,7	0,3	0,66
	B20	1	2,4	0,6	0,74
1:4	CC	1	4	0	0,76
	C10	1	3,6	0,4	0,83
	C20	1	3,2	0,8	0,92

Conforme nomeadas acima, as amostras AC, BC e CC não contém PET em sua composição e se configuram como a amostras de controlo para comparação de resultados.

3.4 ESTUDO DE BETÕES

O estudo do comportamento de betões com porções de agregado fino substituído por PET se sucedeu com base nos resultados preliminares do estudo de argamassas com os mesmos princípios. Desta forma, optou-se por uma composição de argamassa e, conseqüentemente, a inserção de uma porção de agregado grosso em proporção ideal.

3.4.1 Composição

O estudo de argamassas gerou muitos resultados que podem ser interpretados de diferentes formas. A influência na resistência à compressão, a alteração da massa volúmica ou na condutividade térmica não convergem para uma só aplicação possível.

Tendo em vista promover uma continuidade do estudo das argamassas, optou-se por não desconsiderar a característica nativa do betão que é resistir a esforços de compressão. Desta forma, a série de traços de argamassas aplicadas à dosagem do betão escolhida foi a que menos influenciou negativamente na resistência à compressão axial da argamassa.

A Série A de argamassas foi a determinada a fundamentar a dosagem do betão. Esta Série compreende uma proporção de 1:2 de cimento e agregado respetivamente. A partir de então definiu-se uma dosagem de betão na proporção de 1:2:3 de cimento, agregado fino e agregado grosso respetivamente. O resíduo de embalagens PET foi empregado na substituição do agregado fino devido às suas características físicas nas taxas de 10% e 20% assim como nas argamassas.

Para os betões, ao contrário do aplicado em argamassas, optou-se por fixar uma relação a/c, conforme Quadro 3.7, e estudar a alteração da variação do traço pela aplicação do resíduo de PET na trabalhabilidade do mesmo.

Quadro 3.7 - Traço em massa para execução de betões

Cimento/ Agregado fino/ Agregado Grosso	Amostra	Cimento	Areia	PET	Brita	a/c
1:2:3	DC	1	2	0,0	3	0,53
	D10	1	1,8	0,2	3	0,53
	D20	1	1,6	0,4	3	0,53

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item serão tratadas as características físicas e mecânicas do aglomerante hidráulico, dos agregados naturais e do PET empregados em toda a campanha experimental. São informadas as características cedidas pelos fornecedores, doravante denominadas características nominais, e em seguida as características obtidas pelos ensaios e procedimentos já citados.

4.1.1 Aglomerante hidráulico

O aglomerante hidráulico utilizado em todos os ensaios foi o cimento Portland composto, CP II – Z 32. Este cimento composto é constituído de 6 a 14% de material pozolânico (Z), até 10% de fíler calcário e confere nominalmente uma resistência à compressão axial de 32 MPa aos 28 dias de idade. Foi obtido em sacos de 20kg, de mesmo lote, produzidos e armazenado de acordo com a Norma Técnica Brasileira NBR 11578 (ABNT, 1997).

O cimento Portland pozolânico é obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos que contém elevado teor de sílica reativa e, na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio trabalhando para impedir a reação alcali-agregado. O Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 correlacionam as características deste cimento composto e as Normas Técnicas Brasileiras reguladora dos índices apresentados.

Quadro 4.1 - Correlação entre especificações de ensaios físicos e Normas Técnicas Brasileiras em que estão contidas para CP II-Z-32 (Fonte: <http://cimento.org/cp-ii-z-32-cimento-portland-composto-com-pozolana/>, adaptado)

Ensaio Físico	Unidade	Especificação	Norma Técnica Brasileira
Tempo de início de pega	h	≥ 1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega	h	≤ 10	NBR NM 65
Finura da peneira #200	%	$\leq 12,0$	NBR 11579
Expansibilidade a quente	mm	$\leq 5,0$	NBR 11582
Resistência à compressão 3 dias	MPa	$\geq 10,0$	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias	MPa	$\geq 20,0$	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias	MPa	$\geq 32,0$	NBR 7215

Quadro 4.2 - Correlação entre especificações de ensaios químicos e Normas Técnicas Brasileiras em que estão contidas para CP II-Z-32 (Fonte: <http://cimento.org/cp-ii-z-32-cimento-portland-composto-com-pozolana/>, adaptado)

Ensaio Químico	Unidade	Especificação	Norma Técnica Brasileira
Perda ao fogo	%	$\leq 6,5$	NBR 5743
Resíduo insolúvel	%	$\leq 16,0$	NBR 5744
Trióxido de enxofre – SO ₃	%	$\leq 4,0$	NBR 5745
Óxido de magnésio - MgO	%	$\leq 6,5$	NBR 9203

4.1.2 Origem e características nominais dos agregados empregados

Juntamente com os agregados utilizados, são cedidas informações sobre as características nominais dos mesmos. O resíduo de garrafas de PET são processados por uma indústria beneficiadora e seu controle de qualidade é rigoroso. No caso dos agregados naturais, é implícita uma maior margem de tolerância devido à natureza da indústria e porque os materiais obtidos são de uso comum, sem ressalvas quanto a um rigoroso controle de qualidade.

4.1.2.1 Resíduo de Poli(etileno Tereftalado)

Um consenso na literatura sobre o assunto é que a forma e a característica hidrofóbica das partículas de PET influenciam diretamente no comportamento do composto cimentício. Desta forma procurou-se empregar PET com partículas pequenas para que o efeito da dificuldade de contato entre os componentes pudesse ser atenuado.

O resíduo de embalagens PET utilizado foi obtido em uma indústria de beneficiamento de materiais recicláveis. Denominado “flocos de baixa granulometria” ou “Pó de PET”, conforme Figura 4.1, este material é um subproduto do processo de reciclagem de garrafas PET.

Os grânulos do material têm geometria poligonal plana, de formato irregular e com arestas pontiagudas. Segundo o beneficiador, este material já passou por alguns processos industriais de reciclagem. Além de já lavado, é livre de metais e contaminantes como PVC, polipropileno e borracha numa taxa inferior a 50ppm.



Figura 4.1 - Fotografia da amostra de PET utilizada neste estudo.

Menor divisão da escala equivale a 1mm. Fonte: O Autor

4.1.2.2 Agregados Naturais

Foi utilizada areia quartzosa de rio, lavada e com granulometria nominal média. A brita utilizada nos experimentos tem característica de ser calcária e de granulometria passante no peneiro de 12mm.

Todos os agregados naturais são obtidos em sacas de 20kg, as quais são armazenadas em ambiente laboratorial e longe de fontes de humidade. Todos os ensaios utilizaram materiais pertencentes a lotes únicos para evitar possíveis variações nas especificações.

4.1.3 Resultados dos ensaios aos agregados

Em posse das características nominais, projeta-se uma expectativa das características que foram obtidas a partir de experimentos laboratoriais. O resíduo de PET foi categorizado como agregado fino o que compreende sua submissão aos ensaios pertinentes a essa classificação.

As definições de procedimentos de ensaio e as normas aplicadas nesta campanha experimental foram devidamente descritas no Capítulo 3 deste estudo.

4.1.3.1 Composição granulométrica e Módulo de Finura

Após os ensaios de composição granulométrica, foi obtido o Quadro 4.3 e a Figura 4.2 a seguir.

Quadro 4.3 – Distribuição granulométrica dos agregados

Abertura das peneiras (mm)	Brita		Areia média		PET	
	Retido [%]	Acumulado [%]	Retido [%]	Acumulado [%]	Retido [%]	Acumulado [%]
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	9,4	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	49,1	58,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4,8	18,9	77,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2,4	17,2	94,6	0,0	0,0	13,8	13,8
1,2	5,4	100,0	4,9	4,9	50,8	64,6
0,6	0,0	100,0	26,5	31,4	29,2	93,8
0,3	0,0	100,0	38,9	70,3	5,6	99,4
0,15	0,0	100,0	23,6	94,0	0,5	99,9
Fundo	0,0	100,0	6,0	100,0	0,1	100,0
Módulo de Finura	2,8		2,0		3,7	

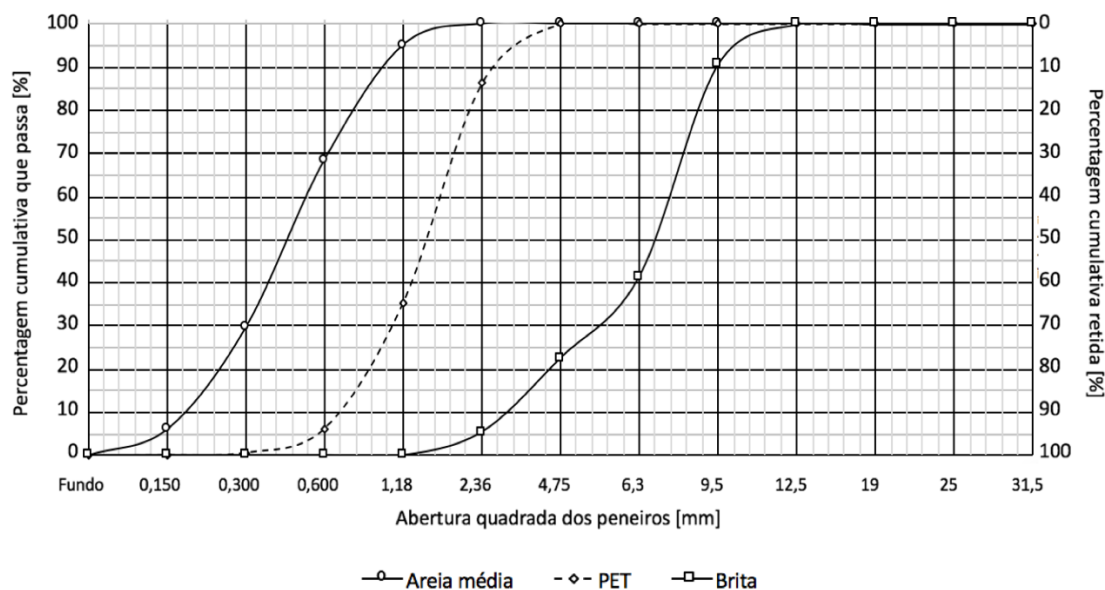


Figura 4.2 - Análise granulométrica dos agregados

Ao observar os gráficos representados na Figura 4.2, é possível constatar que os três materiais, areia média, PET e brita são bem graduados, isto é, possuem boa variedade de diâmetros entre os grãos, apresentando curvas inclinadas e com formas semelhantes.

O PET utilizado foi obtido sob forma de flocos de baixa granulometria, mas ainda assim apresentou uma distribuição granulométrica superior à da areia. O emprego do PET desta granulometria gerou uma continuidade na distribuição granulométrica dos agregados, estando ele num patamar entre a areia média e a brita.

4.1.3.2 Massa volúmica e absorção de água

A partir dos ensaios para massa volúmica, foi obtido o Quadro 4.4 e a Figura 4.3 a seguir.

Quadro 4.4 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados

Agregado	Massa volúmica			Absorção de água
	Impermeável	Seco em estufa	Saturado com superfície seca	
	[kg/m ³]			
Brita	2632	2542	2576	1,35
Areia média	2937	2881	2900	0,67
PET	1222	1208	1220	0,99

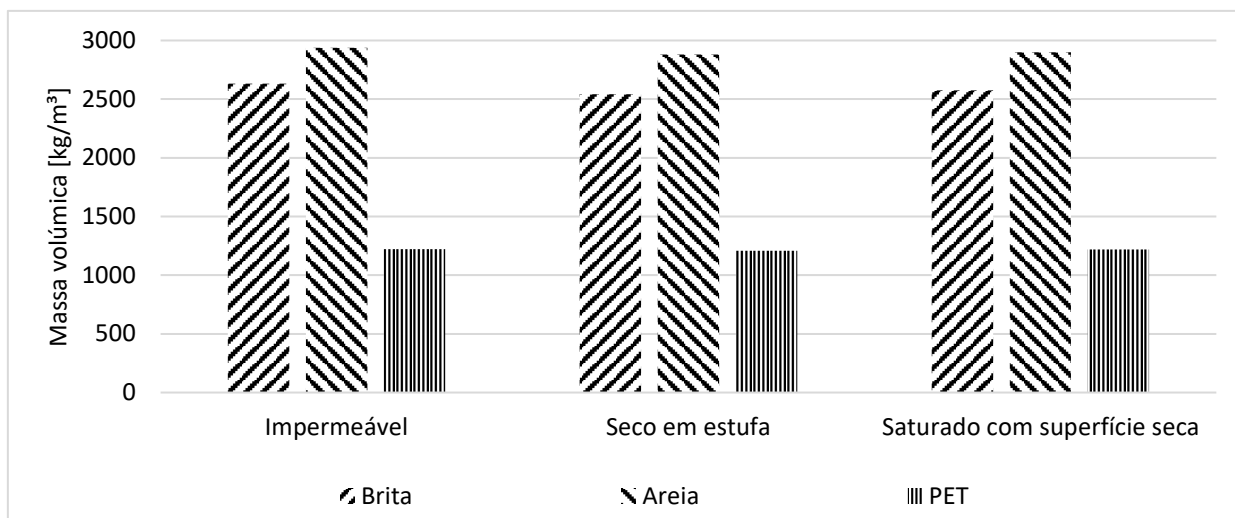


Figura 4.3 - Correlação entre as diferentes massas específicas dos agregados

Ao analisar o Quadro 4.4 e a Figura 4.3, constata-se que as diferentes massas específicas se alteram sensivelmente mais para a brita e, conseqüentemente, esta apresenta um maior índice de absorção de água, seguida do PET e, por fim, a areia média, com o menor índice de absorção de água.

Segundo *GESTIS Substance database* (2017), a massa volúmica nominal do PET à temperatura de 25°C é de 1680kg/m³, o valor da massa volúmica impermeável alcançado pelos ensaios realizados com o PET obtido foi de 1222kg/m³. A diferença de cerca de 27% pode ser creditada às incertezas implícitas nos ensaios, à diferente composição química do material e a possíveis impurezas contidas na amostra.

4.1.3.3 Baridade, volume de vazios e teor de humidade

Conforme os ensaios de baridade, volume de vazios e teor de humidade, o Quadro 4.5 a seguir foi obtido:

Quadro 4.5 - Baridade, volume de vazios e teor de humidade dos agregados

Agregado	Baridade	Volume de vazios	Teor de humidade
	[kg/m ³]	[%]	[%]
Brita	1296	49	0,3
Areia média	1453	50	0,7
PET	412	66	0,2

Os resultados indicam que a maior baridade e teor de humidade correspondem à areia média, e os menores ao PET. No entanto, o PET possui o maior volume de vazios, e a brita o menor.

4.2 ARGAMASSAS

Os ensaios às argamassas tiveram como objetivo analisar o comportamento do composto produzido com determinadas percentagens de areia substituída por resíduo de PET. As amostras de controlo, sem uso de resíduo de PET, foram submetidas a todos os ensaios e nos permite uma comparação direta dos efeitos em estudo.

4.2.1 Massa volúmica

A análise da massa volúmica nos permite confirmar, como já esperado, a diminuição de seu valor com a substituição do agregado natural por PET. Traços mais pobres de cimento apresentaram menor massa volúmica e a maior diferença relativa ocorreu entre os traços das séries A e B. Pode-se também creditar essa variação a necessidade do aumento da relação a/c para a manutenção da trabalhabilidade nos traços mais pobres. O aumento da relação a/c confere maior quantidade de água e menor quantidade de agregados por unidade de argamassa.

Pode-se observar ainda que a substituição da areia por PET gerou uma diminuição da massa volúmica seca quase proporcional à taxa substituída (Quadro 4.6). Comportamento também observado por Lima (2012).

Apesar de o agregado plástico apresentar valor de apenas 41,9% da massa volúmica seca da areia, sua aplicação às taxas de 10% e 20% traduziu-se nesta relação aproximadamente linear como pode-se observar nas Figuras 4.4 e 4.5.

Quadro 4.6 – Massa volúmica seca e a variação percentual relativa aos traços de controlo de cada série.

Cimento/ Agregados	Amostra	Massa volúmica húmida	Massa volúmica aparente seca[kg/m ³]	Diminuição percentual da massa volúmica aparente seca [%]
1:2	AC	2350	2298	0,0
	A10	2127	2029	11,7
	A20	1970	1877	18,3
1:3	BC	2124	2045	0,0
	B10	2014	1898	7,2
	B20	1866	1708	16,5
1:4	CC	2123	1977	0,0
	C10	2062	1829	7,5
	C20	1926	1650	16,5

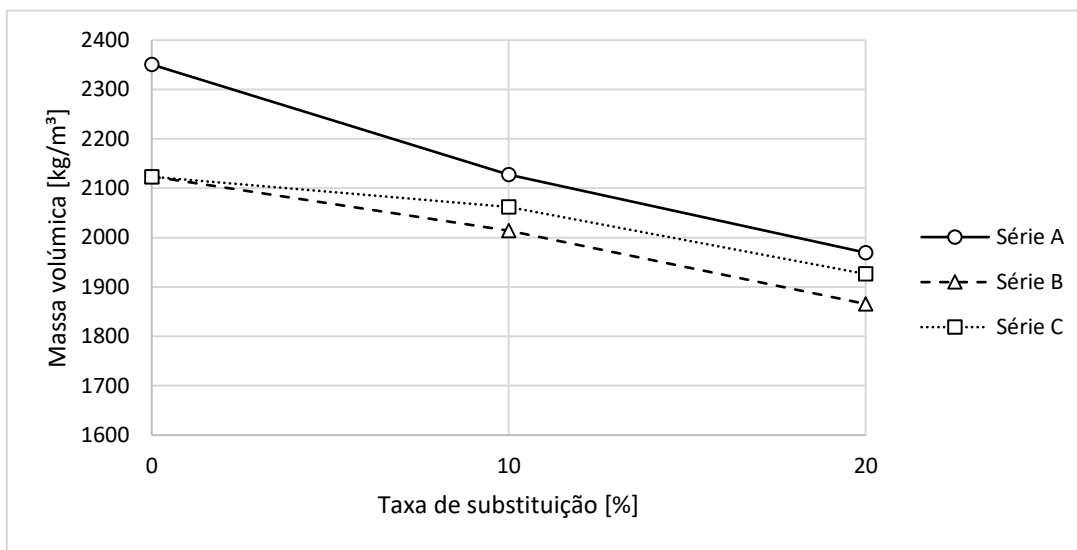


Figura 4.4 - Comparação entre massas volúmicas húmidas dos provetes.

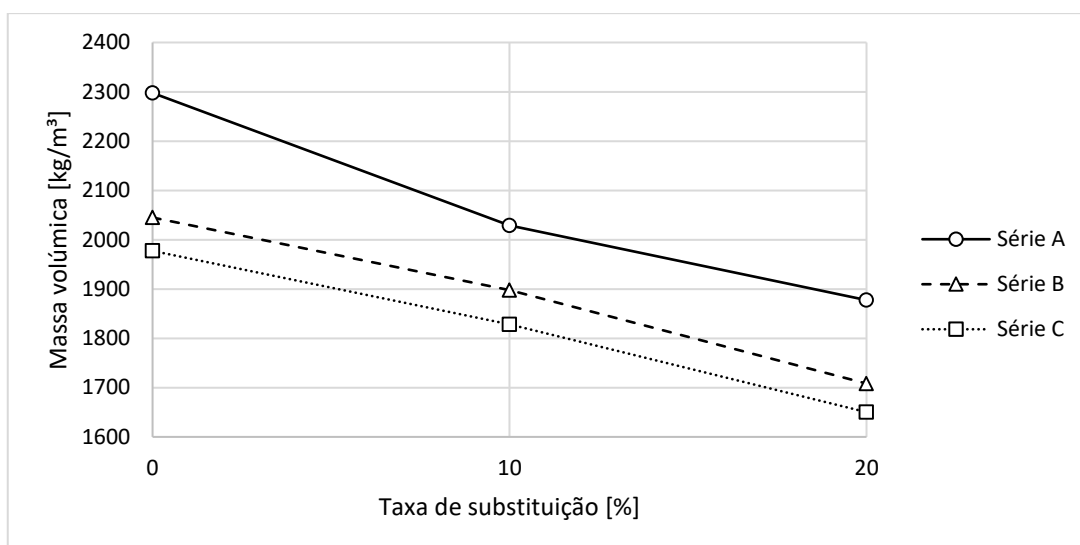


Figura 4.5 - Comparação entre massas volúmicas seca dos provetes aos 28 dias de idade.

4.2.2 Resistência à compressão axial

Realizou-se o ensaio de compressão axial nos conjuntos de provetes dos três traços base (A, B e C), e em suas respectivas variações com 10% e 20% de substituição de areia por PET. Analisaram-se as idades de 7, 28 e 56 dias de forma a melhor compreender a curva de crescimento de resistência e validar os efeitos das alterações do traço em estudo. Os resultados estão apresentados no Quadro 4.7 e na Figura 4.6.

Quadro 4.7 – Resistência à compressão axial de argamassas (f_{cm}) [MPa]

Cimento/Agregados	Amostra	7 dias	28 dias	56 dias
1:2	AC	28,9	33,8	38,5
	A10	21,2	23,4	25,0
	A20	16,2	19,3	19,7
1:3	BC	18,7	22,8	25,1
	B10	13,7	16,7	16,8
	B20	9,0	10,5	10,9
1:4	CC	11,1	14,1	18,3
	C10	7,2	8,1	8,7
	C20	6,1	7,6	8,1

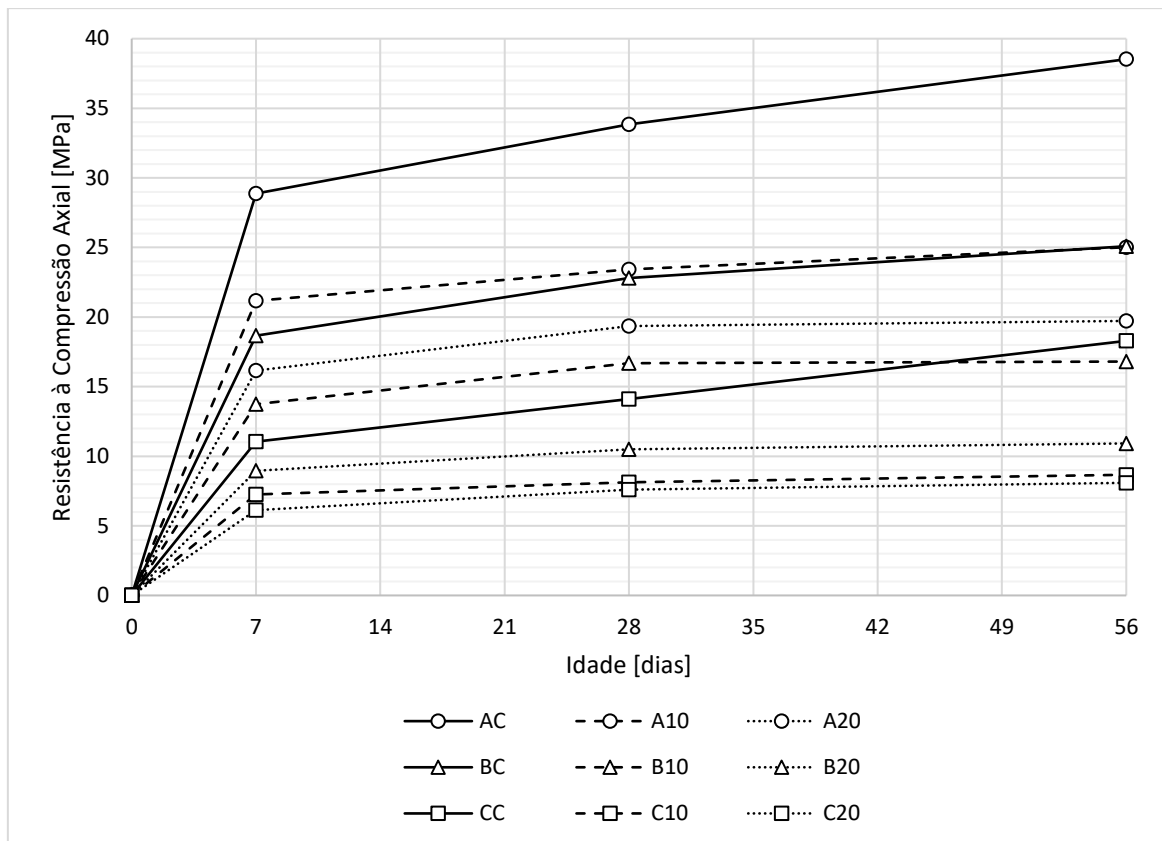


Figura 4.6 - Resistência à compressão axial das amostras de argamassa

Assim como em outros estudos semelhantes, os traços de controlo desenvolveram resistência à compressão normal sempre superiores que seus respectivos traços modificados. Pode-se observar nos ensaios, que o agregado plástico não aderiu à pasta cimentícia, tornando-se assim um elo fraco quanto à resistência a compressão. Pode-se creditar este comportamento à característica hidrofóbica do plástico que, em análise macroscópica, não interagiu com os demais componentes da argamassa para formar um composto sólido mecanicamente homogêneo. Os problemas de aderência entre o agregado e a matriz cimentícia geram consequências negativas diretas na resistência à compressão do composto (Comby-Peyrot *et al.*, 2009).

Observa-se ainda que os traços de controlo apresentam um crescimento elevado e quase linear entre as idades de 7 e 56 dias, o que tende a não ocorrer nos traços modificados, que desenvolvem elevada resistência relativa nas primeiras idades e passam a apresentar um lento crescimento de resistência à partir de então. Essa característica também foi observada por Albano *et al.* (2009) e por Akçaözöğlü, Atiş e Akçaözöğlü (2010). Desta forma, os resíduos de PET aceleraram a hidratação do cimento, conferindo às amostras menor resistência, mas rápido desenvolvimento desta.

O uso de resíduos plásticos impõe uma necessidade de aumentar a relação a/c para a manutenção do parâmetro de trabalhabilidade. E, esta água em excesso não é consumida pela reação de hidratação do

cimento, criando assim canais a nível de capilares que diminuem a resistência do composto. Choi *et al.* (2005)

A diminuição da resistência à compressão axial não apresentou uma relação proporcional com a massa de areia substituída por PET. Os valores apresentados no Quadro 4.8 exemplificam que a substituição de 10% ou 20% não geraram perdas de resistência à compressão proporcionais em nenhum dos traços base estudados. A variação da percentagem de perda de resistência à compressão entre os traços com 10% e 20% de substituição aos 28 dias foi de 12,0%, 23,5% e 3,2% para os traços das séries A, B e C respetivamente comprovando a não linearidade. Os traços da série B, a série intermediária, apresentaram a maior sensibilidade à substituição e a maior perda de resistência em relação ao respetivo traço de controlo.

Quadro 4.8 – Perda percentual de resistência à compressão axial

Cimento/Agregados	Traço	7 dias	28 dias	56 dias
1:2	AC	0	0	0
	A10	26,7	30,8	35,1
	A20	44,1	42,8	48,8
1:3	BC	0	0	0
	B10	26,4	26,8	33,0
	B20	52,0	54,0	56,5
1:4	CC	0	0	0
	C10	34,5	42,3	52,6
	C20	44,6	46,0	55,8

4.2.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de capilaridade foi executado nos provetes de cada um dos diferentes traços com idade de 28 dias e sob contato com água nos tempos de 3, 6, 24 e 72 horas.

A dimensão e o volume dos poros podem ser conectados à relação água/cimento, à qualidade da hidratação e são importantes na interação do composto com o meio externo podendo propiciar maior vulnerabilidade aos ataques externos em ambientes agressivos.

Como se pode observar no Quadro 4.9 e nas projeções gráficas das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, a variação das taxas de absorção de água por capilaridade não se desenvolveu como esperado. Naturalmente, se

esperava o resultado em ordem crescente, ou seja, o traço de controlo apresentando a menor taxa, seguido pelos traços com 10% e 20% de substituição.

Mas, em todas as séries, os traços com 10% de substituição apresentaram taxas de absorção inferiores aos traços de controlo nos tempos 3, 6 e 24 horas. No tempo de 72h, os resultados se encaminharam para a ordem esperada. A única exceção ocorreu na série A, a de traços mais ricos em cimento, onde o traço com 10% de substituição apresentou uma taxa de absorção de água por capilaridade, no tempo de 72h, equivalente à do traço de controlo da mesma série.

Ademais, comparando-se os traços de mesma característica, de séries diferentes, pode-se também ordenar as séries. Sendo de menor taxa a A, seguida pela B e série C.

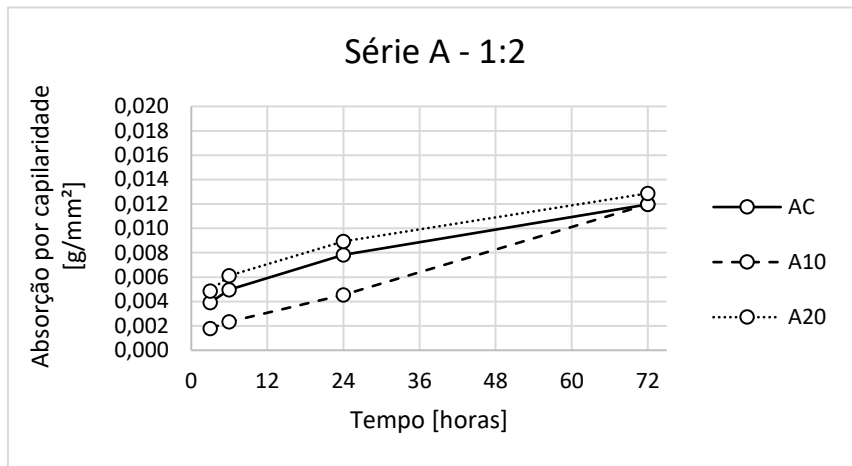


Figura 4.7 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série A.

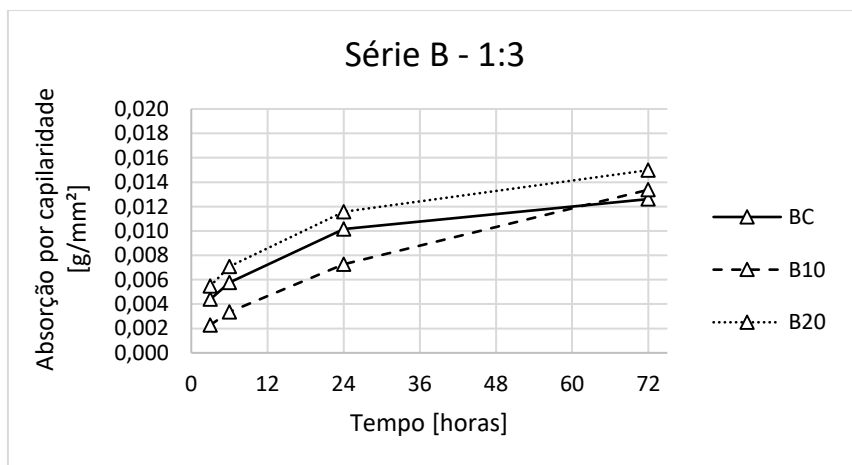


Figura 4.8 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série B.

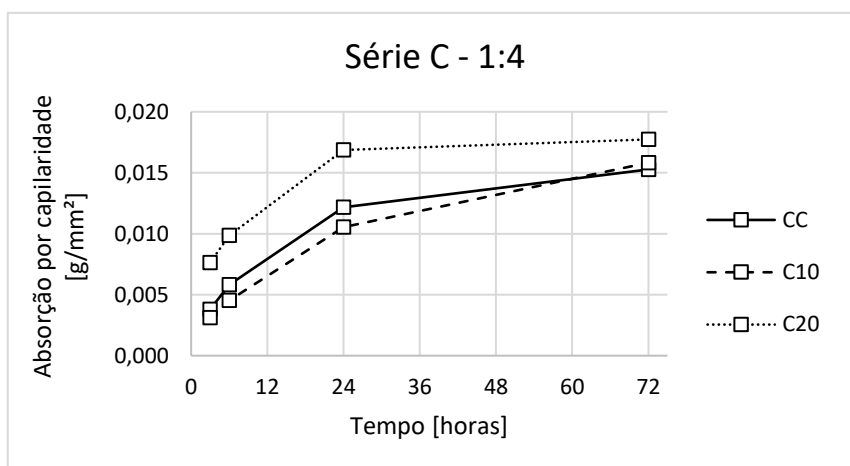


Figura 4.9 – Projeção gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade de cada traço da série C.

Quadro 4.9 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade de cada traço

Cimento/Agregados	Amostra	Absorção por capilaridade [g/mm²]			
		3 horas	6 horas	24 horas	72 horas
1:2	AC	0,004	0,005	0,008	0,012
	A10	0,002	0,002	0,005	0,012
	A20	0,005	0,006	0,009	0,013
1:3	BC	0,004	0,006	0,010	0,013
	B10	0,002	0,003	0,007	0,013
	B20	0,005	0,007	0,012	0,015
1:4	CC	0,004	0,006	0,012	0,015
	C10	0,003	0,005	0,011	0,016
	C20	0,008	0,010	0,017	0,018

Pode-se relacionar os resultados de absorção de água por capilaridade a massa volúmica de cada traço. Quanto maior a massa volúmica maior a absorção de água por capilaridade. Mas há limites não alcançados por este trabalho, onde a quantidade e a dimensão dos vazios deixam de contribuir com a ascensão capilar de água.

Albano *et al.* (2009) propõe que os agregados influenciam a porosidade do composto de duas formas: proporcionando uma porosidade característica e alterando a pasta de cimento. O agregado fino de PET

cria ainda uma porosidade característica diferente da porosidade criada pela areia devido à sua forma geométrica, o que justifica a variação da porosidade conforme a substituição da areia.

4.2.4 Condutividade térmica

O estudo da condutividade térmica de argamassas produzidas com algum tipo de resíduo de PET é inédito até então. Desta forma não foram encontradas publicações para que seja possível uma comparação e análise direta entre resultados. Para tanto, estudos e recomendações normativas de assuntos que acercam o tema serviram para fundamentar as análises dos resultados

O ensaio de condutividade térmica foi realizado em provetes de todos os traços e com ao menos 28 dias de idade. A aplicação do método do Fio Quente com arranjo cruzado adaptado da norma NBR ISO 8894-1 foi bem-sucedida mostrando consistência desde os primeiros ensaios.

Por ser um ensaio com procedimentos de curta duração, ocorre uma minimização da possível interferência causada pelo fator humidade, de presença relevante em materiais porosos. E, quanto mais longo o ensaio e a exposição à alteração das temperaturas internas, maior será a possibilidade de redistribuição da humidade na matriz porosa que pode acarretar distribuições não uniformes do calor sobre o corpo. (Stancato, 2000)

O ensaio compreende pouca dispersão de dados nas representações gráficas das curvas de Temperatura *versus* Tempo como se pode observar nas Figuras de 4.10 a 4.18. Mas as curvas se comportaram como esperado o que possibilitou uma interpretação realista dos resultados.

Com a aplicação de uma energia elétrica constante e conhecida por unidade de comprimento de fio resistor, mediu-se a temperatura no interior provete com todos os instrumentos imersos no mesmo material da amostra. Com base nas curvas, determinaram-se os tempos de início e fim do trecho linear e em posse de todos estes dados, alimentou-se a fórmula que nos permite determinar a condutividade térmica de cada amostra.

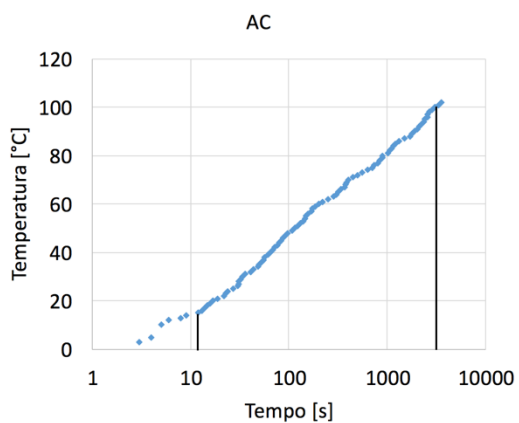


Figura 4.10 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série A (1:2).

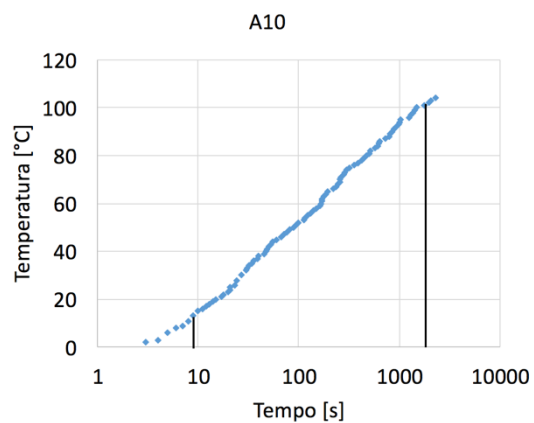


Figura 4.11 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série A (1:1,8:0,2).

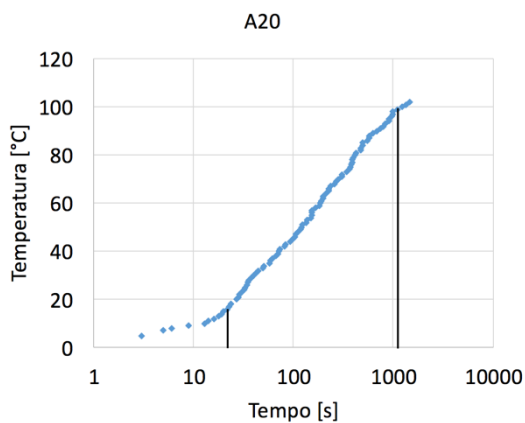


Figura 4.12 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série A (1:1,6:0,4).

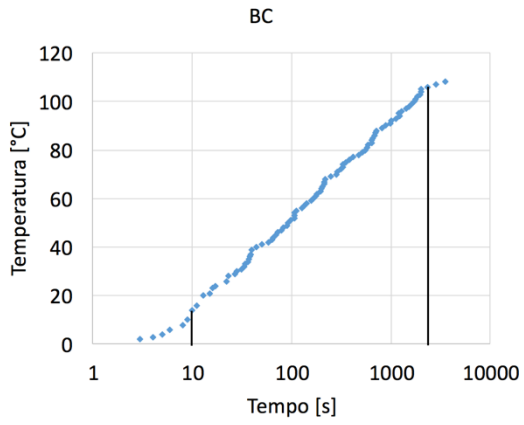


Figura 4.13 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série B (1:3).

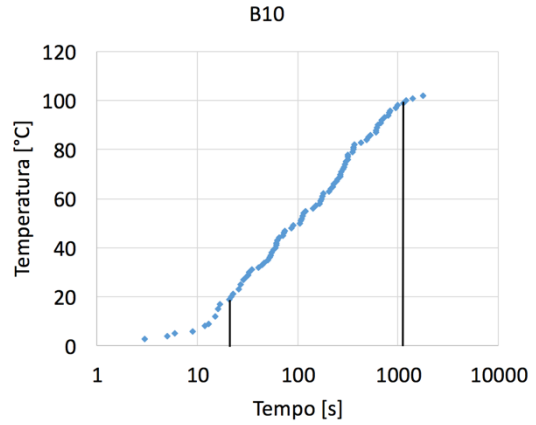


Figura 4.14 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série B (1:2,7:0,3).

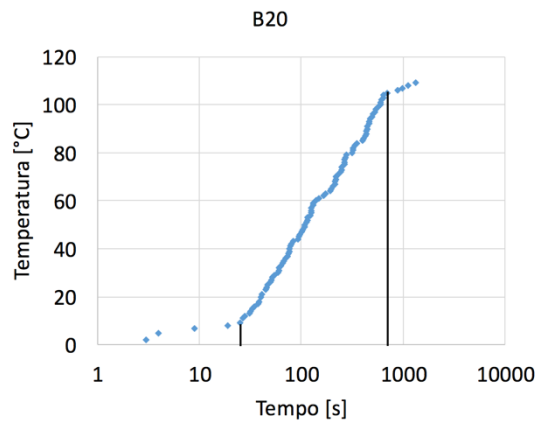


Figura 4.15 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série B (1:2,4:0,6).

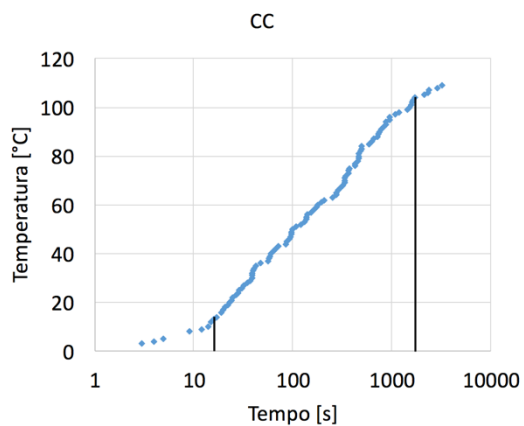


Figura 4.16 – Temperatura vs Tempo – Argamassa de controle da Série C (1:4).

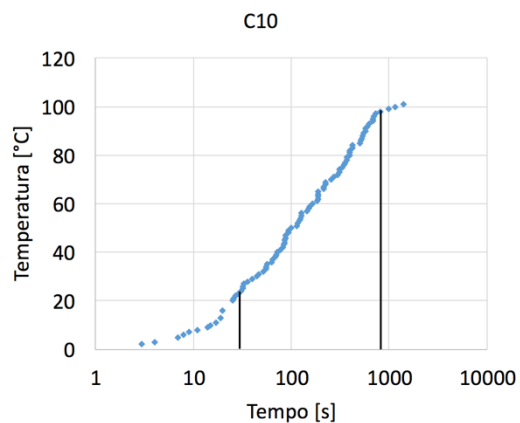


Figura 4.17 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 10% de substituição de areia por PET da Série C (1:3,6:0,4).

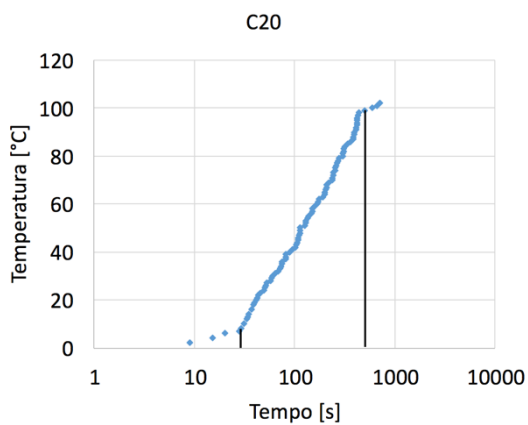


Figura 4.18 – Temperatura vs Tempo – Argamassa com 20% de substituição de areia por PET da Série C (1:3,2:0,8).

A condutividade térmica, calculada segundo a equação 3.12 contida no item 3.2.7.4 desta dissertação, de cada amostra apresentou curva semelhante à própria massa volúmica e à absorção de água por capilaridade. Confirmando o pressuposto que a condutividade térmica está diretamente ligada a porosidade do material, conforme se pode observar na Figura 4.19. Tendo o resultado em ordem, quanto maior a quantidade de PET empregado e menor a quantidade de cimento, maior a porosidade e consequentemente menor a condutividade térmica do material.

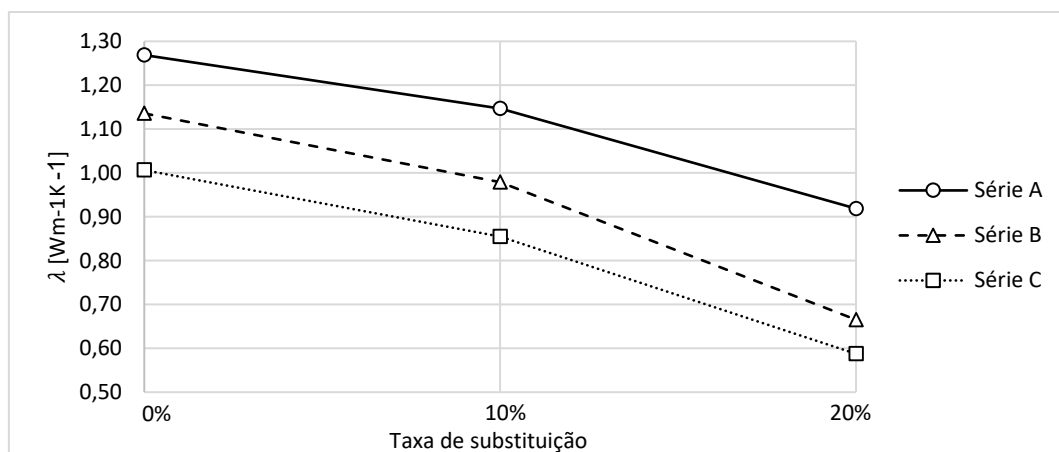


Figura 4.19 – Comparação entre os valores de condutividade térmica determinados para cada série e para cada taxa de substituição de areia por PET.

Segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), a condutividade térmica de uma argamassa comum, de massa volúmica entre 1800 e 2100 kg/m³, é de 1,15 Wm⁻¹K⁻¹ e de uma argamassa celular, de massa volúmica entre 800 e 1000 kg/m³, é de 0,4 Wm⁻¹K⁻¹. Considerando que o objetivo era conferir menor valores de condutividade térmica, o segundo pior valor, alcançado pela amostra de traço A10, se enquadrou como argamassa comum, tanto quanto a condutividade térmica quanto à massa volúmica. Observando ainda o Quadro 4.10, a amostra C20, que apresentou o melhor resultado, atingiu o valor de condutividade térmica de 0,59 Wm⁻¹K⁻¹ e apresentou uma massa volúmica de 1650 kg/m³. Projeta-se que desenvolvendo o traço de forma a diminuir a massa volúmica à taxa entre 800 e 1000 kg/m³, possa-se atingir valores inferiores aos considerados para argamassas celulares.

Quadro 4.10 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica e sua correlação com massa volúmica de cada amostra.

Amostra	Pi	t1	$\Delta\theta 1$	t2	$\Delta\theta 2$	λ	Massa volúmica seca
	[Wm ⁻¹]	[s]	[°C]	[s]	[°C]	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	[kg/m ³]
AC	244,953	12,0	15,0	3033,0	100,0	1,27	2298
A10	244,953	9,0	13,0	1505,0	100,0	1,15	2029
A20	244,953	20,0	15,0	1000,0	98,0	0,92	1877
BC	244,953	10,0	14,0	2007,0	105,0	1,14	2045
B10	244,953	17,0	17,0	993,0	98,0	0,98	1898
B20	244,953	25,0	9,0	640,0	104,0	0,67	1708
CC	244,953	15,0	12,0	1734,0	104,0	1,01	1977
C10	244,953	27,0	22,0	725,0	97,0	0,86	1829
C20	244,953	29,0	8,0	437,0	98,0	0,59	1650

4.3 BETÕES

Os ensaios em betões tiveram como objetivo proporcionar uma análise dos efeitos gerados pela substituição de porções de agregado fino por resíduo de embalagens PET. A composição de betão produzida tem como base sua correlata argamassa. Três diferentes traços foram produzidos, um de controle e outros dois com 10% e 20% de substituição de massa de areia por resíduo de PET. O ensaio tem como foco a análise mecânica dos compostos.

4.3.1 Abaixamento do tronco de cone

Como parâmetro à trabalhabilidade da mistura, o ensaio de abaixamento do tronco de cone ou *slump test*, permitiu uma comparação dos diferentes traços quanto à consistência e desta forma identificar a interação entre os agregados naturais e artificiais e a matriz cimentícia em análise macroscópica.

Analisando a Figura 4.20, pode-se concluir que assim como em argamassas, o aumento do emprego de PET gera um aumento da necessidade de emprego de água para a manutenção da mesma consistência nos diferentes traços.

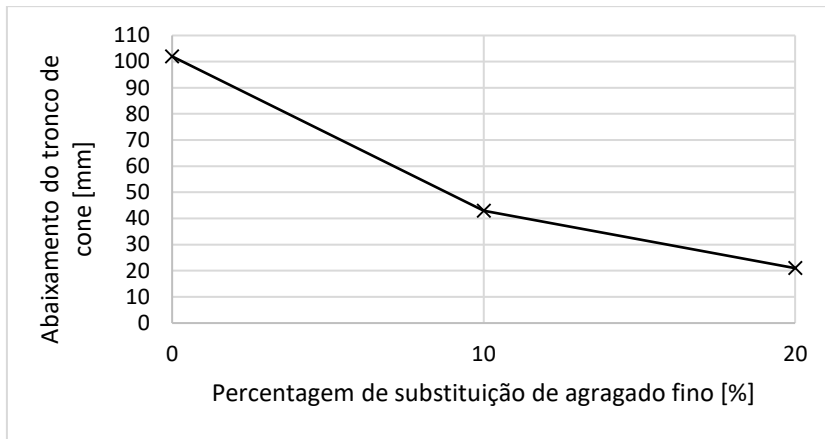


Figura 4.20 – Abaixamento do tronco de cone vs Percentagem de substituição de agregado fino

No traço com 20% de substituição de agregado fino por PET, apesar do abaixamento ser de um valor consideravelmente baixo, notou-se uma certa heterogeneidade da mistura. Característica essa que pode ser atribuída ao formato geométrico dos grânulos de PET e sua característica hidrofóbica.

4.3.2 Massa volúmica fresca

A determinação da massa volúmica fresca nos quantifica os efeitos da substituição do agregado fino por PET. Esperava-se uma diminuição devido à diferença considerável entre a massa volúmica da areia e a do PET.

Assim como esperado e de acordo com o que ocorreu com as argamassas, o emprego de PET ocasionou uma diminuição significativa da massa volúmica da mistura como se pode observar na Figura 4.21.

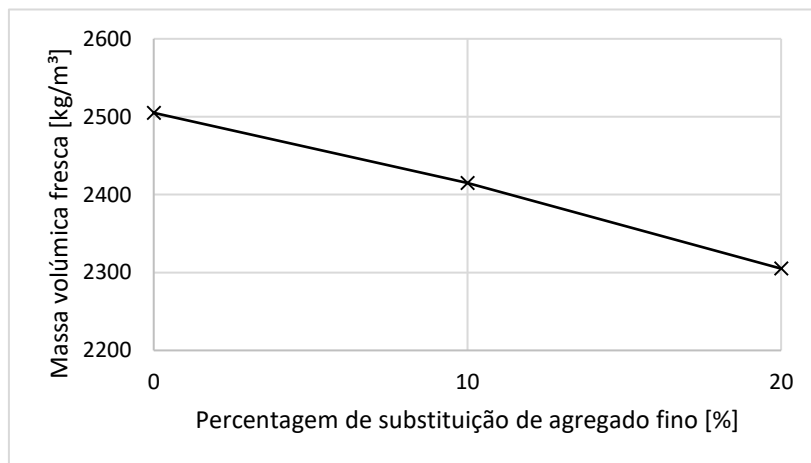


Figura 4.21 – Massa volúmica fresca vs Percentagem de substituição de agregado fino

A diminuição da massa volúmica tem se mostrado como o maior benefício do emprego de PET em substituição da areia. Na determinação da massa volúmica fresca tem-se uma diminuição de cerca de 8% na taxa de 20% de emprego de PET.

4.3.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é o principal parâmetro para desenvolvimento do panorama que envolve todas os efeitos gerados pelo uso do PET. Os ensaios foram realizados nos provetes nas idades de 7, 14 e 28 dias para podermos compreender a curva de cura dos betões.

O betão de controlo apresentou os valores mais altos, seguido pelo composto com 10% e 20% de substituição de agregado fino, conforme Figura 4.22. A diminuição relativa entre o betão de controle e o com 10% foi de aproximadamente 16% e entre o betão de controlo e com 20% de substituição foi de aproximadamente 29% na idade de 28 dias. A perda de resistência à compressão foi significativa e não pode ser desprezada para a justificativa de emprego deste betão em especial.

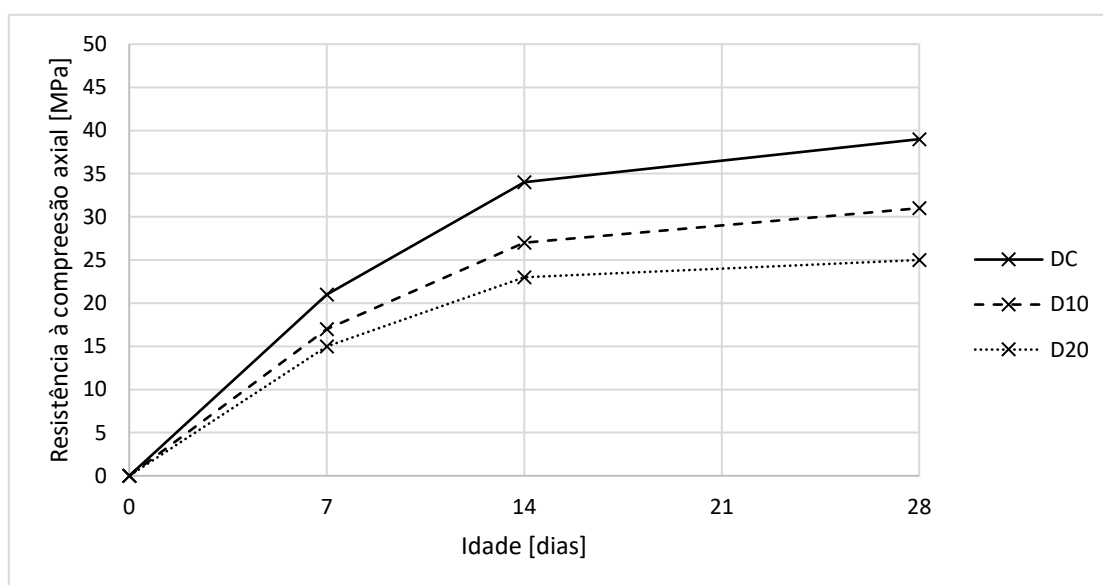


Figura 4.22 – Resistência à compressão axial vs Idade

Diferente dos resultados encontrados por Ismail e AL-Hashmi (2008), os valores encontrados foram mais altos. Pode-se justificar esta alteração devido à adoção de uma substituição de areia por PET em massa, não em volume como em outras campanhas. A substituição em massa implica uma quantidade menor de resíduo de PET por volume de betão e, conseqüentemente, efeitos negativos mais amenos.

4.3.4 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração nos permite analisar o comportamento do betão quando submetido aos seus esforços menos resistentes. Ao aplicar uma força de compressão na direção do diâmetro dos provetes, o betão é levado ao seu limite de resistência e rompe devido aos esforços internos de tração.

O ensaio foi realizado com os provetes na idade de 28 dias e os resultados apresentados na Figura 4.23.

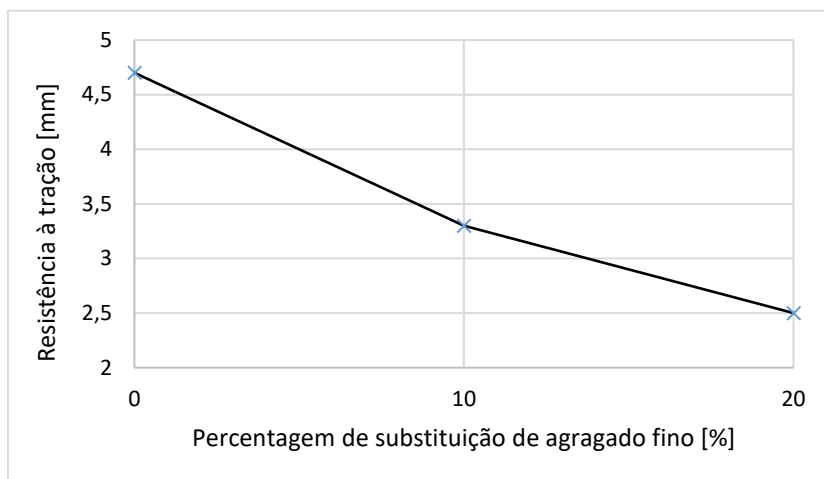


Figura 4.23 – Resistência à tração vs Percentagem de substituição

A diminuição da resistência à tração pode ser justificada pelos mesmos motivos que a diminuição da resistência à compressão axial. A resistência a tração do betão está diretamente ligada a qualidade das ligações entre os agregados e a matriz cimentícia. Apesar de o PET apresentar uma elevada resistência à tração, esta não é mobilizada devida a fraca ligação entre o plástico e a matriz cimentícia. Plano onde ocorre a rotura à tração. (Lima, 2012)

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os produtos resultantes da construção civil são indispensáveis para a sociedade humana. A produção de edificações residenciais, comerciais, industriais, obras hídricas, de infraestrutura e a manutenção de todas elas sempre serão de alguma forma necessárias. Por ser uma grande consumidora de recursos naturais, a indústria da construção civil e todos os ramos por ela englobados têm o dever de inovar em suas técnicas e ser pioneira na utilização de tecnologias ambientalmente responsáveis.

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões alcançadas. Ademais, os resultados foram analisados e a viabilidade de aprofundamento de pesquisas em certos pontos foi levantada. Como sugestões para trabalhos futuros foram propostas linhas de pesquisa que possibilitam o preenchimento de lacunas de conhecimento levantadas ou em algum ponto deparadas, complementando os avanços obtidos por este trabalho.

Espera-se que os resultados contribuam para a consolidação da produção de argamassas e betões com agregados recicláveis sejam eles quais forem. A principal matéria é contribuir para o consumo adequado dos finitos recursos naturais diminuindo os impactos negativos causados pelas ações humanas e consumindo cada vez mais nossos próprios resíduos em cadeias produtivas sustentáveis.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo o estudo dos efeitos do emprego de partículas de PET na produção de argamassas e betões em análises físicas e mecânicas. Ao comparar amostras de controlo com amostras produzidas com alguma parcela de PET montou-se uma perspetiva dos pontos positivos e negativos deste emprego do PET compostos cimentícios.

Frente aos resultados obtido e os avanços já constantes na literatura, pode-se concluir:

- 1- a substituição do agregado fino por resíduo de PET conferiu uma diminuição aproximadamente linear da massa volúmica. Para argamassas a maior diminuição percentual, em relação à amostra de controlo, foi de 18,3% e para betões, esta diminuição foi na ordem de 8,2%. Ambas alcançadas com a taxa de 20% de substituição de agregado fino;

- 2- o uso do PET influencia a interação entre os agregados e a matriz cimentícia. Conforme o aumento do uso do PET, maior a necessidade de água na amassadura para a manutenção da mesma consistência. O excesso de água que não é consumida na hidratação do cimento promove o aumento da porosidade e o enfraquecimento das resistências mecânicas;
- 3- o PET influencia negativamente as características mecânicas das argamassas e dos betões. A diminuição da resistência à compressão não é linear, mas aumenta conforme o aumento da taxa de substituição. Para argamassas, a maior diminuição percentual da resistência à compressão axial, em relação à amostra de controlo, foi de 56,5% e, para betões, esta diminuição foi na ordem de 29%. Ambas alcançadas com a taxa de 20% de substituição de agregado fino. Essa influência motiva um estudo prévio da composição do betão e da argamassa para dosar adequadamente o agregado plástico de forma ao composto suportar o carregamento de uso previsto;
- 4- dosagens que contenham porção significativa de PET tiveram suas resistências mecânicas muito diminuídas. Portanto, por ora, a aplicação destes betões em elementos estruturais não é recomendada. Para que seja indicado o uso em elementos estruturais ou de alta competência, há ainda a necessidade de se verificar os efeitos dessas alterações na composição principalmente quanto à sua durabilidade e à exposição aos meios agressivos;
- 5- a granulometria do PET influencia diretamente o comportamento de todo o composto. Dada sua forma plana, pontiaguda e pouco rugosa, o PET deve ser empregado nas menores dimensões possíveis para que os efeitos da segregação e baixa aderência à matriz cimentícia possam ser atenuados;
- 6- há uma relação entre o aumento do emprego de PET, aumento da porosidade e diminuição da massa volúmica que convergem na diminuição da condutividade térmica das argamassas. Mesmo com uma baixa taxa de substituição, houve resultados positivos. A melhor amostra, série C com 20% de substituição, apresentou condutividade térmica de $0,59\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, valor cerca de 42% menor que a respetiva amostra de controlo. Logo, o uso de PET se mostrou muito promissor nesta propriedade, o que abre um enorme campo de aplicação de argamassas que atuem no desempenho de sistemas isolamento térmico. Por exemplo, no revestimento de painéis de alvenaria em edificações.

O uso do PET trás, em geral, prejuízos ao composto, mas foram detetados pontos que podem ser explorados. No Quadro 5.1, fez-se uma análise qualitativa dos resultados e, a partir disto, pode-se afirmar que os maiores benefícios foram encontrados quanto à diminuição da condutividade térmica e quanto à diminuição da massa volúmica. Dentre as prováveis aplicações imediatas destes compostos cimentícios, pode-se citar: revestimento de fachadas, execução de pisos, produção de blocos, elementos arquitetónicos e mobiliários urbanos.

Quadro 5.1 – Comparação qualitativa das variações apresentadas por cada amostra em relação às suas respectivas amostras de controlo.

Ensaio	Argamassa						Betão		
	Série A (1:2)		Série B (1:3)		Série C (1:4)		(1:2:3)		
	10%	20%	10%	20%	10%	20%	10%	20%	
Consistência	-	--	-	--	--	---	--	---	
Massa volúmica fresca	++	++	+	++	+	+	+	+	
Massa volúmica aparente seca	++	++	+	++	+	++			
Resistência à compressão axial	7d	-	---	-	---	--	---	-	-
	14d							--	--
	28d	--	---	-	---	--	---	--	---
	56d	--	---	---	---	---	---		
Resistência à tração							---	---	
Absorção de água por capilaridade (72 horas)	=	+	=	++	+	++			
Condutividade térmica	+	++	++	+++	++	+++			

Legenda

Consistência: negativa quando há diminuição relativa da trabalhabilidade.

Massa volúmica fresca: positiva quando há diminuição relativa de massa volúmica.

Massa volúmica aparente seca: positiva quando há diminuição relativa de massa volúmica.

Resistência à compressão axial: negativa quando há diminuição relativa da resistência à compressão.

Resistência à tração: negativa quando há diminuição relativa da resistência à tração.

Absorção de água por capilaridade: positiva quando há aumento relativo da absorção de água.

Condutividade térmica: positiva quando há diminuição relativa da condutividade.

Por fim, conclui-se que os objetivos propostos no início desta dissertação foram atendidos. Ao decorrer deste estudo, mostrou-se que é possível uma aplicação prática de betões e argamassas produzidas com parte do agregado natural substituído por resíduos de embalagens PET. Apesar de poucas aplicações, com o aprofundamento dos estudos e o melhor entendimento do comportamento desses betões, é promissora uma futura utilização em maior escala.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação atuou no avanço das pesquisas sobre o assunto contribuindo para o preenchimento de algumas lacunas de conhecimento sobre a utilização de PET para a produção de argamassas e betões. Os avanços se deram principalmente no campo do comportamento mecânico e da condutividade térmica de amostras com parcelas de PET.

No entanto, ainda há necessidade de se aprofundar o estudo de diversos assuntos relacionados com o tema. Desta forma, sugere-se a seguir algumas das possíveis linhas de investigação que representam lacunas de conhecimento encontradas e complementam as conclusões desta dissertação.

- Realizar ensaios de exposição a meios agressivos e de durabilidade com argamassas e betões produzidos com resíduos plásticos;

- Investigar o comportamento mecânico e físico de argamassas e betões produzidos com resíduos de PET com composição granulométrica inferior à da areia;

- Investigar a produção de agregados reciclados de demolição de betões produzidos com agregados plásticos;

- Estudar meios de separação e recuperação do PET da matriz cimentícia após a demolição da peça;

- Investigar a viabilidade financeira da produção de betões com agregados plásticos;

- Analisar o ciclo de vida de plásticos quando empregados como agregados;

- Investigar se o tratamento prévio das partículas de PET com adesivo PVA contribui para a melhora da aderência entre este agregado e a pasta cimentícia;

- Investigar o comportamento de painéis revestidos com argamassas produzidas com PET como agregado fino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET - Reciclagem - Transformação, atual. 2012. [Consult. 12 jun. 2017]. Disponível em:<URL:<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=70>>.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo; NBR 9939/87**. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência; NBR 13276/16**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Cimento Portland composto; NBR 11578/97**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão; NBR 7215/96**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Concreto – ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos; NBR 5739/07**. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova; NBR 5738/08**. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento; NBR 12655/06**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos; NBR 7222/11**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atrase térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações; NBR 15220-2/05**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Execução de concreto dosado em central – Procedimento; NBR 7212/12**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. Materiais refratarios — **Determinação da condutividade térmica Parte 1: Métodos do fio-quente (arranjo cruzado e termômetro de resistência); NBR ISO 8894-1/14**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. Materiais refratarios — **Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico; NBR NM ISO 3310-1/10**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT a - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente; NBR NM 52/03**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT b- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica; NBR NM 248/03**. Rio de Janeiro, 2003.

AGENCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, Departamento De Resíduos *et al.* - **Relatório Anual Resíduos Urbanos 2014**. Amadora, Portugal: Agencia Portuguesa do Ambiente, I.P., Nov. 2015

AKCAOZOĞLU, Semiha; ATİŞ, Cengiz Duran; AKCAOZOĞLU, Kubilay - An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. **Waste Management**. . ISSN 0956053X. 30:2 (2010) 285–290. doi: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.

ALBANO, C. *et al.* - Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 29:10 (2009) 2707–2716. doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.

ALMEIDA, Marconi Oliveira de et al. **Uso de Areia de PET na Fabricação de Betões**. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, 2004. Florianópolis: Ictr, 2004. p. 4415 - 4424.

BANNACH, Gilbert *et al.* - Efeitos da historia térmica nas propriedades do polímero PET: Um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**. 2011) 1825–1829.

BARAO, Mariana Zanon - Embalagens para produtos alimentícios. **Instituto de Tecnologia do Paraná-TECPAR. Curitiba**. 2011.

BATAYNEH, Malek; MARIE, Iqbal; ASI, Ibrahim - Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 27:12 (2007) 1870–1876. doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.026.

CANELLAS, Susan S. - Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassa. Rio de Janeiro. Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005 Mestrado.

CHOI, Yun-Wang *et al.* - Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. ISSN 00088846. 35:4 (2005) 776–781. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.014.

COMBY-PEYROT, Isabelle *et al.* - Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale. Application to the alkali-silica reaction. **Computational Materials Science**. ISSN 09270256. 46:4 (2009) 1163–1177. doi: 10.1016/j.commat.2009.06.002.

DIRECAO-GERAL DO AMBIENTE DA COMISSAO EUROPEIA - **Documento de Trabalho dos Serviços da Comissão. Avaliação da aplicação da legislação ambiental da UE. Relatório sobre Portugal**. Bruxelas: [2010]

DOS SANTOS, W. N. - O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície (The hot wire method: the hot wire parallel technique and the hot wire surface technique). **Cerâmica**. 48:306 (2002) 306.

EUROPEAN UNION; EUROSTAT. **Environmental statistics and accounts in Europe**. Luxembourg: EUR-OP, 2010.

FERREIRA, Luis; BRITO, Jorge; SAIKIA, Nabajyoti - Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. **Construction and Building Materials**. ISSN 09500618. 36:2012) 196–204. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098.

FRIGIONE, Mariaenrica - Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 30:6 (2010) 1101–1106. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.

GESTIS Substance database - GHS-Sicherheitsdatenblatt (GHS Material Safety Data Sheet), Sigma-Aldrich. Disponível em:<URL:[http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)>.

HAMASSAKI, Luiz Tsuguo; dos SANTOS, Rafael Francisco Cardoso – Soluções Inovadoras – Corpos de Prova. **Notícias da Construção**. 2013

HANNAWI, Kinda; KAMALI-BERNARD, Siham; PRINCE, William - Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 30:11 (2010) 2312–2320. doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.028.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2008**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 1097-3 - **Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Parte 3: Determinação da baridade e dos vazios**. IPQ, Lisboa, 2002.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 1097-6 - **Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água**. IPQ, Lisboa, 2016.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 12350-2 - **Ensaios do betão fresco: Parte 2: ensaio de abaixamento**. IPQ, Lisboa, 2009.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 12350-6 - **Ensaio do betão fresco: Parte 6: massa volúmica**. IPQ, Lisboa, 2009.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 12390-3 - **Ensaio do betão endurecido: Parte 3: resistência à compressão de provetes**. IPQ, Lisboa, 2011.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 12390-6 - **Ensaio do betão endurecido: Parte 6: resistência à tração por compressão dos provetes**. IPQ, Lisboa, 2011.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE - NP EN 933-1 - **Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração**. IPQ, Lisboa, 2014.

ISMAIL, Zainab Z.; AL-HASHMI, Enas A. - Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 28:11 (2008) 2041–2047. doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.

KARAGIANNIDIS, Panagiotis G.; STERGIU, Anagnostis C.; KARAYANNIDIS, George P. - Study of crystallinity and thermomechanical analysis of annealed poly(ethylene terephthalate) films. **European Polymer Journal**. . ISSN 00143057. 44:5 (2008) 1475–1486. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.02.024.

KOU, S. C. *et al.* - Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. **Waste Management**. ISSN 0956053X. 29:2 (2009) 621–628. doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - LNEC E-393 - **Betões: determinação da absorção de água por capilaridade**. LNEC, Lisboa, 1993.

LIMA - **Comportamento ao fogo de betões produzidos com agregados de resíduos plásticos seleccionados**. Lisboa. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2012 Mestrado.

MODRO, Neilson Luiz Ribeiro - **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET**. Joinville - RS: Universidade da Região de Joinville, 2008 Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos.

ODIAN, George G. - **Principles of polymerization**. 4. ed ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 978-0-471-27400-1.

ONU. **World Urbanization Prospects - The 2014 Revision**. New York: United Nations, 2015.

PEREIRA, Rita De Cassia Campos; MACHADO, Andrea Horta; SILVA, Glaura Goulart - (Re) Conhecendo o PET. **Química Nova na Escola. Química na Sociedade**. 15 (2002) 3–5.

PRADO, Maecelo Real - **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007 Tese de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos.

RAYNAUD, Julie *et al.* - **Valuing plastic: the business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry**. ISBN 978-92-807-3400-3.

REMADNIA, A. *et al.* - Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 23:10 (2009) 3118–3123. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.027.

ROMAO, Wanderson; SPINACE, Marcia AS; DE PAOLI, Marco-A. - Poli (tereftalato de etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. 19:2 (2009) 121–132.

SAIKIA, Nabajyoti; BRITO, Jorge DE - Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. **Construction and Building Materials**. ISSN 09500618. 34:(2012) 385–401. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.

SANTOS, Wilson Nunes Dos - **Contribuição ao estudo da condutividade térmica do material cerâmico concreto refratário utilizando a técnica do fio quente com ajuste por regressão**: UNIVERSIDADE DE SAO PAULO, 1988. Disponível em :<URL:https://www.ipen.br/biblioteca/teses/18933.pdf>.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: A review. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1835–1852, 2008.

SILVA, Janaina Salustio Da - **Estudo de concretos de diferentes resistencias a compressao submetidos a altas temperaturas sem e com incorporacao de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013).

SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; SAIKIA, Nabajyoti - Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. **Cement and Concrete Composites**. ISSN 09589465. 35:1 (2013) 23–31. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.

SOARES, Aldo Batista - **Produção de Polietileno Tereftalado Modificado com Glicerol e Derivados**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ago. 2010 Dissertacao de Mestrado em Engenharia Quimica.

STANCATO, Augusto Cesare - **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve**. Campinas - SP - Brasil: Universidade Estadual de Campinas, Fev. 2000. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.