



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

ANSELMO LIMA MELLO

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEAD COMO ALTERNATIVA AOS
AGREGADOS NATURAIS EM ARGAMASSA**

Salvador

2011

ANSELMO LIMA MELLO

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEAD COMO ALTERNATIVA AOS
AGREGADOS NATURAIS EM ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana - MEAU, da UFBA, como requisito para obtenção do grau de grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

Co-Orientador: Prof^a Dra. Vanessa Silveira Silva

Salvador

2011

M527

Mello, Anselmo Lima

Utilização dos resíduos de PEAD como alternativa aos agregados naturais em argamassa / Anselmo Lima Mello. – Salvador, 2011.

173 f. il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

Co-Orientadora: Prof^a Dra. Vanessa Silveira Silva

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2011.

1. Argamassa – Agregado de resíduo plástico. 2. PEAD – agregado leve – argamassa. I. Carvalho, Ricardo Fernandes. II. Silva, Vanessa Silveira. III. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 691

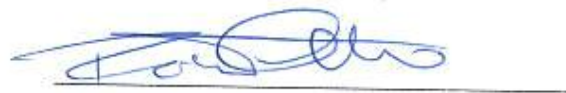
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEAD COMO ALTERNATIVA AOS
AGREGADOS NATURAIS DA ARGAMASSA

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 15 de fevereiro de 2011

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Universidade Federal da Bahia –UFBA



Profa. Dra. Vanessa Silveira Silva
Universidade Federal da Bahia –UFBA



Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves
Universidade Federal da Bahia –UFBA



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
Universidade Federal da Bahia –UFPB



AGRADECIMENTOS

Quero externar meus sinceros votos de gratidão e respeito a todos aqueles que solidariamente ajudaram na construção desse trabalho. Compartilho com estes a alegria desse momento.

Agradeço a Deus, pai querido, pela luz e proteção que me guiaram em mais uma jornada de minha vida.

Aos meus pais, meus irmãos e minha família, pelo incentivo, apoio e companheirismo em todos os momentos dessa caminhada.

Aos Professores Ricardo Fernandes Carvalho e Vanessa Silveira Silva, pela competente orientação e contribuições, as quais foram mais do que relevantes para a qualidade desse trabalho.

Ao MEAU e aos meus Professores do Mestrado, pela minha formação científica e ambiental.

Ao programa PROCAD, da CAPES, na coordenação do Prof. Romildo Dias Toledo Filho, pelo financiamento dessa pesquisa e pela valiosa oportunidade de intercâmbio com outras instituições e pesquisadores.

Aos Professores membros da banca examinadora do projeto e qualificação dessa pesquisa, pelas contribuições dadas.

À Professora Nádia Mamede, pelos conhecimentos adquiridos em ciências dos polímeros e pela inestimável ajuda nos ensaios de caracterização dos materiais.

Ao Prof. Marcos Martinez Silvano, pelo fundamental apoio durante a realização dos ensaios na COOPE-RJ e pelos ensinamentos sobre materiais cimentícios.

Ao Prof. Sandro Machado pela presteza em ajudar em momentos importantes da pesquisa.

Aos técnicos Paulo César de Jesus Santana, Emanuel Rodrigues do Nascimento, Allard Monteiro do Amaral e José Pedro Amich Bessa, e ao Engenheiro Michel Brioude pela colaboração na realização dos ensaios na Escola Politécnica da UFBA.

Ao Sr. Epaminondas, do Instituto de Geociências, pela preparação das amostras, e a Sra. Célia, do Instituto de química da UFBA, pelas análises de MEV/EDX.

Ao Sr. Gustavo Gargioni, da Ecoplásticos Bahia, e ao Sr. Michel Fiorentino, da TRM resinas termoplásticas, pelo fornecimento e processamento do plástico reciclado utilizado nesse estudo.

Aos Srs. Tiago Mamoré e Hugo Beltrão, da Votorantim Cimentos, ao Sr. Leandro Bohn, da Vedacit e as Sras. Monisa Rodrigues e Gisele de Oliveira, da BASF, pelo fornecimento das composições dos materiais utilizados.

A todos, enfim, o meu “muito obrigado” pela participação nesse trabalho.

“É do buscar e não do achar que nasce o que eu não conhecia”

(Clarice Lispector)

RESUMO

O presente estudo objetivou avaliar a utilização de partículas de polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado pós-consumo como alternativa aos agregados naturais da argamassa de cimento. Foram avaliadas as propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa de cimento e areia, tomada como referencia, e com substituição em volume nos percentuais de 10%, 17% e 25% da areia por partículas de PEAD reciclado, mantendo-se a mesma relação água/cimento em todos os traços. O aumento do teor das partículas de PEAD reciclado ocasionou redução da trabalhabilidade da argamassa, com redução da consistência e da retenção de água, embora o teor de ar incorporado tenha aumentado. A resistência mecânica da argamassa com agregado de PEAD reciclado foi inferior à argamassa de referencia em até 33% à compressão, e em até 26% à flexão. Verificou-se um substancial incremento da ductilidade à compressão da argamassa com o aumento do teor de agregados de PEAD reciclado e uma redução de até 58% no módulo de elasticidade. Não foi verificado aumento da tenacidade à flexão da argamassa com substituição da areia e, como revestimento de alvenaria, a argamassa com os maiores teores de substituição estudados não atenderam a todos os requisitos com relação à resistência de aderência à tração, de acordo com a norma NBR 13749/1996. Os resultados desse estudo revelam o uso potencial do polietileno de alta densidade reciclado, no sentido de conferir à argamassa aumento da capacidade de deformação com redução relativamente pequena de resistência à compressão. Dessa forma, espera-se contribuir no campo da pesquisa visando o aproveitamento de resíduos plásticos em compósitos cimentícios.

PALAVRAS-CHVES: Argamassa, resíduo plástico, PEAD, agregado leve, agregado plástico.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the use of particles of high density polyethylene (HDPE) post-consumer recycled as an alternative to natural aggregate in Portland cement mortar. The properties of fresh and hardened mortar, taken as reference, and replacing the volume percentage of 10%, 17% and 25% of the sand particles of recycled HDPE, maintaining the same water/cement ratio in all composites were evaluated. The increased content of recycled HDPE particles caused reduction of the workability of the mortar, with reduction of the consistency and water retention, although the level of entrained air has increased. The mechanical strength of the mortar aggregate of recycled HDPE was lower than the reference mortar up to 33% compression and bending up to 26%. There was a substantial increase in the compressive ductility of the mortar with increasing content of aggregates recycled HDPE and a reduction of up to 58% in modulus. There was no increase in flexural toughness of mortar with sand replacement and, as a lining of masonry, the mortar with the highest levels of substitution studied did not meet all the requirements with respect to the tensile bond strength, according to standard NBR 13749/1996. The results of this study reveal the potential use of recycled high density polyethylene, in order to give the mortar increased deformation capacity with relatively small reduction in compressive strength. Thus, we hope to contribute in research aiming at the use of waste plastic in cementitious composites.

KEYWORDS: Mortar, waste plastics, HDPE, lightweight aggregate, plastic aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia molecular do homopolímero polietileno-----	26
Figura 2 - Tipos de cadeias dos polímeros -----	27
Figura 3 - Estrutura molecular dos polímeros -----	27
Figura 4 – Representação esquemática da cadeia do polietileno-----	28
Figura 5 – Polimerização do PEAD com catalisador Ziegler-Natta nas fases: (a) iniciação; (b) propagação; (c) finalização -----	30
Figura 6 – Embalagens descartadas após festa popular em Salvador-Ba-----	38
Figura 7 - Produção de resinas termoplásticas para fabricação de embalagens-----	38
Figura 8 - Etapas da reciclagem mecânica -----	40
Figura 9 - Linha completa de reciclagem de PE/PP -----	41
Figura 10 - Simbologia para identificação de embalagens plásticas -----	41
Figura 11 - Composição média da coleta seletiva -----	42
Figura 12 - Produção de plástico reciclado pós-consumo -----	43
Figura 13 - Distribuição do mercado de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil -----	43
Figuras 14 - Diferentes alternativas de revestimentos de paredes-----	48
Figura 15 – Ação do tensoativo incorporador de ar (MEHTA e MONTEIRO, 1994)-----	52
Figura 16 – Sistema água-cimento: (a) disperso; (b) floculado -----	52
Figura 17 – Mecanismo de ação dos superplastificantes de 3ª geração -----	53
Figura 18 - Mesa de consistência -----	56
Figura 19 – Intervalos das dimensões dos poros da pasta de cimento endurecida -----	61
Figura 20 – Perfil da relação Ca/Si-----	63
Figura 21 – Perfis Ca/Si do concreto devido à absorção do agregado leve -----	64
Figura 22 – Variação da resistência em função da porosidade da argamassa-----	66

Figura 23 - Ensaio de tração por flexão a quatro pontos-----	67
Figura 24 – Esquema estático do ensaio de flexão a quatro pontos-----	68
Figura 25 – Momento fletor na flexão a quatro pontos-----	68
Figura 26 – Tensões da flexão pura-----	69
Figura 27 - Interação dos fatores que influenciam na resistência do concreto-----	70
Figura 28 – Tipos de ruptura do ensaio de aderência à tração de revestimentos-----	76
Figura 29 – Imagens por MEV da zona de transição: (a) do agregado natural; (b)do agregado leve de PET-----	78
Figura 30 – Comportamento carga-deflexão na flexão do concreto: (a) com 0% de agregado plástico; (b) com 20% de agregado plástico-----	80
Figura 31 – Agregado leve de raspas de tubos de PVC-----	82
Figura 32 – Curva tensão-deformação do concreto de referência e com substituição por agregados de PET-----	83
Figura 33 - Agregados de PET (a) e PC (b)-----	85
Figura 34 – Fluxograma dos ensaios da 1ª fase da pesquisa-----	89
Figura 35 – Fluxograma da 2ª fase da pesquisa experimental-----	91
Figura 36 – PEADr micronizado-----	94
Figura 37 – Aspecto dos traços experimentais com diferentes teores de PEADr. (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%-----	99
Figura 38 – Mesa de consistência, molde e soquete metálico-----	103
Figura 39 - Funil de <i>Buchner</i> e bomba à vácuo-----	105
Figura 40 – (a) Argamassadeira 10 litros; (b) Formas metálicas e mesa vibratória-----	106
Figura 41 – Acondicionamento dos corpo-de-prova: (a) fechamento com filme plástico; (b) cobertura com cobertor úmido-----	107
Figura 42 – Prensa (a) e transdutores instalados (b) do ensaio de compressão axial-----	107
Figura 43 – Prensa (a) e transdutor instalado (b) do ensaio de flexão-----	107

Figura 44 – Esquema do ensaio de flexão	109
Figura 45 – Representação esquemática do módulo de deformação secante	111
Figura 46 – Deformação plástica residual na ruptura	112
Figura 47 – Limites de deslocamento para o cálculo da tenacidade	113
Figura 48 – Ensaio de absorção por capilaridade	115
Figura 49 – (a) Substrato com chapisco; (b) Painéis de argamassa aplicados	116
Figura 50 - (a) corte dos corpos de prova; (b) Pastilhas metálicas coladas; (c) Ruptura por tração	117
Figura 51 – Região da extração das amostras para o ensaio de MEV-EDS	119
Figura 52 – Curvas granulométricas da areia e dos agregados de PEADr	121
Figura 53 – Partícula de PEADr (ampliação 6X)	123
Figura 54 – Curva de DSC do PEADr	124
Figura 55 – Curvas TGA e DTGA da amostra de PEADr	125
Figura 56 – Argamassas no estado plástico: (a) AR; (b) AS-25	127
Figura 57 – Variação do índice de consistência em função do teor de PEADr	128
Figura 58 – Variação do teor de ar incorporado e retenção de água em função do teor de PEADr.	128
Figura 59 – Micrografias das amostras de argamassa: (a)AR (ampliação 41X); (b) AS-10 (ampliação 50X); (c) AS-17 (ampliação 50X); (d) AS-25 (ampliação 50X)	130
Figura 60 - (a)micrografia da matriz da argamassa (aumento 240x); (b) Perfil Ca/Si: areia - pasta de cimento	136
Figura 61 - (a)micrografia da matriz da argamassa (aumento 100x); Perfil Ca/Si: PEADr – pasta de cimento	137
Figura 62 - (a)micrografia da matriz da argamassa (aumento 240x); (b) Perfil Ca/Si: areia – PEADr	138
Figura 63 - (a) Micrografia da matriz da argamassa (aumento 270x); (b) Perfil Ca/Si: areia – areia; (c) Perfil Ca/Si: PEADr – areia	139
Figura 64 - Resistência à compressão	141
Figura 65 - Tensão <i>versus</i> deformação à compressão	141

Figura 66 - Corpos de prova após o ensaio de compressão: (a) AR; (b) AS-10; (c) AS-17; (d) AS-25-----	142
Figura 67 - Deformação plástica na ruptura à compressão-----	144
Figura 68 - Resistência à tração na flexão -----	145
Figura 69 - Tensão versus deslocamento na flexão das argamassas -----	146
Figura 70 - Diagrama carga-deslocamento na flexão-----	147
Figura 71 - Módulo de deformação à compressão das argamassas-----	149
Figura 72 - Absorção capilar em função do tempo -----	150
Figura 73 - Resistência de aderência à tração-----	152
Figura 74 - Densidade de massa no estado endurecido -----	154

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades físicas e mecânicas do polietileno -----	33
Quadro 2 - Classificação da argamassa segundo as suas funções na construção-----	47
Quadro 3 – Classificação da areia quanto ao módulo de finura -----	50
Quadro 4 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas -----	55
Quadro 7 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas-----	72
Quadro 8 – Limites de resistência de aderência à tração -----	75
Quadro 9 – Caracterização química do cimento CP-II-32 RS – 1ª etapa -----	92
Quadro 10 – Caracterização física do cimento CP-II-32 RS – 1ª etapa-----	92
Quadro 11 – Caracterização química do cimento CP-II-32 RS – 2ª etapa-----	93
Quadro 12 – Caracterização física do cimento CP-II-32 RS – 2ª etapa-----	93
Quadro 13 – Características do aditivo plastificante-----	95
Quadro 14 – Características do aditivo superplastificante -----	95
Quadro 15 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados -----	101
Quadro 16 – Parâmetros do ensaio de DSC-----	102
Quadro 17 - Resumo das características dos agregados -----	121
Quadro 18 - Dados da termogravimetria do PEAD -----	125
Quadro 19 – Dados da termogravimetria do PEADr-----	125
Quadro 20 - Volume dos sólidos hidratados e da água na pasta de cimento -----	134
Quadro 21 - Forma de ruptura no ensaio de aderência à tração -----	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de plásticos reciclados -----	45
Tabela 2 - Resultados das propriedades do traços de concreto -----	79
Tabela 3 - Resistências à compressão e à tração dos concretos -----	83
Tabela 4 - Traços experimentais da argamassa na 1ª etapa do estudo -----	98
Tabela 5 - Propriedades da argamassa fresca na 1ª etapa -----	98
Tabela 6 - Traços da argamassa na 2ª etapa do estudo -----	100
Tabela 7 - Granulometria dos agregados de PEADr -----	120
Tabela 8 - Granulometria da areia -----	120
Tabela 9 - Propriedades da argamassa no estado fresco -----	126
Tabela 10 – Conversão do traço em massa para traço em volume -----	133
Tabela 11 - Volumes percentuais dos componentes das argamassas -----	135
Tabela 12 - Resistência à compressão-----	140
Tabela 13 - Deformação plástica-----	144
Tabela 14 - Resistência à tração na flexão -----	145
Tabela 15 - Fatores de resistência à flexão -----	148
Tabela 16 - Percentual de redução do módulo de elasticidade -----	149
Tabela 17 - Coeficiente de capilaridade -----	151
Tabela 18 - Resistência de aderência à tração -----	152

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETA	Centro Tecnológico da Argamassa
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EDS	Espectometria de Dispersão de Energia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PMMA	Polimetacrilato de Metila
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de Polivinila
TGA	Termogravimetria Analítica
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UV	Ultravioleta
TG	Temperatura de transição vítrea
TM	Temperatura de fusão cristalina

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

a/c	Relação água cimento
C	Átomo de carbono
H	Átomo de hidrogênio
O	Átomo de oxigênio
Ti	Átomo de titânio
Cl	Átomo de cloro
Ca/Si	Relação óxido de cálcio óxido de silício
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
μm	Micra
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
Cal	Caloria
g	Gramma
Kg	Quilo
°C	Grau Celsius
cm	Centímetro
s	Segundo
min	Minuto
cm^2	Centímetro quadrado
cm^3	Centímetro cúbico
m^3	Metro cúbico
KN	Kilo Newtons

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	22
1.2 OBJETIVOS	24
1.3 HIPÓTESES	25
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	25
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2. REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 POLÍMEROS	26
2.1.1 Estrutura molecular	26
2.1.2 Classificação dos polímeros	28
2.1.3 Propriedades dos polímeros	32
2.1.4 Aplicações do PEAD	36
2.2 O PLÁSTICO RECICLADO	37
2.2.1 A reciclagem de polímeros	39
2.2.2 O setor de reciclagem de plásticos no Brasil	42
2.2.3 Propriedades mecânicas do plástico reciclado	44
2.3 ARGAMASSA	47
2.3.1 Características gerais	47
2.3.2 Materiais constituintes	49
2.3.3 Métodos de dosagem da argamassa	54
2.3.4 Propriedades da argamassa no estado fresco	54
2.3.5 Estrutura da pasta hidratada	58
2.3.6 Propriedades no estado endurecido	64

2.4 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM AGREGADOS PLÁSTICOS-----	77
2.4.1 Introdução-----	77
2.4.2 Agregado de plástico reciclado em concreto -----	78
2.4.3 Agregado de plástico reciclado em argamassa -----	84
2.4.4 Considerações finais -----	86
3. METODOLOGIA -----	88
3.1 PROJETO EXPERIMENTAL -----	88
3.2 MATERIAIS -----	92
3.2.1 Cimento e areia -----	92
3.2.2 Polietileno de alta densidade reciclado (PEADr) -----	94
3.2.3 Aditivo -----	95
3.3 MÉTODOS -----	96
3.3.1 Dosagem da argamassa -----	96
3.3.2 Caracterização dos materiais -----	101
3.3.3 Caracterização da argamassa no estado fresco -----	102
3.3.4 Caracterização da argamassa no estado endurecido -----	106
4. RESULTADOS E ANÁLISES -----	120
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS -----	120
4.1.1 Cimento -----	120
4.1.2 Propriedades físicas dos agregados -----	120
4.1.3 Análise térmica -----	123
4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO -----	126
4.3 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO --	132

4.3.1 Análise da microestrutura das argamassas-----	132
4.3.2 Resistencia à compressão-----	138
4.3.3. Ductilidade na compressão -----	143
4.3.4 Resistencia à tração na flexão -----	145
4.3.5 Tenacidade na flexão-----	147
4.3.6 Módulo de elasticidade-----	148
4.3.7 Absorção de água por capilaridade-----	150
4.3.8 Resistencia de aderência à tração -----	152
4.3.9 Densidade aparente no estado endurecido-----	154
5. CONCLUSÕES -----	155
5.1 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA-----	157
5.2 SUGESTÕES PARA O TRABALHO FUTURO -----	157
REFERÊNCIAS -----	159
ANEXO 1-----	168

1 – INTRODUÇÃO

O plástico é um material que, transformado sob calor ou pressão, produz uma extensa gama de objetos como embalagens, sacolas, brinquedos, lentes e chapas, garrafas, utensílios domésticos, peças automotivas, possibilitada pela variedade e estágio atual da tecnologia empregada na produção dos polímeros sintéticos. O aumento da quantidade e diversidade dos materiais plásticos descartáveis, dada as suas características de baixa degradabilidade e curta vida útil, são fatores considerados na gestão ambiental das empresas visando a responsabilidade sócio-ambiental (CARDOSO *et al.*, 2007).

Os plásticos ocupam a segunda colocação na quantidade de resíduos sólidos descartados no Brasil. Dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2008), mostram que mais de 20% da coleta seletiva no Brasil é composta por resíduos plásticos que cresce ano a ano. Isto indica um contínuo fornecimento de matéria bruta para as atividades de coleta e separação, um dos fatores de sucesso para o setor de reciclagem de material plástico (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

Para que haja redução no descarte de produtos à base de plástico é conveniente a aplicação em produtos com longa vida útil e a construção civil tem papel importante neste contexto. A construção civil absorve 11,9% dos materiais das indústrias recicladoras de materiais plástico (PLASTIVIDA, 2008). O polietileno tereftalato (PET) tem o maior índice de reciclagem do plástico pós-consumo, seguido do polietileno de baixa e alta densidades.

Estudos têm sido realizados utilizando resíduos plásticos em concretos e argamassas, seja como modificadores da pasta de cimento, ou como materiais inertes, nesse último caso, com função de fibras de reforço ou de agregados. O resíduo pós-consumo mais utilizado experimentalmente foi o de garrafas PET, substituindo a areia percentualmente, em peso ou volume (CHOI *et al.*, 2009; MARZOUK, 2006; CANELLAS, 2005, MODRO *et al.*, 2009). Outros resíduos poliméricos também foram usados, embora em menor número, como o polietileno de alta densidade e o polipropileno (NAIK *et al.*, 1996; ZAINAB *et al.*, 2007). Os resultados indicam uma relativa redução das resistências à tração e à compressão dos compósitos com a adição dos resíduos, aumento do teor de ar incorporado e redução da trabalhabilidade.

Por outro lado, em geral, ocorreram também a redução do peso específico, do coeficiente de absorção de água e do módulo de elasticidade. Desse modo a adição de resíduos poliméricos reciclados em compósitos cimentícios não se restringe apenas na questão ambiental, mas também às possíveis modificações nas propriedades do compósito final. Siddique *et al* (2007) em seu trabalho de revisão sobre o uso de plástico reciclado em concreto apresenta em sua conclusão que esses resíduos podem ser adicionados com sucesso no concreto, em substituição aos agregados convencionais. Apesar da redução da resistência mecânica, a inclusão de plástico reciclado em concreto, entre outros efeitos, reduziu a propagação de fissuras por esforços mecânicos.

Este trabalho propõe avaliar os efeitos da inclusão de partículas de plástico reciclado na argamassa fresca e posteriormente no estado endurecido, com estudo da resistência mecânica e de outras propriedades relevantes considerando a função de revestimento. Para isso, utilizou-se o polietileno de alta densidade pós-consumo, um resíduo polimérico urbano que, apesar de ser um dos plásticos com maior índice de reciclagem mecânica no Brasil, atualmente ainda é pouco conhecido as propriedades da argamassa que os utilizam parcialmente como agregados.

1.1 – JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O estímulo crescente do consumo tem como conseqüências o aumento da diversidade de materiais descartáveis e a redução da vida útil dos produtos. Neste cenário, uma parcela destes produtos são compostos por polímeros sintéticos, com uma considerável inércia química e biológica. Dessa forma o descarte destes produtos constitui um problema ambiental pelo seu acúmulo progressivo nos lixões e aterros. A adoção da política dos 3 R's (redução na fonte, reutilização e reciclagem de diferentes formas) apresenta-se como uma forma de resolução deste problema, sobretudo para as atividades de reciclagem, a qual representa uma alternativa eficaz para o surgimento de matérias-primas alternativas, diminuindo os custos na gestão de resíduos e preservando o meio ambiente (LUCAS e BENNATI, 2008). No caso das embalagens plásticas, com relação a redução na fonte e reutilização, Santos *et al* (2004) apontam dificuldades a serem consideradas para a implementação dessas ações. Uma forma de reduzir a produção de embalagens plásticas seria a substituição por outras com materiais mais duráveis ou com maior capacidade. No entanto, pelo baixo custo, leveza e praticidade das embalagens plásticas, a sua substituição acaba se tornando uma alternativa secundária. Por outro lado, a inércia química dos plásticos proporciona o uso indevido dessas embalagens por seus consumidores, inviabilizando a sua reutilização, pois seriam necessários possessos tecnológicos mais sofisticados, onerando as operações de limpeza.

Do ponto de vista ambiental, a reutilização de resíduos poliméricos, pode ajudar a reduzir os prejuízos decorrentes da disposição desses resíduos, e também dos impactos provocados pela extração de matéria-prima. Dados do plastivida (2008) revelam que no Brasil no ano de 2007 foram reciclados 72 mil toneladas de PEAD pós-consumo ao passo que a produção neste mesmo ano foi de 292 mil toneladas desse material (DATAMARK, 2009). Isto significa um excedente de mais de 200 mil toneladas de embalagens de PEAD não recicladas. Por outro lado Valverde e Tsuchiya (2008) mostram uma produção de 279 milhões de toneladas de areia no ano de 2007.

O consumo interno de areia de acordo com Valverde (2006) é de 50% para a produção de concretos e pré-fabricados e os 50% restantes para argamassas em geral.

A partir dos dados citados e adotando os pesos específicos da areia e do PEAD, 2,63 e 0,96 g/cm³ (Coutinho, 2003), respectivamente, podemos avaliar os impactos positivos causados pela substituição da areia em argamassas por PEAD reciclado.

Admitindo a hipótese da substituição em volume da areia utilizada para a produção de argamassas em geral pela quantidade de PEAD excedente (não reciclado), teremos:

- Volume de PEAD utilizado na substituição da areia em argamassa

$$220.000 \text{ t} \div 0,96 \text{ t/m}^3 = 229.166 \text{ m}^3$$

- Quantidade de areia substituída por PEAD reciclado micronizado

$$229.166 \text{ m}^3 \times 2,63 \text{ t/m}^3 \approx 602.706 \text{ t}$$

Vemos, portanto, que a aplicação de todo excedente de embalagens de PEAD não recicladas em 2007, reduziria em mais de 600 mil toneladas a extração de areia. Isto representaria um incremento de mais de 200% na reciclagem de embalagens de PEAD, o que também mostra a condição da aplicação de resíduos sólidos na construção civil.

No âmbito sócio-econômico, este incremento implicaria na redução da capacidade ociosa das indústrias do setor de reciclagem mecânica de plásticos e, principalmente, teria reflexos positivos na geração de mais empregos pela ampliação da participação de cooperativas de catadores e de mão de obra nos processos de separação e reciclagem de plásticos. Além disso, a reciclagem da totalidade das embalagens de PEAD reduziria os custos provenientes da disposição inadequada destes resíduos.

A proposta contida nessa pesquisa contribui para a área do conhecimento voltado ao aproveitamento de resíduos plásticos como agregado em materiais cimentícios, sobretudo pela utilização de um resíduo ainda pouco estudado com essa finalidade, no caso, o polietileno de alta densidade. Assim, é proposto o estudo de um material de construção não convencional, que, de acordo com Barbosa (2005), é ecologicamente correto, uma vez contribui para livrar o meio ambiente do incômodo da disposição inadequada de resíduos, com emprego intensivo de mão de obra.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.2 – Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo principal estudar as propriedades da argamassa utilizando partículas de polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado pós-consumo como alternativa aos agregados naturais.

1.2.2 – Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa foram necessários o estabelecimento dos seguintes objetivos específicos:

1 – Caracterizar as propriedades físicas e térmicas do PEAD reciclado na região de Salvador.

2 – Empregar um método para a dosagem da argamassa de referência, observando a variação do seu comportamento com o aumento gradativo de partículas micronizadas de polietileno reciclado.

3 – Avaliar a variação das propriedades da argamassa no estado fresco com diferentes teores de partículas de PEAD reciclado, correlacionando com a argamassa de referência.

4 – Avaliar as propriedades da argamassa no estado endurecido com diferentes teores de agregados de PEAD reciclado, correlacionando com a argamassa de referência.

1.3 – HIPÓTESES

A hipótese principal desse estudo foi a viabilidade técnica da utilização dos resíduos de PEAD como agregados em argamassa, produzindo os seguintes efeitos:

- a) Redução do peso específico
- b) Redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade
- c) Redução da absorção de água

1.4 – LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa limita-se ao estudo das propriedades físicas e mecânicas básicas da argamassa de revestimento, utilizando como alternativa aos agregados, partículas de PEAD obtidos de uma indústria de reciclagem de plásticos na região metropolitana de Salvador-Ba

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos contendo os seguintes conteúdos:

Capítulo 1: Apresentação geral do tema, das justificativas e objetivos desse estudo.

Capítulo 2: Revisão teórica sobre polímeros, seus conceitos gerais, propriedades e características do polietileno de alta densidade. Aspectos relevantes e propriedades da argamassa fresca e endurecida.

Capítulo 3: Revisão literária com o resumo dos resultados de estudos anteriores utilizando resíduo plástico como agregado em concreto e argamassa.

Capítulo 4: Descrição do programa experimental, com detalhamento dos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 6: Apresentação das principais conclusões, observando os objetivos propostos, assim como sugestões para futuros trabalhos, de modo a ampliar a área do conhecimento na qual está inserida esta pesquisa.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – POLÍMEROS

Polímero é uma macromolécula composta pela repetição de muitas unidades moleculares básicas, denominadas de *meros* ou monômeros. O grau de polimerização (n) de um polímero é determinado pelo número de meros da presente em sua cadeia. Se há repetição de dois ou mais tipos de *meros*, o polímero formado será um copolímero, como por exemplo, a repetição dos meros estireno e butadieno, na formação da borracha SBR. Quando um único tipo de mero é repetido na síntese de um polímero, este será um homopolímero, como no caso do polietileno, no qual, em sua formação, há a repetição de milhares de unidades básicas, o etileno (figura 1).

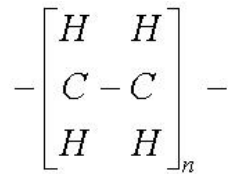


Figura 1: Cadeia molecular do homopolímero polietileno.

2.1.1 – Estrutura molecular

A reação de polimerização promove a união dos monômeros em pontos reativos, formando longas cadeias com arranjos diferentes. As cadeias lineares são formadas pela união de monômeros em uma única direção no espaço, as ramificadas possuem cadeias menores ligadas à cadeia principal de monômeros e as reticuladas ligam-se entre si em diferentes pontos de suas extremidades, conforme a figura 2.

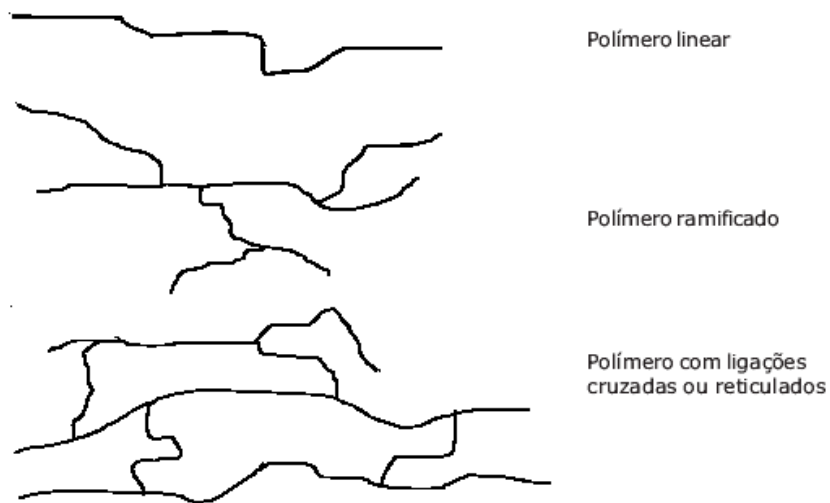


Figura 2: Tipos de cadeias dos polímeros (PIATTI E RODRIGUES, 2005).

Ao número de pontos reativos de uma molécula dá-se o nome de funcionalidade (f). Para que haja a formação das cadeias poliméricas a funcionalidade dos monômeros deve ser maior ou igual a dois. Moléculas com funcionalidade maior ou igual a três produzem uma cadeia tridimensional, com ligações cruzadas, originando um polímero termofixo.

Na estrutura molecular de um polímero no estado sólido podemos distinguir duas fases: Uma amorfa, com as cadeias ordenadas aleatoriamente, e outra cristalina, com o ordenamento linear dos segmentos de cadeia, como mostra a figura 3. Os polímeros semi-cristalinos, àqueles que apresentam fase amorfa e cristalina, são passíveis de serem moldados, por não apresentarem 100% de cristalinidade e elevada organização de sua estrutura (CANDIAN, 2007)

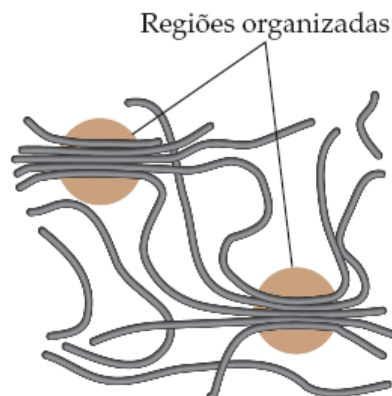


Figura 3: Estrutura molecular dos polímeros (TORRES, 2007).

O grau de cristalinidade influencia muitas propriedades dos materiais poliméricos, por outro lado, fatores estruturais como polaridade das moléculas e a presença de grupos laterais influenciam a linearidade das cadeias, e, por conseqüência, o grau de cristalinidade. À medida que aumenta o grau de cristalinidade de um polímero aumenta sua densidade, como também a rigidez, resistência à abrasão e temperaturas de fusão e de transição vítrea, ao passo que diminuem a resistência ao impacto, alongação na ruptura e claridade óptica.

As condições reacionais da polimerização determinam o arranjo molecular do polietileno, ou seja, o grau de linearidade e de ramificação das suas cadeias. A combinação linear dos monômeros forma uma estrutura cristalina compacta conferindo ao polímero alto peso molecular, enquanto que as cadeias ramificadas, sem definição de orientação, forma a estrutura amorfa. O peso molecular, e conseqüentemente, as propriedades do polietileno são determinadas pela quantidade relativa das cadeias lineares e ramificadas da sua estrutura, e define o grau de cristalinidade. A partir disto, o polietileno classifica-se em dois tipos principais, polietileno de baixa densidade (PEBD) e de alta densidade (PEAD). O PEBD comparado ao PEAD apresenta maior desordem cristalina, devido às ramificações longas que não são bem acomodadas na estrutura cristalina, e, por esta razão, tem menor opacidade, ponto de fusão, densidade e resistência mecânica (COUTINHO, 2003). A figura 4 mostra a representação esquemática da cadeia do polietileno.

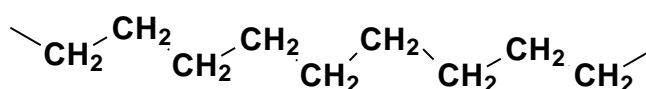


Figura 4 – Representação esquemática da cadeia do polietileno.

2.1.2 – Classificação dos polímeros

Atualmente os polímeros encontram aplicações em diversas áreas pela variabilidade de suas características, possibilitada pelo desenvolvimento científico. Assim, os materiais poliméricos podem ser classificados sob diferentes aspectos.

a) Quanto ao método de preparação

O método de preparação distingue os polímeros pelo tipo de reação de polimerização pelo qual foi sintetizado.

I – Polímeros de adição

De acordo com Machado (2004), a polimerização por poliadição pode acontecer por meio de íons, catalisadores, ou através de radicais livres. Estas reações se desenvolvem passando pelos estágios de iniciação, propagação e terminação.

Na poliadição iônica, a substância iniciadora catiônica ou aniônica promove a anexação das moléculas polares dos monômeros, terminando com a formação de uma ligação dupla do carbono na extremidade da cadeia. Na polimerização por catálise, um catalisador de metal de transição participa das reações de união dos monômeros, sendo eliminado no final. Na polimerização radicalar usa-se um iniciador, geralmente um peróxido com fórmula geral $R-CO-O-O-CO-R$, onde o fornecimento de energia por radiação ou aumento de temperatura rompe a ligação entre dois átomos de oxigênio, gerando dois radicais livres como o tipo $R-CO-O^*$, o qual possui um elétron desemparelhado. Esses radicais, muito reativos, quando se aproxima de uma ligação dupla, uma das ligações é perturbada, um dos elétrons da ligação dupla é atraído para o radical e uma nova ligação simples é formada. Esta etapa constitui a iniciação desse tipo de polimerização.

A figura 5 ilustra a polimerização do polietileno de alta densidade com catalisador heterogêneo do tipo Ziegler-Natta. Na etapa de iniciação (figura 5a) um sal de titânio ($TiCl_3$) é ativado por um composto organometálico de alumínio, formando o catalisador propriamente dito, no qual uma molécula insaturada do monômero é inserida na ligação titânio-carbono. Na etapa de propagação (figura 5b), várias moléculas do monômero são inseridas entre as ligações titânio-carbono, formando a cadeia com n moléculas do monômero. De Paoli (2008) ressalta que há várias propostas para esse processo de catálise e sua finalização e que, em geral, a reação terminará com a quebra da ligação titânio-carbono, surgindo uma ligação dupla do carbono na extremidade da cadeia (figura 5c).

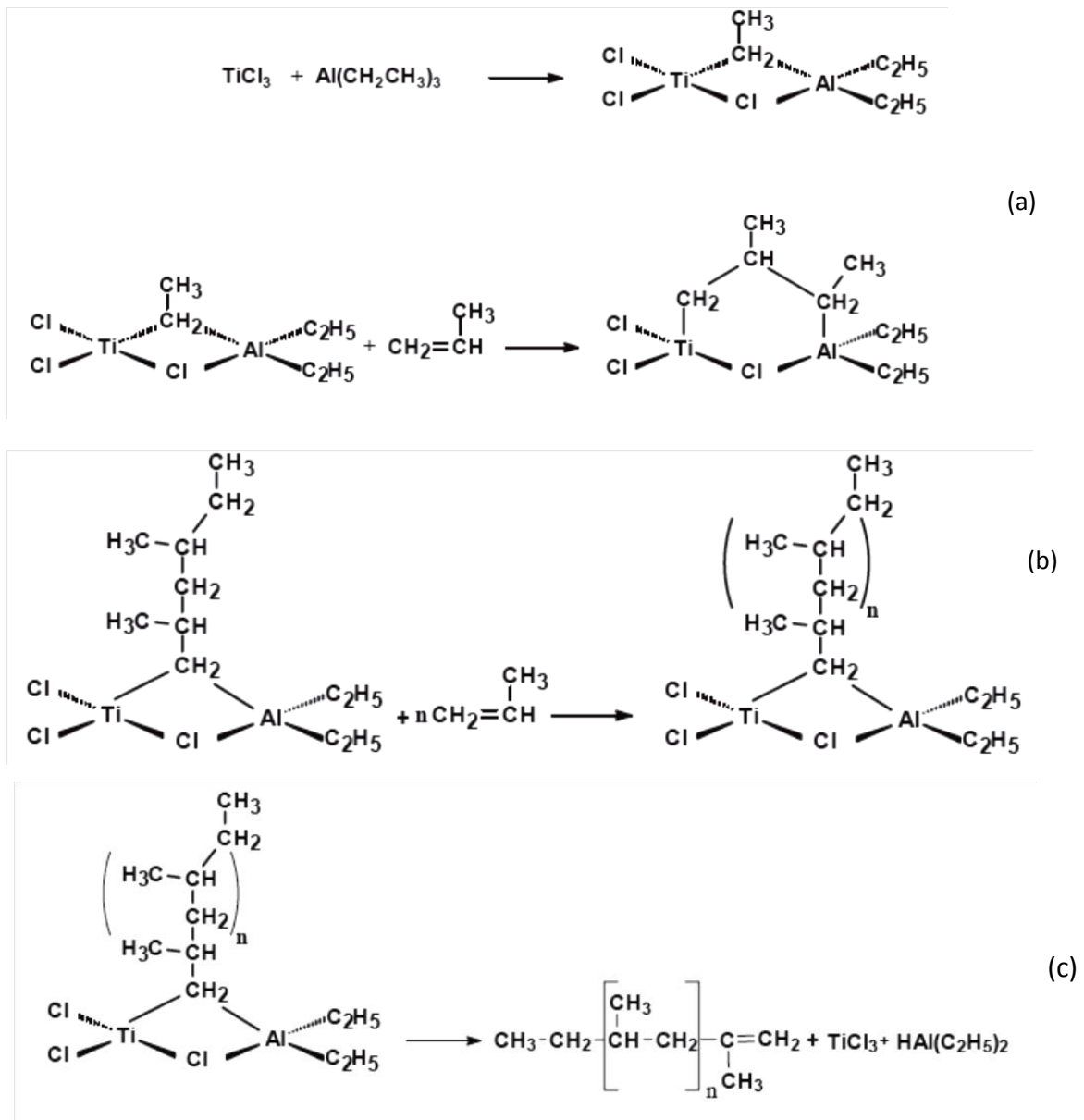


Figura 5 – Polimerização do PEAD com catalisador Ziegler-Natta nas fases: (a) iniciação; (b) propagação; (c) finalização

Segundo Coutinho (2003), inicialmente o polietileno era produzido por polimerização radicalar, em um processo oneroso que necessitava de alta pressão e produzia um polímero com alto grau de ramificação. Com advento dos catalisadores Ziegler-Natta, o polietileno passou a ser produzido em pressões menores, obtendo um polímero bem menos ramificado e com maior ponto de fusão do que os anteriores. Por último, foram desenvolvidos os catalisadores metallocênicos, os quais propiciaram o controle da microestrutura do polímero obtido e, conseqüentemente, das propriedades físicas do produto final. O uso dos catalisadores metallocênicos propiciaram a síntese de produtos à base de etileno com

propriedades diferenciadas, como o polietileno linear de baixa densidade e de ultra baixa densidade.

II – Polímeros de condensação

A polimerização por condensação ocorre pela reação de duas moléculas bifuncionais, e normalmente elimina moléculas de baixa massa molar como subproduto, como a água. Como exemplo, temos a síntese do poliéster.

b) Quanto ao comportamento mecânico

Os polímeros podem ser subdivididos em plásticos, elastômeros e fibras.

I – Plásticos

Material polimérico de alta massa molecular, sólido em temperatura ambiente. São subdivididos em:

- Termoplásticos - Plásticos capazes de fluir ou amolecer quando aquecidos, retornando ao estado sólido quando resfriados. São exemplos de termoplásticos: Polietileno Tereftalato (PET), polietileno de alta densidade (PEAD) e de baixa densidade (PEBD), cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP).
- Termofixos ou termorrígidos - São sintetizados com ligações cruzadas entre as cadeias, tornando-se, após a cura ou endurecimento, infusíveis, insolúveis e não recicláveis.

II – Elastômeros

Elastômeros ou borrachas são materiais poliméricos amorfos com elevada capacidade de deformação à temperatura ambiente

III – Fibras

São termoplásticos orientados longitudinalmente, com uma relação do comprimento pelo diâmetro maior ou igual a cem.

c) Quanto ao desempenho mecânico

De acordo com o desempenho mecânico, os plásticos são assim classificados:

Termoplásticos convencionais: Plásticos de uso comum caracterizado pela alta produção (*commodities*), baixo custo da resina, baixo nível de exigência mecânica e facilidade de processamento. Os polietilenos de alta e baixa densidade, o polipropileno e o policloreto de vinila são exemplos desse tipo de polímero.

Termoplásticos especiais: Possuem um custo levemente superior e características um pouco melhores do que os plásticos convencionais, adequando-se à sua aplicação, como no caso do polimetacrilato de metila (PMMA), com alta transparência

Termoplásticos de engenharia: Possuem propriedades de engenharia como rigidez, dureza, boa resistência mecânica. O PET e o policarbonato são exemplos deste tipo de plástico.

Termoplásticos especiais de engenharia: São plásticos desenvolvidos para atender a um determinado nível de serviço, como o poliéter-éter-cetona, que possui boa estabilidade térmica devido aos anéis aromáticos presentes em sua cadeia.

2.1.3 – Propriedades dos polímeros

Os materiais poliméricos apresentam propriedades que os tornam, em alguns casos, os mais apropriados para determinados usos. Mano (1991) descreve uma série de propriedades dos polímeros e de outros materiais, conforme segue:

I – Propriedades mecânicas

Os polímeros apresentam baixos valores de resistência à tração e à compressão em relação aos materiais de engenharia convencionais. Com exceção do PET, não ultrapassam 100 MPa de resistência à tração, por outro lado apresentam grandes alongamentos na ruptura, como o PEBD, com até 900%. Em geral, o módulo de elasticidade dos materiais poliméricos não excede 5 GPa, bem inferior ao dos materiais cerâmicos e metálicos. O módulo de elasticidade do PEAD é um dos mais baixos entre os polímeros, com cerca de 1

GPa, porém, destaca-se a alta resistência à flexão e ao impacto do PEAD, podendo superar 200 MPa e 250 MPa, respectivamente.

As propriedades físicas e mecânicas do polietileno são muito influenciadas pelo grau de cristalinidade, que é proporcional ao grau de linearidade de suas cadeias, pois este arranjo permite melhor acomodação e compacidade da estrutura molecular, o que significa que o aumento do número de cadeias por unidade de espaço provocado pelo incremento da cristalinidade, aumentará a densidade do polietileno. A acomodação linear das cadeias também propicia maior atração intermolecular, o que explica o aumento da rigidez do polietileno com maior cristalinidade, o que também provocará redução na capacidade de alongamento. A maioria das propriedades térmicas e elétricas não são influenciadas pela cristalinidade do polietileno. No quadro 1 estão apresentadas algumas propriedades do PEAD.

Quadro 1 - Propriedades físicas e mecânicas do polietileno. (COUTINHO, 2003)

PROPRIEDADES	PEAD
Densidade (g/cm ³)	0,950 – 0,968
Temperatura de fusão (°C)	125 – 135
Resistência à tração (Mpa)	20 – 45
Alongamento no escoamento (%)	5 - 12
Módulo de tração (Mpa)	800 – 1200
Dureza (Shore D)*	60 – 70

II – Propriedades térmicas

A capacidade de armazenar calor é avaliada pelo calor específico, na qual os polímeros apresentam baixos valores, entre 0,2 e 0,5 cal/g°C, pouco acima, portanto, dos metais, que está abaixo de 0,1 cal/g°C. O calor específico do PEAD é um dos maiores entre os polímeros, entre 0,5 e 0,6 cal/g°C.

A condutividade térmica, propriedade que avalia a característica de o material ser bom ou mau condutor de calor, medida em cal/cm.s.°C, apresenta valores da ordem de 10⁻³ para os polímeros, sendo tipicamente maus condutores.

As características do estado físico dos materiais poliméricos estão relacionadas com a mobilidade de suas cadeias. Esta mobilidade, por sua vez, está relacionada com a agitação dos átomos, que é diretamente proporcional à temperatura. As temperaturas de transição definem, portanto, as mudanças no estado físico dos polímeros.

Temperatura de transição vítrea (T_g) – Ao aquecer uma massa polimérica resfriada, a região amorfa das cadeias moleculares adquire mobilidade, passando pela transição chamada de temperatura de transição vítrea. A partir desta temperatura, o material tem comportamento viscoelástico e, em seguida, borrachoso. Em temperaturas menores do que a de transição vítrea, o polímero apresenta-se rígido e quebradiço, como um vidro. No PEAD a temperatura de transição vítrea está compreendida entre -110° e -125° C.

Temperatura de fusão cristalina (T_m) – Prosseguindo com o aquecimento, sendo um polímero semi-cristalino, passa-se a uma transição de primeira ordem, onde ocorre a fusão dos cristalitos, desaparecendo a região cristalina. Nestas condições, o polímero apresentar-se-á no estado viscoso. No PEAD a temperatura de fusão cristalina está compreendida entre 130° e 135° C.

II – Propriedades elétricas

Os polímeros são maus condutores de eletricidade, assim com são maus condutores de calor. A resistividade volumétrica desses materiais, que mede a resistência à passagem de corrente elétrica, é superior à dos metais e do vidro.

III – Propriedades químicas

A resistência química é uma das propriedades mais importantes dos materiais poliméricos. Essa propriedade pode ser subdividida em resistência à oxidação, à degradação térmica, às radiações ultravioletas, à ácidos e bases. Entretanto, em função da sua estrutura molecular, alguns polímeros podem estar sujeitos à degradação, conforme descrito a seguir:

- Resistência à oxidação: Essa resistência é mais acentuada nas macromoléculas que contem apenas ligações simples entre os átomos de carbono, como o polietileno e o polipropileno. Em polímeros insaturados, isto é, que possuem dupla ligação entre os átomos

de carbono, particularmente as borrachas, a oxidação pelo ataque direto do oxigênio nos pontos vulneráveis da cadeia, que são as ligações insaturadas, acarretando em redução ou aumento do seu peso molecular, e os efeitos são a descoloração, perda de brilho superficial e de propriedades mecânicas.

- Resistência à degradação térmica: Essa degradação ocorre pela exposição do polímero ao calor na presença do ar, na qual os radicais livres de oxigênio promovem a ruptura de ligações covalentes insaturadas ou de ligações contendo carbono terciário, criando pontos com maior facilidade de formação de hidroperóxidos, os quais causam cisão nas cadeias do polímero. Os polímeros clorados são suscetíveis a esse tipo de degradação devido à fácil ruptura da ligação carbono-cloro.

- Resistência às radiações ultravioleta: Ligações insaturadas da estrutura da macromolécula apresentam baixa resistência à radiações ultravioleta, que, ao ser absorvida, geram radicais livres que atuam nas reações de cisão e oxidação, causando efeitos deletérios no polímero.

- Resistência à ácidos e bases: A resistência do polímero ao ataque de ácidos depende da presença em sua estrutura molecular de grupamentos sensíveis a essas substâncias, como, por exemplo, as resinas melamínicas e os produtos celulósicos que sofrem alteração em meio ácido.

Segundo Torres (2007) o polietileno apresenta boa resistência a agentes químicos, citando as seguintes propriedades:

- São insolúveis em água, da qual absorve menos de 0,01%, mesmo em temperatura elevada, apresentando comportamento hidrofóbico.
- Possui alta resistência à ácidos e bases.
- Não é solúvel em nenhum solvente conhecido à temperatura ambiente.
- Possui resistência a qualquer corrosão microbiana.
- Apresenta combustibilidade mesmo após a retirada da fonte de calor, liberando CO, CO₂ e água, mas nenhum gás corrosivo.
- Possui temperatura de transição vítrea (temperatura de fragilidade) muito baixa.

2.1.4 – Aplicações do PEAD

Os produtos de PEAD são moldados por extrusão, sopro ou por injeção. Cada processo de fabricação exige uma determinada faixa para o índice de fluidez, o qual depende do grau de cristalinidade do polímero.

O PEAD moldado por extrusão é aplicado na produção de telas, sacaria industrial, lonas, sacos e cordas. Pelo processo de injeção é aplicado na fabricação de baldes, brinquedos, caixarias, capacetes, utilidades domésticas, caixas d'água, potes para sorvete, recipientes para produtos alimentícios. Nestas aplicações observa-se que o índice de fluidez maior do polietileno. Os produtos moldados por sopro com o PEAD são frascos para remédios, cosméticos, produtos alimentícios e limpeza, bombonas que requeiram alta resistência ao impacto para produtos agroquímicos e detergentes concentrados, embalagens para óleo lubrificante, reservatório para automóveis, caixas de descarga sanitária e filmes de media resistência mecânica. Nestas aplicações o índice de fluidez do polietileno é baixo.

2.2 – O PLÁSTICO RECICLADO

A inércia química e biológica que tornam os polímeros sintéticos versáteis e populares se reverte em um problema ambiental no momento do descarte dos rejeitos (CALLISTER, 2002). A baixa degradabilidade dos polímeros aliado a redução da vida útil dos produtos e a diversidade de materiais descartáveis, como consequência do estímulo ao consumo, remete às questões ambientais do descarte de polímeros pós-consumo (CARDOSO et al, 2007).

Os hábitos de consumo da sociedade moderna são extremamente altos, onde a presença do descartável é predominante, como consequência temos uma grande produção de lixo. No contexto da descartabilidade, o plástico exerce um papel fundamental. Embora não seja o componente principal do lixo urbano, o plástico é o que mais aparece, pelo volume que ocupa em relação ao seu peso (figura 6). A sua disposição em vias públicas e lixões obviamente podem causar sérios problemas ambientais, como o entupimento de bueiros, funcionando como barreira para o escoamento da água de chuva. Temos então, um contexto em que há uma grande produção de descartáveis, sobretudo de plástico, seguida de uma disposição crescente e inadequada dos resíduos gerados por este consumo.

Com base nos dados do Datamark (2009), o consumo das resinas termoplásticas para a produção de embalagens ultrapassa a marca dos 1,6 milhões de toneladas por ano. Os três materiais mais utilizados são o papel e papelão, o vidro e os plásticos, esse último respondendo por aproximadamente 20% em peso de toda a produção de embalagens

Entre os principais materiais usados para fabricação de embalagens, os plásticos notabilizam-se pelo crescimento ano a ano. Entre as resinas termoplásticas, o PET é a mais consumida por esse setor, seguida do polipropileno (PP), do polietileno de baixa densidade (PEBD) e de alta densidade (PEAD), conforme mostra a figura 7.



(a)

(b)

Figura 6 – Embalagens plásticas descartadas após festa popular em Salvador-Ba

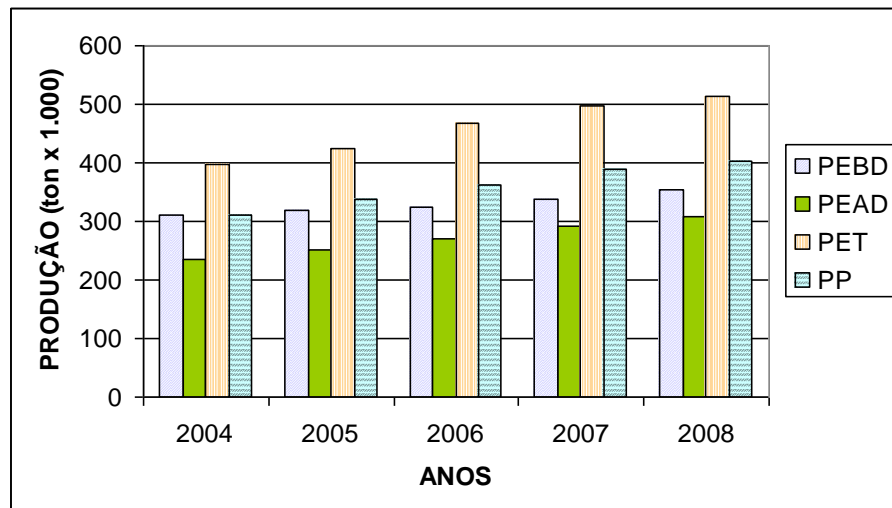


Figura 7 - Produção de resinas termoplásticas para fabricação de embalagens. (DATAMARK, 2009)

Políticas de redução na fonte, reutilização e reciclagem atualmente constituem iniciativas que ajudam a não esgotar a capacidade dos aterros sanitários, além de reduzir a demanda por recursos naturais (SANTOS *et al*, 2000). Uma das formas de atingir a redução na fonte seria a substituição das embalagens plásticas por outras feitas de materiais mais duráveis e/ou com maior capacidade. Neste ponto há que se considerar o baixo custo, leveza e praticidade das embalagens plásticas em relação aos possíveis materiais substituintes, tornando difícil esta substituição. A reciclagem de resíduos plásticos, apesar das dificuldades enfrentadas, tem importância fundamental nas políticas de desenvolvimento sustentável, tendo em vista a possibilidade de produção de matérias-primas alternativas e preservação do meio ambiente. (LUCAS E BENATTI, 2008)

2.2.1 – A reciclagem de polímeros

Pode ser entendido como o conjunto de técnicas para recuperação energética ou obtenção de novos produtos a partir dos rejeitos de produtos poliméricos. Neste contexto, a transformação mecânica de rejeitos plásticos, a recuperação de resinas e a transformação energética são rotas disponíveis e economicamente viáveis para reciclagem de polímeros (FORLIN E FARIA, 2002).

A tecnologia de reciclagem dos polímeros pode ser subdividida em quatro grupos:

Reciclagem primária: Consiste nos processos de reaproveitamento dos resíduos industriais na própria linha de produção, obtendo produtos com características similares àqueles produzidos com resinas virgens (SPINACÉ E DE PAOLI, 2005). Estes resíduos possuem maior valor agregado para a reciclagem, haja visto o seu grau de descontaminação e uniformidade, além disso, estão concentrados em maior volume. Por outro lado, a possibilidade de reinserção destes rejeitos na planta de produção pode reduzir a sua oferta para as empresas de reciclagem (FORLIN E FARIA, 2002).

Reciclagem secundária: Consiste na transformação mecânica e reaglutinação de polímeros provenientes dos resíduos sólidos urbanos, tendo como produto final, grânulos que são reprocessados pelas indústrias de artefatos plásticos. Neste processo há necessidade de separação e lavagem dos resíduos, devido ao seu alto grau de contaminação e heterogeneidade.

Reciclagem terciária: Neste tipo de reciclagem, os polímeros são transformados em insumos da indústria petroquímica na produção de novos polímeros (SPINACÉ E DE PAOLI, 2005). A recuperação se dá pela despolimerização do material plástico, que são purificados, obtendo assim os monômeros originais (FORLIN E FARIA, 2002).

Reciclagem quaternária: Neste processo acontece a recuperação energética dos resíduos poliméricos por meio de incineração. Os plásticos possuem em geral grande poder calorífico, em que um quilo de plástico contém energia equivalente à um quilo de óleo combustível. Este tipo de reciclagem é adotado em países como Áustria e Suécia, sendo utilizados equipamentos de alta tecnologia para controle da emissão de poluentes advindos da incineração dos resíduos plásticos (SETORRECICLAGEM, 2005).

A reciclagem mecânica do tipo secundária a que são submetidos os resíduos poliméricos urbano pós-consumo segue as etapas de acordo com a figura 8.

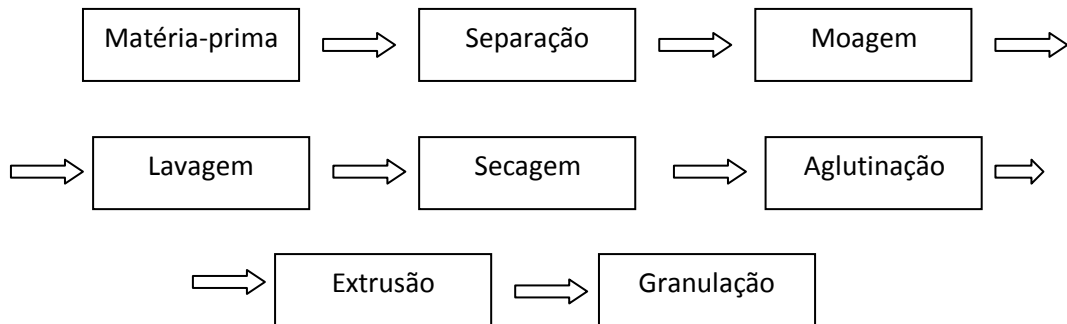
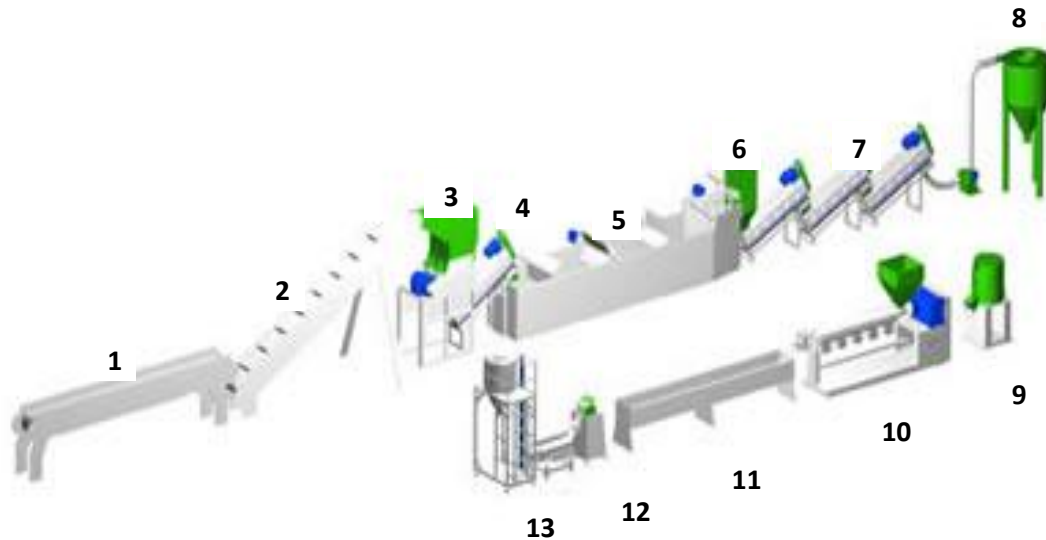


Figura 8 - Etapas da reciclagem mecânica. Fonte: www.plastico.com.br

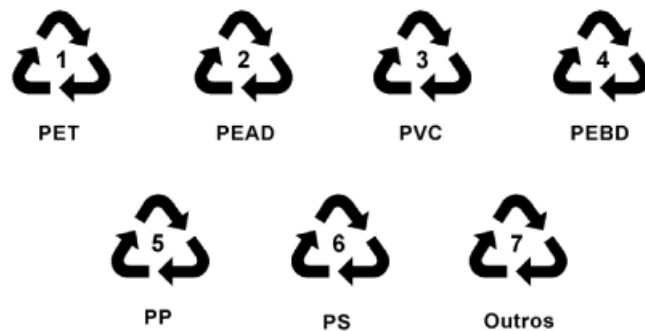
Inicialmente os resíduos poliméricos são separados na esteira de classificação por tipo de resina de acordo com a sua identificação (figura 10) contida nos produtos, ou pelo aspecto visual. Após a separação, os resíduos são despejados no moinho pela esteira de alimentação.

Na moagem os resíduos são fragmentados em pequenas partes e em seguida, lavados e decantados. No tanque de decantação, os fragmentos são movidos por pás giratórias, que ao final são novamente triturados e depois secados. Após a secagem o material é armazenado em um silo para depois serem lançados no equipamento de aglutinação e extrusão, onde podem ser incorporados aditivos e/ou pigmentos. A aglutinação, à temperatura elevada, transforma os resíduos triturados em massa plástica que são comprimidos ao cabeçote de extrusão por uma rosca giratória. O perfil de extrusão tem forma de espaguete, os quais são mergulhados em um tanque de resfriamento, solidificando e, em seguida, são inseridos em uma máquina granuladora. Os grãos de plástico reciclado, denominado *pellets*, são ensacados em uma balança automática. A linha seqüencial de reciclagem dos plásticos está ilustrada na figura 9.



- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| 1 = Esteira de separação | 7 = Secadoras |
| 2 = Esteira de alimentação | 8 = Armazenagem |
| 3 = Moinho | 9 = Aglutinador |
| 4 = Lavadora | 10 = Extrusora |
| 5 = Tanque de decantação | 11 = Tanque de resfriamento |
| 6 = Moinho | 12 = Granuladora |
| | 13 = Silo / Balança / Embaladora |

Figura 9 - Linha completa de reciclagem de PE/PP. Fonte: www.kie.com.br



PET = Poli(tereftalato de etileno), PEAD = Polietileno de alta densidade,
 PVC = Poli(cloreto de vinila), PEBD = Polietileno de baixa densidade,
 PP = Polipropileno, PS = Poliestireno

Figura 10 - Simbologia para identificação de embalagens plásticas. (SPINACÉ E DE PAOLI, 2005)

2.2.2 – O setor de reciclagem de plásticos no Brasil

De acordo com o CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem, há um aumento crescente na quantidade de resíduos plásticos pós-consumo, como mostra a figura 11 com a composição média da coleta seletiva com os principais produtos recicláveis. Percebemos uma redução da quantidade de vidros descartados, ao passo que há um aumento dos resíduos plásticos, o que sugere que está havendo uma substituição dos produtos de vidro por similares em material plástico, isto reforça a teoria da preferência do consumo por produtos descartáveis. Citando como exemplo o estudo de Azevedo (2004), a participação de plásticos na composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de Salvador-Ba, saltou de 10,1% em 1992 para 17,11% em 1999.

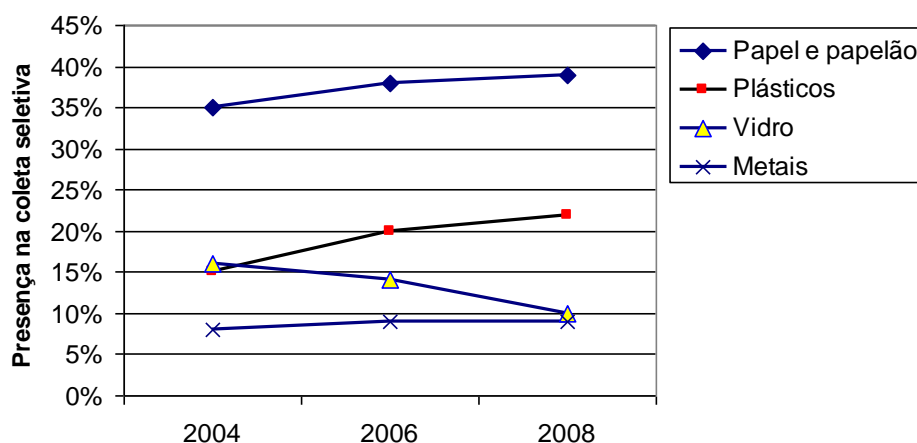


Figura 11 - Composição média da coleta seletiva. (CEMPRE, 2008)

Segundo o plastivida (2008), o setor de reciclagem de plástico no Brasil reprocessou em 2007, 556 mil toneladas de resíduo pós-consumo, dispondo de uma capacidade instalada total de 1.459.000 toneladas/ano. Esse desempenho coloca este setor da indústria brasileira com um índice no patamar dos países da Europa. O PET é o plástico mais reciclado no país, seguido do PEBD e do PEAD, todos eles bastante utilizados em embalagens (figura 12).

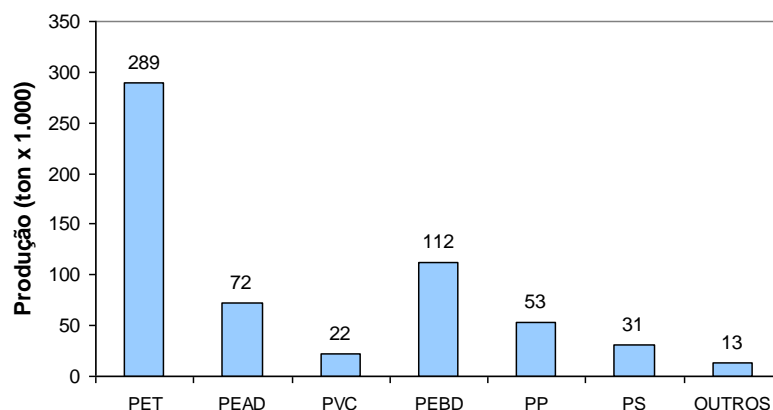


Figura 12 - Produção de plástico reciclado pós-consumo. (PLASTIVIDA, 2008)

Os bens de consumo semi-duráveis e não-duráveis (utilidades domésticas, têxtil, brinquedos, descartáveis, etc) representam a maior fatia do mercado de plástico reciclado no Brasil (figura 13), a construção civil consumindo 11,9% representa o terceiro mercado.

Pode-se observar que a produção de plásticos, tanto de resinas virgens como de produtos da reciclagem secundária, apresentam tendência de crescimento ao longo do tempo. Isto projeta uma disponibilidade contínua de volume de recicláveis, um dos fatores condicionantes para o sucesso da reciclagem (FORLIN E FARIA, 2002) e (SPINACÉ E DE PAOLI, 2005). Por outro lado temos a indústria da construção civil, uma grande consumidora de matérias-primas e recursos naturais (JOHN, 2000), que pela possibilidade de incorporação de resíduos sólidos como materiais de construção, tem um papel importante neste contexto. O aproveitamento de rejeitos sólidos como novos materiais possibilitam a redução de impactos ambientais, como também a redução de custos industriais e geração de novos empregos (CHERIAF E ROCHA, 2003).

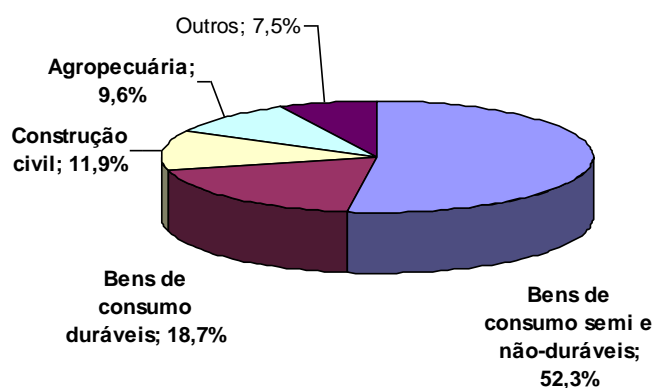


Figura 13 - Distribuição do mercado de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil. (PLASTIVIDA, 2008)

2.2.3 – Propriedades mecânicas do plástico reciclado

Durante o ciclo de vida de um material polimérico, desde a síntese até o uso final, a exposição a fatores degradantes, como altas temperaturas e radiações UV, tendem a diminuir suas propriedades. Neste processo podem ocorrer novas cisões e/ou reticulações em sua cadeia, alterando o seu peso molecular, o que modifica o grau de cristalinidade, e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. Durante a reciclagem, os plásticos são aglutinados sob temperatura relativamente alta, possibilitando a ocorrência de degradação.

Caraschi e Leão (2002) realizaram um estudo com polipropileno, poliestireno, polietileno de alta densidade e ainda uma mistura de plásticos não identificados. Os materiais foram separados, moídos, lavados e posteriormente secos em estufa à 50 °C. Após a extrusão, foram moldados corpos de prova por injeção a 180, 190 e 200 °C, sendo posteriormente avaliados quanto à densidade, dureza, propriedades mecânicas e termomecânicas, comparando-os com os valores da resina virgem. Dos resultados da Tabela 1, especificamente para o PEAD reciclado, temos:

- **Resistência à tração:** redução da ordem de 18% nas amostras moldadas com 180 e 190 °C e em torno de 25% com 200 °C.
- **Módulo de elasticidade:** Permaneceu inalterado, considerando o desvio padrão das medidas.
- **Densidade e dureza:** Permaneceram praticamente inalterados

Em relação à resistência mecânica, há uma queda nos seus valores quando a temperatura de injeção do material ficou na faixa de 180 a 190 °C, sendo que com 200 °C, esta redução é maior, indicando que a partir desta temperatura de injeção, pode haver degradação do material. Os autores concluem que os plásticos pós-reciclagem constituem um material leve e resistente, podendo competir com as resinas virgens termoplásticas.

Tabela 1 - Resistências e módulos de elasticidade na tração e flexão de plásticos reciclados. (CARASCHI E LEÃO, 2002)

Plásticos	T _{INJ} (°C)	Tração		Flexão		MFI (10 g/min)	d (g / cm ³)	Dureza Shore D
		$\sigma_{\text{TRAÇÃO}}$ (MPa)	E _{tração} (GPa)	$\sigma_{\text{FLEXÃO}}$ (MPa)	E _{FLEXÃO} (GPa)			
						3,22	0,90 (0,002)	
Reciclados	180	28,97(0,19)	1,663 (0,062)	34,99 (0,52)	0,982 (0,022)			68,2(0,57)
PP (MFI = 3,22)	190	28,96(0,67)	1,673 (0,064)	41,74 (0,49)	1,392 (0,022)			66,4(0,42)
	200	27,79(0,50)	1,611 (0,048)	33,97 (0,49)	0,933 (0,014)			67,9(0,74)
	180	20,62(0,29)	1,118 (0,078)	20,13 (0,64)	0,619 (0,037)	0,39	0,93 (0,006)	62,0(0,79)
PEAD	190	20,73 (0,28)	1,066 (0,090)	18,99 (0,45)	0,581 (0,027)			62,0(0,79)
	200	19,66 (0,22)	1,069 (0,044)	17,88 (0,36)	0,528 (0,014)			61,5(0,35)
	180	21,03 (0,48)	1,158 (0,052)	25,65 (0,76)	0,785 (0,021)	1,65	0,888 (0,006)	63,3(0,42)
PLÁSTICOS	190	20,73 (0,28)	1,158 (0,048)	22,09 (0,90)	0,620 (0,046)			63,5(0,50)
	200	19,25 (0,50)	1,151 (0,052)	22,38 (0,69)	0,628 (0,048)			62,8(0,45)
PS	200	23,49 (0,40)	2,369 (0,042)	81,58 (2,11)	2,397 (0,117)	5,67	1,04 (0,004)	81,5(0,50)
Virgens								
PP-1(MFI=9,24)	190	26,83 (0,44)	1,514 (0,039)	32,62 (1,21)	1,107 (0,052)	9,24	0,90 (0,001)	70,5(0,50)
PP-2(MFI=12,2)	190	30,72 (0,45)	1,868 (0,114)	43,48 (0,51)	1,370 (0,027)	12,2	0,88 (0,002)	71,0(0,71)
PEAD	190	24,53 (0,12)	1,139 (0,031)	---	---	---	0,91 (0,007)	62,9(0,55)
PEBD	180	12,97(0,05)	0,197 (0,007)	---	---	7,64	----	45,7(0,45)

* Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

Alcântara et al. (1995) avaliaram o efeito de sucessivas extrusões de um material polimérico provenientes do resíduo sólido urbano de quatro estados do nordeste brasileiro. O material, composto de polietileno e polipropileno, foi submetido à oito extrusões sucessivas, coletando-se amostras com uma, duas, três, cinco e oito extrusões, com perfil de temperatura de 165 °C, 175 °C, 210 °C, 215 °C e 200 °C, em diferentes zonas da extrusora. As amostras foram ensaiadas para caracterização térmica, por calorimetria diferencial de varredura, constatando-se a predominância do polietileno; para caracterização termomecânica, medindo-se o índice de fluidez; e para caracterização mecânica, quanto à resistência à tração, medindo-se o alongamento na ruptura e avaliando o módulo de elasticidade.

A resistência à tração mostrou-se praticamente a mesma até a terceira extrusão, a partir da qual observou-se uma ligeira redução, estabilizando-se a partir da quinta extrusão. No alongamento na ruptura, o comportamento é similar, há uma pequena variação até a terceira extrusão, ocorrendo um leve aumento até a quinta extrusão, a partir da qual verificou-se estabilização. O módulo de elasticidade do material sofreu redução após a quinta extrusão.

Há que se observar as faixas de temperatura de trabalho da extrusora, algumas a 200°C. De acordo com o trabalho anterior pode ocorrer degradação do polímero nessa faixa de temperatura. Mesmo nessas condições, as propriedades estudadas do material fundido mantiveram-se até a terceira etapa de extrusão. Os autores salientam ainda, as pesquisas desenvolvidas na área de estabilizantes em polímeros, visando obter o maior número de extrusões, mantendo as propriedades mecânicas.

2.3 – ARGAMASSA

2.3.1 – Características gerais

Argamassa é a mistura homogênea de aglomerantes, agregado(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos e adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

As argamassas de revestimento são utilizadas com funções que vão desde a proteção de alvenarias, regularização de superfícies horizontais e verticais, estanqueidade até funções de natureza estética, sendo, dessa forma, classificada de acordo com a sua função na construção, como mostra o quadro 2.

Quadro 2: Classificação da argamassa segundo as suas funções na construção (CARASEK, 2007)

FUNÇÃO	TIPOS
Construção de alvenarias	Argamassa de assentamento Argamassa de fixação (ou encunhamento)
Revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa de revestimento decorativo monocamada
Revestimento de pisos	Argamassa de contra piso Argamassa de alta resistência para piso
Revestimento cerâmico	Argamassa de assentamento de cerâmica (colante) Argamassa de rejuntamento
Reparação de estruturas	Argamassa de reparo

Os sistemas de revestimento agem em conjunto com o substrato e podem ser constituídos por mais de uma camada (figura 14), com diferentes características e propriedades:

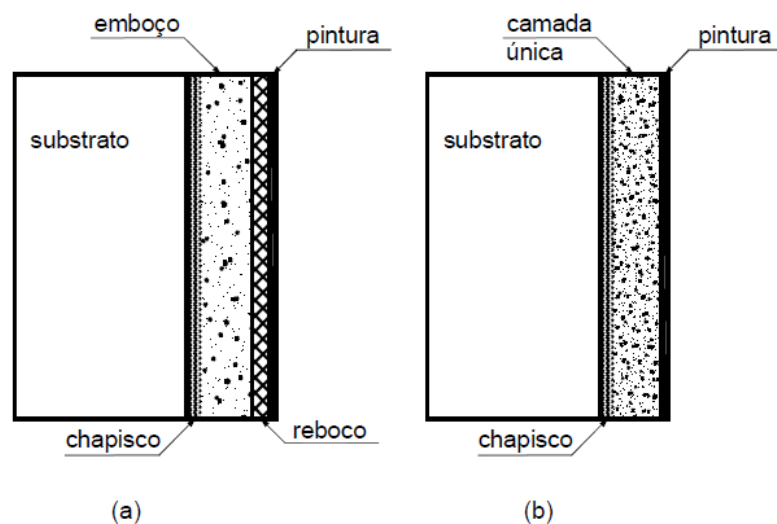
O substrato é a superfície sobre a qual é aplicada a argamassa, influenciando diretamente na qualidade do revestimento devido à variação de suas características como absorção e rugosidade, refletindo na aderência argamassa-substrato.

A camada de chapisco é aplicada no substrato para servir de elemento de ligação deste com o revestimento. Dessa forma, o chapisco tem a função de cobrir e uniformizar a superfície da base, melhorando a aderência com o revestimento.

Carasek (2007) define emboço com a camada que serve para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo.

O reboco é a camada aplicada diretamente sobre o emboço e propicia uma superfície para receber o revestimento decorativo ou se constitua no acabamento final.

O revestimento de camada única é popularmente conhecido como “massa única”, constituindo-se de um único tipo de argamassa sobre a qual é aplicada, por exemplo, a pintura.



Figuras 14 - Diferentes alternativas de revestimentos de paredes (CARASEK 2007)

2.3.2 - MATERIAIS CONSTITUINTES

A argamassa de revestimento é composta basicamente de aglomerante (cimento e/ou cal), areia e água. Os aditivos podem ser incorporados à mistura com o objetivo de melhorar suas características e propriedades específicas, as quais resultam do tipo e proporcionamento dos materiais, chamado de traço. Entre esses, o principal é o aglomerante, com a participação dos seus compostos químicos nas reações de hidratação da pasta, conforme descrito a seguir:

a) Cimento

É um aglomerante do tipo hidráulico, assim o cimento não só endurece através de reações com a água, como também forma um produto resistente a ela. Os seus constituintes fundamentais são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), que representam 95 a 96% do total dos óxidos. Há ainda certa proporção de magnésia e anidrido sulfúrico, e ainda, em menores proporções, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂), os dois primeiros denominados álcalis do cimento (Bauer, 2001).

As matérias-primas com proporções dos constituintes mencionados são pulverizados, homogeneizados e submetidos à temperatura elevada, que resulta na obtenção do *clinker*. Neste processo há formação dos seguintes compostos: silicato tricálcico (3CaO . SiO₂ = C₃S), Silicato bicálcico (2CaO . SiO₂ = C₂S), aluminato tricálcico (3CaO . Al₂O₃ = C₃A), ferro aluminato tetracálcico (4CaO . Al₂O₃ . Fe₂O₃ = C₄AF_e). O silicato tricálcico é o maior responsável pela resistência em todas as idades dos materiais à base de cimento, sobretudo no primeiro mês de cura. O silicato bicálcico é mais importante no processo de envelhecimento em idades mais avançadas, sendo responsável pelo ganho de resistência com um ano ou mais, o aluminato tricálcico contribui para resistência especialmente no primeiro dia e o ferro aluminato tetracálcico em nada contribui para resistência. O aluminato tricálcico é o maior responsável para o calor de hidratação do cimento e, quando presente em forma cristalina, pela rapidez da pega.

b) Areia

O agregado utilizado para a produção de argamassas é a areia, com diâmetro menor do que 2,0 mm. Apresentando um custo bem menor do que o cimento, a areia assume um papel importante em termos econômicos para argamassa e o concreto, todavia, a influência dos agregados não se restringe apenas à questão da redução de custos, pois suas características físicas também são relevantes no estudo das propriedades desses compósitos.

Em concreto, a forma e a textura do agregado miúdo têm um efeito significativo sobre a demanda de água na mistura, considerando que partículas angulosas exigem mais água para uma mesma trabalhabilidade. A aderência entre o agregado e a pasta de cimento, importante fator da resistência do concreto, é devido ao intertravamento do agregado na pasta, onde a textura superficial exerce influência. Em geral, partículas mais moles e porosas apresentam melhor aderência. Desse modo, a resistência mecânica do agregado não é o único fator a ser considerado na resistência do concreto/argamassa, mas também, às suas características de absorção e aderência à pasta de cimento.

Araújo Jr (2004) salienta que areias muito grossa não produz argamassas trabalháveis, prejudicando essa propriedade, e, em consequência, sua aplicação ao substrato. Acrescenta que normalmente a escolha da areia para o uso em argamassa é feita pelo módulo de finura, que é o valor resultante da divisão por 100 do somatório das porcentagens de massa retidas e acumuladas nas peneiras da série normal especificadas pela NBR 7211/1983. O quadro 3 mostra a classificação da areia de acordo com o módulo de finura, segundo a NBR 7217/1987.

Quadro 3 – Classificação da areia quanto ao módulo de finura (NBR 7217/1987)

Classificação da areia	Módulo de finura (MF)
Areia fina	$MF < 2,0$
Areia média	$2,0 \leq MF \leq 3,0$
Areia grossa	$MF > 3,0$

Carneiro, Cincotto e John (1997) consideram que a distribuição granulométrica da areia na argamassa, juntamente com o diâmetro máximo e a forma das partículas influem no grau de empacotamento, e, portanto, no volume de vazios que é preenchido pela pasta. Nessa análise, o módulo de finura é considerado um parâmetro limitado, tendo em vista que não reflete a distribuição granulométrica. Por outro lado, a massa unitária, integrando a um só tempo, a distribuição granulométrica, forma e empacotamento dos grãos, é um parâmetro que avalia melhor as propriedades da argamassa a partir das propriedades do agregado. Destaca-se a influência da variação da massa unitária da areia nas propriedades da argamassa, de forma que o aumento desta propriedades está relacionada com a redução no índice de vazios, consumo de aglomerantes, teor de ar incorporado e retenção da consistência, e com o aumento da resistência mecânica e do módulo de deformação.

c) Aditivo

Os aditivos químicos são substâncias que são adicionadas às misturas em teores, normalmente não maiores do que 5% em relação à massa de cimento com a finalidade de melhorar ou modificar propriedades específicas do concreto/argamassa. Tais substâncias variam de tensoativos a sais solúveis e polímeros, que proporcionam incorporação de ar, plasticidade nas misturas ou controlam o tempo de pega. Os tensoativos são empregados nos aditivos incorporadores de ar ou redutores de água na mistura, reduzindo a relação água/cimento e mantendo a mesma trabalhabilidade, ou, alternativamente, aumentando a trabalhabilidade com a mesma relação água/cimento.

Mehta e Monteiro (1994) explicam o mecanismo de ação dos tensoativos: As moléculas orgânicas de longas cadeias dessas substâncias possuem uma extremidade com um ou mais grupos de moléculas polares e outra com grupo apolar. No primeiro caso a atuação é de incorporador de ar, no segundo, redutor de água. Os tensoativos são adsorvidos na interface ar-água e cimento-água, onde a orientação da molécula determinará se o efeito predominante será de incorporação de ar ou fluidificação do sistema.

Na incorporação de ar, os tensoativos adsorvidos na interface ar-água orientam suas moléculas polares na direção da água, diminuindo a tensão superficial e promovendo a formação de bolhas, que são impedidas de coalescerem devido à estabilização promovida

pela atração com as partículas de cimento (figura 15). No sistema água-cimento as partículas de cimento tendem a se aglomerar formando flocos, devido à atração entre cargas opostas das partículas e à tensão superficial da água. Os aditivos redutores de água ou plastificantes atuam nesse sistema de forma que os grupos polares da cadeia são adsorvidos na superfície das partículas carregando-as com cargas de mesmo sinal, o que promove a dispersão das partículas, o que seria conseguido com adição da água, caso não fosse adicionado esse aditivo ao sistema. Desse modo a necessidade de água para fluidificação da mistura torna-se menor. A figura 16 mostra o sistema água-cimento antes da ação do aditivo redutor de água, com partículas floculadas, e depois, com partículas dispersas.

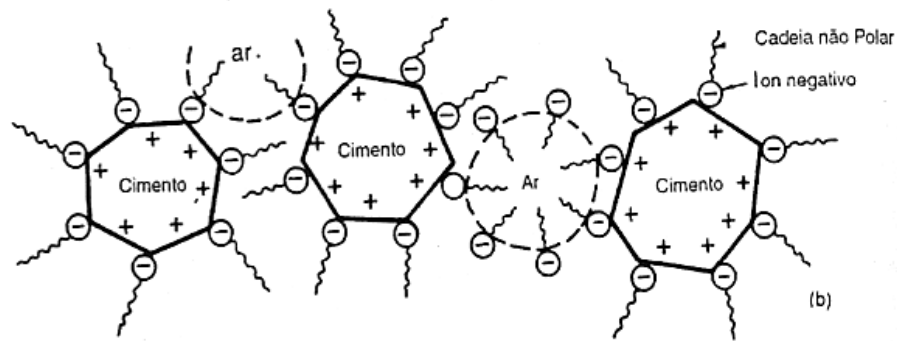


Figura 15 – Ação do tensoativo incorporador de ar (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

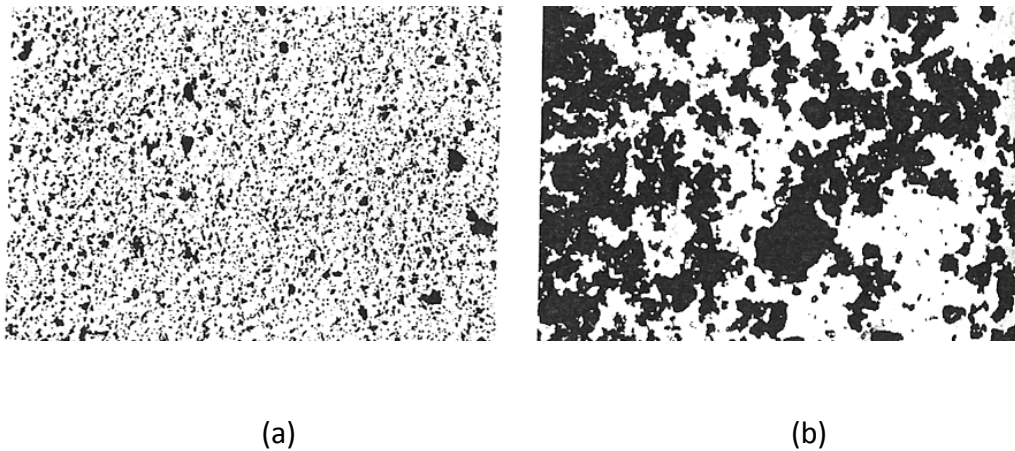


Figura 16 – Sistema água-cimento: (a) disperso; (b) floculado (MEHTA & MONTEIRO, 1994)

Neville (1997) acrescenta que a ação do aditivo redutor de água tem alguma ação no sentido de incorporar ar na mistura. Desse modo, esse efeito pode resultar em melhora da trabalhabilidade, mas, por outro lado, também ocasionar redução na resistência.

Os superplastificantes são aditivos redutores de água, mas com efeito significativamente maior do que os plastificantes. Segundo Hartmann e Helene (2003) os superplastificantes podem ser os lignossulfatos, obtidos a partir dos rejeitos do processo de extração da celulose da madeira, o naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato, obtidos por técnicas de polimerização e os policarboxilatos, à base de éter policarboxílico. Os primeiros são conhecidos como plastificantes de primeira geração, permitindo redução da água da mistura da ordem de 8% a 12%, os aditivos com base em melamina ou naftaleno são os de 2ª ordem, permitindo uma redução de até 25% da água das misturas e os de 3ª geração, à base de éter policarboxílico, reduzem em até 35% da água para uma mesma trabalhabilidade.

A ação dos superplastificantes de 1ª e 2ª ordem se caracteriza pela repulsão eletrostática, aumentando a fluidez e reduzindo a demanda da água de amassamento. Os produtos à base de policarboxilatos atuam por repulsão eletrostática e também por um efeito conhecido como repulsão estérica, que é produzido pela longa cadeia lateral ligada em vários pontos à cadeia principal do polímero. Esse arranjo produz um forte efeito dispersante, pois aumentam consideravelmente o espaço entre as partículas de cimento. A figura 17 ilustra a ação dos superplastificantes à base de policarboxilatos.

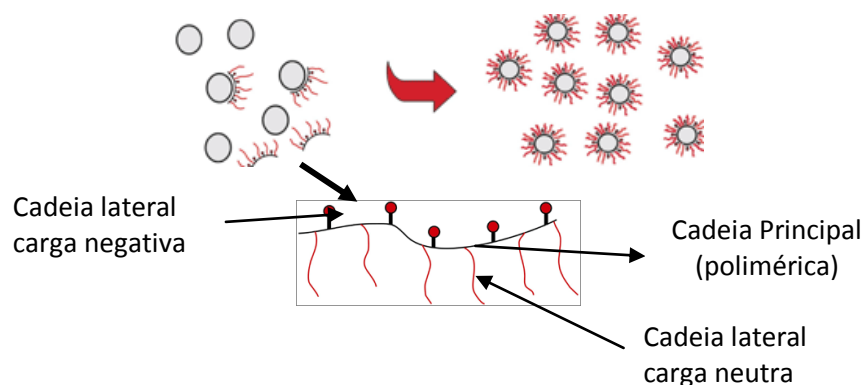


Figura 17 – Mecanismo de ação dos superplastificantes de 3ª geração (fonte: BASF)

2.3.3 – MÉTODOS DE DOSAGEM DA ARGAMASSA

Um aspecto relevante relacionado ao preparo de argamassas de assentamento e revestimento em obras é a adoção de traços pré-fixados de acordo com a sua função, as chamadas “receitas de bolo”, sem o estudo prévio de dosagem em laboratório. Isto decorre da menor responsabilidade com esse material em comparação com o concreto, que tem função estrutural (CARASEK, 2007). Dentre os estudos nesta área estão o de Selmo (1989) *apud* Carasek (2007), o de Carneiro e Cincotto (1999) e o de Gomes e Neves (2002). Este último, utilizado pelo CETA-Ba, Centro Tecnológico da Argamassa, adota os seguintes parâmetros para a formulação de traços contendo argilominerais:

- Teor máximo de finos dos agregados de 7%
- Percentual máximo de argilominerais (arenoso ou caulim) em relação ao total de agregados de 35%
- Consumo de cimento especificado no projeto, ou conforme recomendação apresentada no quadro 2.3.3
- Índice de consistência de 260 ± 10 mm
- Teor de ar incorporado entre 8% e 17%
- Teor de retenção de água superior a 75%

2.3.4 - PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Para o bom desempenho da argamassa, tendo em vista a função a que ela se destina, seja de vedação, regularização, proteção ou união, é necessário que uma série de propriedades sejam garantidas e mantidas durante a vida útil da construção. A avaliação de tais propriedades passa pelo estudo sistemático de seus materiais constituintes e proporcionamento adequado, sua qualidade, condições de preparo e forma de aplicação (Martinelli e Helene, 1991), englobando métodos para determinação de propriedades desde o estado fresco ao endurecido. Face ao exposto, serão apresentados uma discussão a respeito das propriedades relevantes para este trabalho.

a) Trabalhabilidade e reologia

Os sistemas que compõem as argamassas, ou seja, proporções adequadas de partículas de agregados, aglomerantes e água, são assumidos como suspensões de partículas sólidas em um líquido viscoso, que é a pasta de cimento. Assim, comumente considera-se que tais sistemas escoam como um fluido. A viscosidade mede a resistência de um fluido em escoar, estando relacionada com a sua resistência interna oferecida ao movimento relativo de diferentes camadas. Por sua vez, a reologia é a ciência que estuda as propriedades e o comportamento mecânico de corpos que sofrem uma deformação ou um escoamento.

A trabalhabilidade é considerada a principal propriedade da argamassa no estado fresco (BAUER, 2005; GOMES, 2008). Tal propriedade está relacionada com a facilidade no modo em que são misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, com homogeneidade, e é resultante do agrupamento de outras propriedades como: consistência e plasticidade, retenção de água, coesão das partículas, exsudação e adesão inicial. Carasek (2007) conceitua essas propriedades como mostra o quadro 2.5

Quadro 4 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas. (CARASEK, 2007)

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a aplicação de cargas
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões
Retenção de água	É a capacidade da argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita à solicitações que provocam a perda de água
Coesão	É o Grau de atração física existente entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem por efeito da gravidade
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato

É válido salientar a ausência de métodos em laboratório que efetivamente estabeleçam de forma mais precisa parâmetros para medição da trabalhabilidade da argamassa, conferindo um conceito subjetivo a esta propriedade. De um modo geral, a correção da trabalhabilidade da argamassa na obra é feita a partir da adição de mais ou menos água no traço, ajustando a sua consistência e fluidez. Em um segundo momento a plasticidade é avaliada a partir da sensação de aspereza (negativa) ou maciez (positiva), propriedade que é influenciada pela proporção de agregados e aglomerantes, pela intensidade da mistura e pela presença de aditivos (CARASEK, 2007). Assim, a avaliação da trabalhabilidade da argamassa assume um caráter pessoal e arbitrário (GOMES, 2008).

Apesar disto, são comumente utilizados métodos para a medição da consistência como forma de avaliar indiretamente a trabalhabilidade da argamassa. A Norma Brasileira prescreve o método de avaliação do índice de consistência pela NBR 13276/2005, no qual um molde metálico tronco-cônico é preenchido com argamassa fresca convenientemente adensada sobre uma mesa de consistência. Após o levantamento do molde, a argamassa é submetida a um esforço dinâmico por uma sequência de trinta quedas, produzidas por uma peça excêntrica localizada na parte inferior da mesa, conforme a figura 18 em um período de trinta segundos. O índice de consistência é definido pela média, em milímetros, do espalhamento da argamassa após a ação mecânica descrita acima.

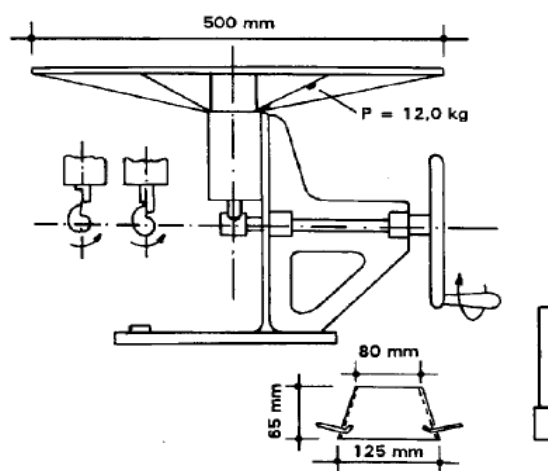


Figura 18- Mesa de consistência (NBR 7215/96)

b) Retenção de água

A retenção de água da argamassa está relacionada com a capacidade de aprisionamento do líquido, especialmente pelas partículas finas do agregado, de modo a não alterar a trabalhabilidade quando submetida às condições de perda de água, seja por evaporação ou por sucção da base. Carasek (2007) e Gomes (2008) consideram que essa propriedade exerce influência sobre o comportamento da argamassa, desde à intensidade da retração por perda de água no estado plástico, até as propriedades no estado endurecido como a resistência mecânica, a porosidade e a aderência à base. A quantidade de água necessária para conferir trabalhabilidade à argamassa é superior àquela consumida nas reações de endurecimento. Desse modo, parte do quantitativo de água excedente (livre), será perdida para o meio por evaporação, ou para a base, por sucção. A intensidade dessa perda está relacionada evidentemente pelas condições climáticas do local de aplicação da argamassa e pelas características físicas da base, como também pela capacidade de retenção da água livre, da qual dependerá da finura e do poder de absorção das partículas. Segundo Mehta e Monteiro (1994) as partículas anidra de cimento tem a tendência a se atrair e formar flocos, onde grande quantidade de água da mistura são aprisionadas. Dessa forma, variações locais da relação água/cimento são introduzidas, originando uma estrutura porosa e heterogênea.

A NBR 13277/2005 prescreve o método de avaliação da retenção de água, que consiste em medir a massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba à vácuo à baixa pressão em um funil de filtração (funil de Buchner).

c) Exsudação de água

A exsudação ocorre quando há uma incapacidade dos materiais sólidos constituintes em fixar a água no interior da mistura, ocasionando a sua saída de forma espontânea e causando a quebra da coesão e segregação das partículas. Pode-se lançar mão de algumas alternativas para atenuar o fenômeno da exsudação nas misturas cimentícias, como por exemplo, o aumento do teor de finos nos agregados, a redução do teor de água, o uso de aditivos incorporadores de ar ou retentores de água. Vale salientar que não há métodos padronizados para avaliação da exsudação, apenas a observação da mistura após a mistura.

d) Densidade de massa fresca

A densidade de massa fresca é a relação entre a massa e volume da mistura logo após o preparo e é função da massa específica dos materiais constituintes, em especial dos agregados, e do teor de ar incorporado. A sua determinação pode ser feita pelo método da NBR 13278/2005.

2.3.5 - ESTRUTURA DA PASTA HIDRATADA

Ao dispersar na água, os compostos de cálcio do cimento solubilizam-se, saturando o meio líquido com várias espécies iônicas. Após alguns minutos do início da hidratação, o aluminato tricálcico (C_3A) reage com o sulfato em solução, aparecendo os primeiros cristais aciculares de sulfoaluminato de cálcio hidratado, chamado etringita. Algumas horas depois, cristais grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) começam a ser formados, ocupando os espaços da água e do cimento em dissolução. Após a exaustão do gesso, a hidratação secundária do C_3A produz bastões longos de etringita rodeados por silicatos de cálcio hidratados. Após alguns dias, a etringita pode tornar-se instável, reagindo com o C_3A e formando placas hexagonais de monossulfato hidratado.

O C-S-H constitui de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratado e é, por consequência, o mais importante na determinação das propriedades da pasta. A relação Ca/Si varia de 1,5 a 2,0. A sua estrutura interna não é totalmente conhecida, apesar disto alguns modelos apontam para um arranjo espacial do C-S-H em camadas, ou irregular e dobrado. Esta formação contribui para a proximidade das camadas e a atração intermolecular por força de Van Der Waals, resultando em uma estrutura com alta superfície específica, compacta e resistente.

Os cristais de hidróxido de cálcio ocupam de 20 a 25% do volume de sólidos do cimento hidratado, com morfologia que varia de grandes prismas hexagonais distintos a pilhas de placas bem definidas. Diferente do C-S-H, a contribuição do hidróxido de cálcio

para a resistência da pasta é limitada, devido à sua área específica menor (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os sulfoaluminatos de cálcio constituem de 15 a 20% dos sólidos da pasta hidratada, e, portanto, desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade. Como dito anteriormente, surge da reação do C_3A no meio iônico em presença de sulfatos, formando etringita, que eventualmente volta a reagir com aquele composto formando monossulfato hidratado.

As reações de hidratação se processam em torno das partículas de clínquer em hidratação, onde o espaço entre essas partículas é limitado, de modo que à medida que a hidratação do cimento evolui os grãos de clínquer diminui, cedendo espaço para os cristais hidratados. Dependendo da finura do clínquer e do grau de hidratação da pasta, poderão ser encontrados alguns grãos de cimento não hidratado na pasta, os quais não interferem na resistência da pasta.

De acordo com o exposto, a pasta endurecida é constituída por compostos diversos de cimento hidratado, denominado genericamente de gel, hidróxido de cálcio, cimento não hidratado e outros compostos em menor proporção. Além desses sólidos, a pasta contém vazios, com tamanhos e origens diversas, que influem em suas propriedades. Dada a importância para as propriedades da argamassa endurecida, serão discutidos, a seguir, as características dos vazios da pasta de cimento e de sua de zona de transição com os agregados.

VAZIOS NA PASTA HIDRATADA

Os vazios da pasta endurecida têm origem, forma e tamanho variados. A influência dos vazios na pasta endurecida irá depender dessas características.

Os poros interlamelar do C-S-H, ou poros de gel, variam de 0,001 μm a 0,003 μm (1 a 3 nm), sendo um tamanho muito pequeno para ter efeito sobre a resistência e permeabilidade da pasta. Esses poros representam cerca de 28% do volume total dos sólidos do gel de C-S-H. A água presente nesses poros está sujeita a forças de atração superficial e só podem ser retiradas com umidade relativa abaixo de 11%, causando forte retração no sistema (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

À medida que a hidratação do cimento evolui, os produtos originados dessas reações vão tomando o espaço inicialmente ocupado pelo cimento e a água. Os espaços remanescentes não ocupados pelo cimento ou pelos produtos de sua hidratação constituem os vazios capilares, e seu volume total é conhecido como porosidade. Os vazios capilares formam uma rede de poros com formas irregulares, distribuídos aleatoriamente, sendo responsáveis pela permeabilidade da pasta. Essa propriedade depende da relação a/c e do grau de hidratação, de modo que em pastas densas os poros capilares podem ser segmentados pelos sólidos hidratados. Os macroporos possuem dimensão maior do que 50 nm e o aumento do seu teor é prejudicial à resistência e à permeabilidade da pasta de cimento. Já os microporos, com dimensões que variam de 5 a 50 nm, exercem maior influência na retração por secagem, que ocorre pela retirada da água submetida à tensão capilar nesses poros. Na figura 19 estão dispostos os intervalos dos diâmetros dos vazios da pasta de cimento endurecida.

Os vazios introduzidos pelo ar incorporado, por efeito de aditivos, ou aprisionados na pasta fresca durante a mistura são geralmente esféricos e tem dimensões que variam de 50 a 200 μm , para os primeiros, podendo chegar a 3 mm, no caso do ar aprisionado. Assim sendo, os vazios do incorporado, quando não introduzidos com a intenção de seccionar os poros capilares, ou aprisionado na mistura, possuindo dimensões muito maiores do que os vazios capilares, são capazes de afetar negativamente a resistência e aumentar a permeabilidade.

De acordo com Neville (1997), admite-se que a água combinada quimicamente nas reações de hidratação do cimento seja 23% da massa de cimento anidro e os sólidos resultantes ocupam um volume maior do que o cimento anidro e menor do que a soma dos volumes do cimento seco e da água não evaporável (consumida nas reações), diferindo por um fator de aproximadamente 0,254 do volume dessa água.

No trabalho de Quarcioni et al (2009) foram avaliadas argamassas mistas de cimento Portland e cal hidratada em vários traços, as quais tiveram sua porosidade estimada em função dos volumes percentuais ocupados por seus materiais constituintes e pelos volumes de ar incorporado e da água evaporável nas misturas.

Na metodologia utilizada nesse trabalho os traços em massa foram convertidos em traço em volume, em função das massas específicas dos seus componentes. Desse modo, foram obtidos os volumes unitários do cimento, cal e areia nas misturas, além da água, que foi subdividida em água combinada (23% da massa de cimento) e água evaporável, correspondente ao excedente do total da água nas misturas.

A partir dos volumes anteriormente obtidos, efetuou-se o cálculo dos volumes percentuais de cada componente, tendo-se como base o volume total das misturas. Para o cálculo desses volumes foi considerado o teor de ar incorporado como o complemento dos 100% do volume das misturas frescas.

Por fim, os volumes percentuais dos componentes das argamassas mistas no estado endurecido foram obtidos a partir dos volumes por eles ocupados no estado fresco. Estimou-se a porosidade das argamassas pela soma dos volumes percentuais de água evaporável com o teor de ar incorporado.

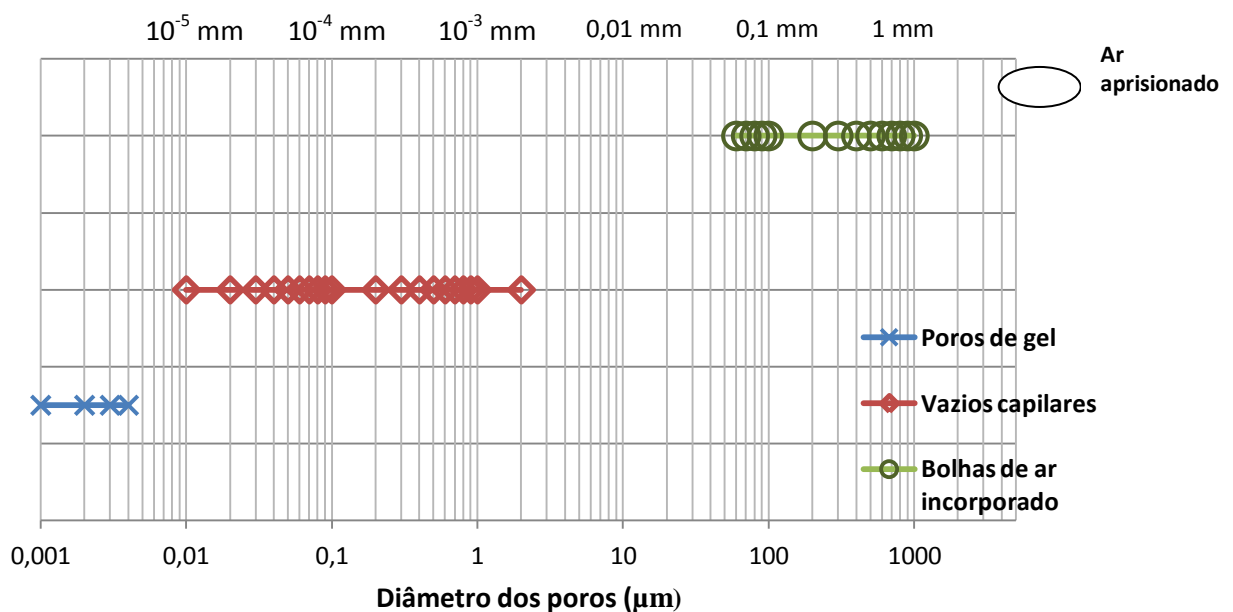


Figura 19 – Intervalos das dimensões dos poros da pasta de cimento endurecida (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 1994)

ZONA DE TRANSIÇÃO AGREGADO-PASTA DE CIMENTO

A zona que se inicia na interface do agregado até a pasta de cimento que o envolve é denominada de zona de transição, caracterizando-se pela presença de grandes cristais de hidróxido de cálcio na microestrutura dessa região. Devido a maior relação água/cimento na superfície do agregado, ocorre nesta região a formação de grandes cristais orientados desses produtos, resultando em uma estrutura mais porosa e com menor resistência do que o resto da pasta. A espessura da zona de transição é também função do tamanho do agregado, sendo mais espessa quanto maior for o tamanho do agregado, de modo que em concretos, há a formação dessa zona tanto no agregado miúdo quanto na interface do agregado graúdo, mas nesse último a sua espessura é maior.

Com base nas considerações de Mehta e Monteiro (1994), a zona de interface agregado-pasta exerce um papel importante na resistência da pasta do concreto e da argamassa, como também do módulo de elasticidade. Além do grande volume de vazios e dos cristais orientados de hidróxido de cálcio, a zona de transição está sujeita às tensões oriundas de movimentos diferenciais que surgem, por exemplo, no resfriamento do compósito. Este efeito provoca o aparecimento de microfissuras pré-existentes na zona interfacial o que, em geral, a torna o plano preferencial de rompimento sob estado de tensão. Até um nível de 70% da resistência última, observa-se um incremento das deformações por unidade de força aplicada, em virtude do aumento das fissuras presentes na zona de transição, apresentado um comportamento elasto-plástico. Com o aumento gradativo da tensão, novas fissuras são iniciadas nos poros grandes da pasta, que propagam-se até se unirem às fissuras originadas na zona de transição, tornando o sistema de fissuras contínuo e o material rompe. Deve-se destacar que o nível de tensão para a propagação das fissuras discutidas anteriormente é bem maior no esforço à compressão do que no esforço à tração, no qual as fissuras propagam-se rapidamente e com um menor nível de tensão.

Uma análise da zona de transição foi realizada nos estudos de Rossignolo (2009), por meio de verificações das relações entre as massas atômicas de alguns óxidos presentes na pasta de cimento como SiO_2 (Si), CaO (Ca), Fe_2O_3 (Fe), Al_2O_3 (Al), associando-os à presença dos produtos hidratados. Dessa forma, a espessura da zona de transição foi obtida através de determinações ponto a ponto ao longo de uma linha perpendicular à interface agregado-pasta, podendo-se notar que na zona de transição, os valores obtidos para a relação Ca/Si

apresentaram valores maiores do que aqueles obtidos no interior da matriz, devido à maior concentração de hidróxido de cálcio naquela zona. Além do menor da relação Ca/Si, os pontos fora da zona de transição apresentaram uma certa estabilização de seus valores, conforme podemos observar na figura 20

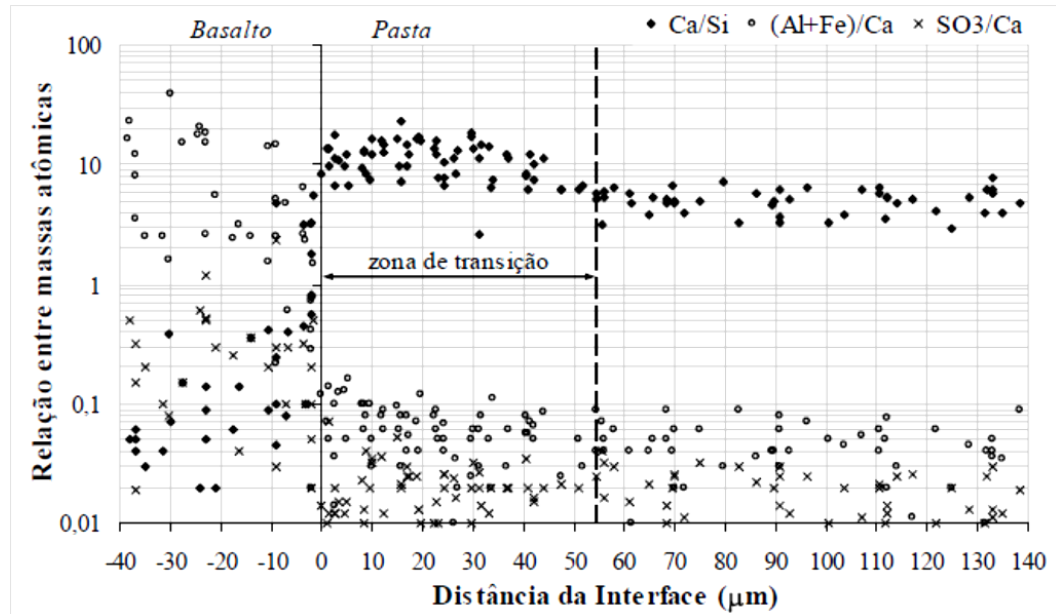


Figura 20 – Perfil da relação Ca/Si (ROSSIGNOLO, 2009)

Wasserman e Bentur (1996) estudaram as interações com a pasta de cimento de agregados leves sintetizados a partir de cinzas volantes e com diferentes propriedades, buscando identificar os fatores, além da resistência do agregado, que influenciam a resistência mecânica do concreto. Os perfis da relação Ca/Si foram empregados para analisar o processo físico de densificação da zona de transição agregado-pasta, devido à absorção do agregado leve. A figura 21 mostra o perfil Ca/Si da zona de transição desses agregados, onde a solução iônica de cálcio da pasta de cimento conseguiu penetrar no interior do agregado, fazendo com que o perfil Ca/Si apresentasse valores mais altos nesta região aos 90 dias de idade. Por outro lado, a relação Ca/Si caiu progressivamente a partir da região de interface, estabilizando a uma distancia menor do que 50 micra, e, portanto, com pequena espessura da zona de transição. Em outras palavras, a absorção desse agregado leve reduziu o acúmulo de água e a formação de região porosa, rica em hidróxido de cálcio.

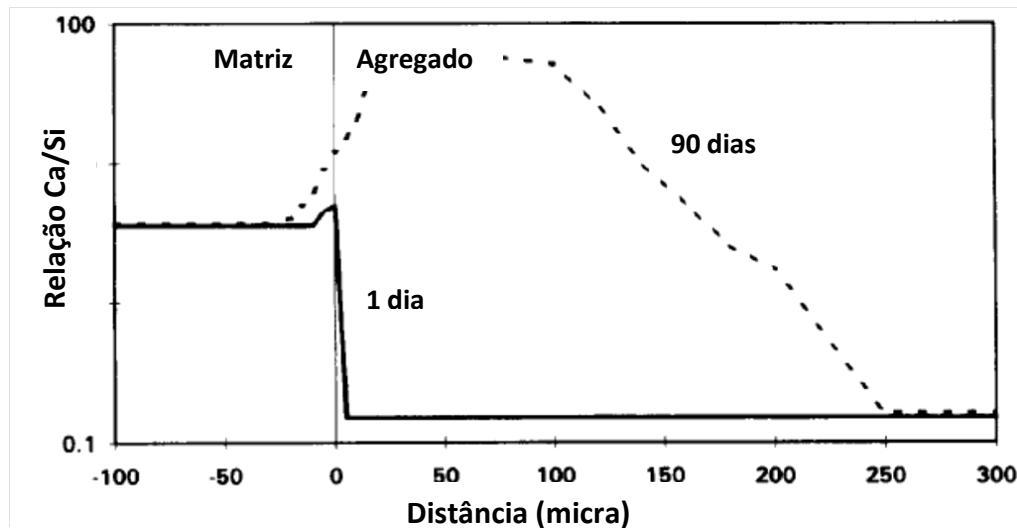


Figura 21 – Perfis Ca/Si do concreto devido à absorção do agregado leve (WASSERMAN e BENTUR, 1996).

2.3.6 - PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

A argamassa, logo após a mistura dos seus materiais, apresenta-se no estado plástico, e, à medida que se processam as reações de hidratação do cimento e a formação de produtos cristalinos, ocorre a mudança do estado fluido para um estado rígido, denominado de pega. Após esse período, a argamassa apresenta-se no estado endurecido, com propriedades que lhes são inerentes como capacidade de absorção e deformação, resistência mecânica e resistência de aderência.

Por tratar-se de uma mistura de partículas de agregados, com tamanhos e formas variadas, em uma pasta de cimento, a argamassa apresenta uma estrutura heterogênea e relações complexas entre as fases agregado-pasta, em especial na zona de interface entre ambas. Considerando, também, que as propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna, e, assim sendo, mudanças em sua estrutura podem provocar modificações em suas propriedades (Mehta e Monteiro, 1994), é conveniente se fazer primeiramente uma análise da microestrutura dos produtos hidratados do cimento antes de discutir as propriedades da argamassa endurecida.

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Araújo Jr (2004) classifica as propriedades físico-mecânicas da argamassa de revestimento como sendo de natureza adesiva e natureza aglomerante. A primeira refere-se à capacidade do revestimento em aderir à superfície do substrato, a qual foi aplicada. Já a propriedade de natureza aglomerante é considerada como aquela que está relacionada com o grau de consolidação da estrutura interna formada pelos agregados envolvidos pela pasta de cimento, e, dessa forma, com efeitos sobre a resistência à compressão e à tração, permeabilidade e capacidade de absorver deformações. Carasek (2007) considera que a aderência é a principal propriedade do revestimento de argamassa, da qual depende o bom desempenho das demais funções, tendo em vista que a aderência adequada permite a absorção de tensões superficiais na interface com o substrato, que, dependendo do módulo de elasticidade e resistência do material, irá se deformar sem ruptura, ou por meio de microfissuras, não comprometendo a sua durabilidade e estanqueidade.

a) RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência de um material pode ser definida como a sua capacidade de resistir à tensão sem ruptura, as quais são identificadas algumas vezes com o aparecimento de fissuras. A natureza da resistência dos sólidos da pasta de cimento caracteriza-se pelas forças de atração de Van Der Waals entre superfícies sólidas, as quais dependem da extensão e natureza de tais superfícies. Assim, os pequenos cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais, possuindo área específica elevada, tem alta capacidade de aderência, não somente uns aos outros, mas também aos cristais de hidróxidos de cálcio e aos agregados.

Outro fator importante a ser considerado na resistência dos materiais sólidos é a relação inversa existente com a porosidade. Todavia, os vazios com menores dimensões se encontram sob a influência de forças superficiais, e, assim, não contribuem para a efetiva redução na resistência, ao contrário, a concentração das tensões oriundas de um carregamento começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras pré-existentes na zona de interface agregado-pasta. (Mehta e Monteiro, 1994).

Admite-se que a resistência da argamassa e a porosidade estejam relacionadas conforme a equação 2.1

$$f_c = a x^3 \quad (2.1)$$

Onde a é a resistência intrínseca do material com porosidade zero e x é a fração de sólidos em relação aos vazios do sistema, e, portanto, a porosidade será igual a $(1 - x)$. A figura 22 ilustra a variação da resistência à compressão em função da relação sólidos/vazios em três tipos de argamassa, em um estudo citado por Mehta e Monteiro (1994). De acordo com a equação da curva de interpolação, a resistência à compressão da argamassa quando a relação sólidos/vazios é igual a um, ou seja, porosidade zero, é de, aproximadamente 234 MPa.

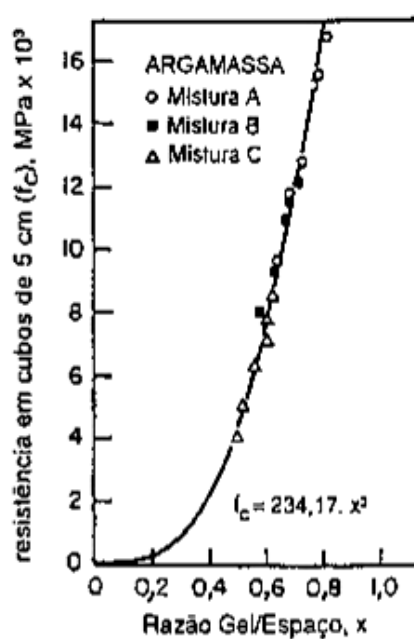


Figura 22 – Variação da resistência em função da porosidade da argamassa (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A ruptura de um material, como dito anteriormente, relaciona-se com o aparecimento de fissuras. Callister (2002) considera que qualquer processo de ruptura dos materiais na engenharia envolve duas etapas, a formação e a propagação de trincas, sendo que a modalidade da ruptura depende essencialmente de como elas se propagam. Na fratura dúctil, existe uma extensa deformação na vizinhança de uma trinca, a qual resiste em aumentar a sua extensão a menos que haja uma maior intensidade na tensão aplicada. Essa

trinca é chamada de estável. Por outro lado, se as trincas se espalham de maneira relativamente rápida, onde, uma vez iniciadas, irão continuar espontaneamente sem um aumento da tensão, ocorrerá uma ruptura do tipo frágil e tais trincas são chamadas de instáveis.

No contexto da estabilidade das fissuras diferenciam-se as resistências à tração e à compressão do concreto ou argamassa. A energia requerida para o rompimento sob compressão axial é substancialmente maior do que a necessária para o rompimento à tração. Sob compressão, até aproximadamente 50% do limite da resistência, as fissuras existentes na zona de transição são consideradas estáveis, em consequência, o material apresenta grandes deformações sem causar ruptura. A partir desse nível de tensão, as fissuras tendem a tornar-se instáveis, crescendo até a união com as outras formadas nos macroporos da matriz. Sob estado de tração a estabilidade das fissuras é bastante reduzida, de modo que a propagação e a interligação das fissuras é bastante rápida. O rompimento do material, nesse caso, se dá pela união de algumas fissuras, e não por numerosas fissuras, como no caso da tensão sob compressão.

Os ensaios comumente executados para avaliação da resistência à tração do concreto e argamassa são os de tração por compressão diametral e o de tração por flexão a quatro pontos, cujo esquema está mostrado na figura 23

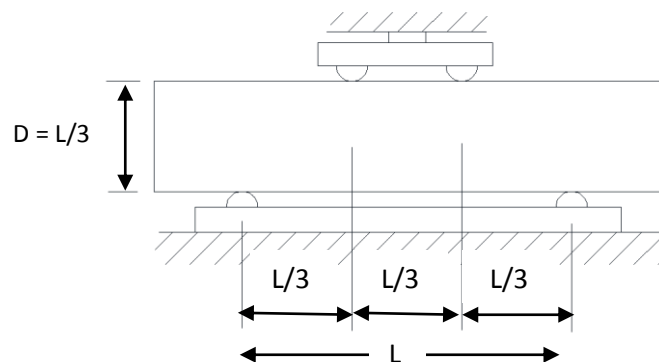


Figura 23 - Ensaio de tração por flexão a quatro pontos (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A figura 24 mostra o esquema estático do ensaio de flexão a quatro pontos, onde a carga aplicada é subdividida em duas cargas iguais a P , concentradas em pontos eqüidistantes aos apoios A e B.

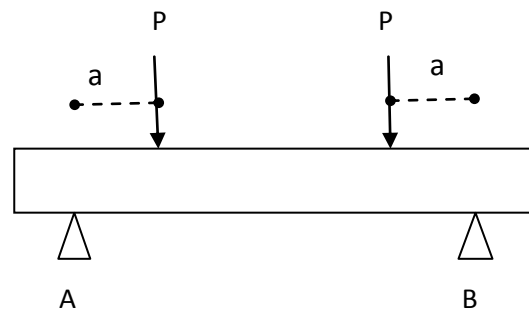


Figura 24 – Esquema estático do ensaio de flexão a quatro pontos

Segundo Nash (1974), no centro do corpo de prova, entre os apoios A e B, ocorre flexão pura, atuando somente o momento fletor, que é calculado multiplicando-se o valor da carga P pela distância ao apoio a , conforme a figura 25.



Figura 25 – Momento fletor na flexão a quatro pontos (NASH, 1974)

O momento fletor (M) introduz tensões de compressão (σ_c) e de tração (σ_t) nas partes superior e inferior da seção transversal do corpo-de-prova, respectivamente, de acordo com a figura 26, onde LN é a linha neutra, lugar geométrico da seção transversal onde não ocorrem tensões. Os valores dessas tensões em seções retangulares com pequenos deslocamentos podem ser calculadas conforme as equações 2.2 e 2.3, considerando um corpo-de-prova com base b e altura h .

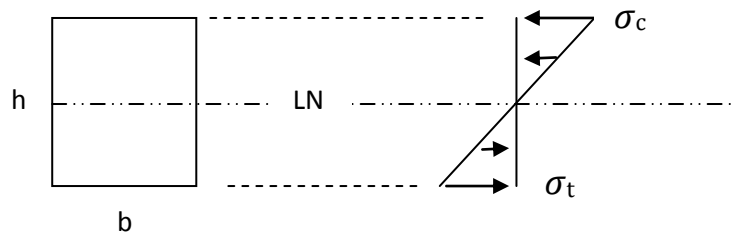


Figura 26 – Tensões da flexão pura (NASH, 1974)

$$\sigma_t = \frac{M}{I} x \frac{h}{2} \quad (2.2)$$

Onde:

M = Momento fletor

I = Momento de inércia da seção transversal do corpo-de-prova, calculado pela equação 2.2

H = Altura do corpo-de-prova

$$I = \frac{b x h^3}{12} \quad (2.3)$$

A resistência do concreto é influenciada pela geometria do corpo de prova, como visto anteriormente, e ainda por uma série de outros fatores, dentre eles, os parâmetros adotados para o ensaio, a porosidade do agregado, da matriz e da zona de transição, como mostra o esquema da figura 27, esses últimos, dependentes de outros fatores como a relação água/cimento, grau de hidratação da pasta e propriedades físicas dos agregados – distribuição granulométrica, forma e dimensão máxima e mínima. Cabe salientar que nesse contexto, a influência da resistência do agregado é, em geral, desconsiderada por apresentar resistência muito maior do que a pasta endurecida de cimento, entretanto outras características adquirem um grau de importância nesse tipo de avaliação.

Neville (1997) avalia que a textura superficial do agregado tem influência sobre a sua aderência à pasta de cimento, de modo que, partículas com superfície mais áspera terão melhor aderência devido ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento. Outro fator relacionado aos agregados com influência na resistência do concreto é a sua capacidade de

absorção, no sentido de que é possível que a água absorvida por parte dos agregados reduza a relação água/cimento efetiva da pasta de cimento, trazendo efeitos sobre a sua porosidade.

Em termos de resistência para a argamassa de revestimento, os valores exigidos pela NBR 13281/2005 são relativamente baixos, conforme o quadro 7. Porém, o grau de consolidação da estrutura interna da argamassa não está relacionado somente ao aumento da resistência mecânica, mas, também, à capacidade de resistir esforços de desgaste superficial e impactos, propriedades importantes para o revestimento, como também ao aumento da sua impermeabilidade

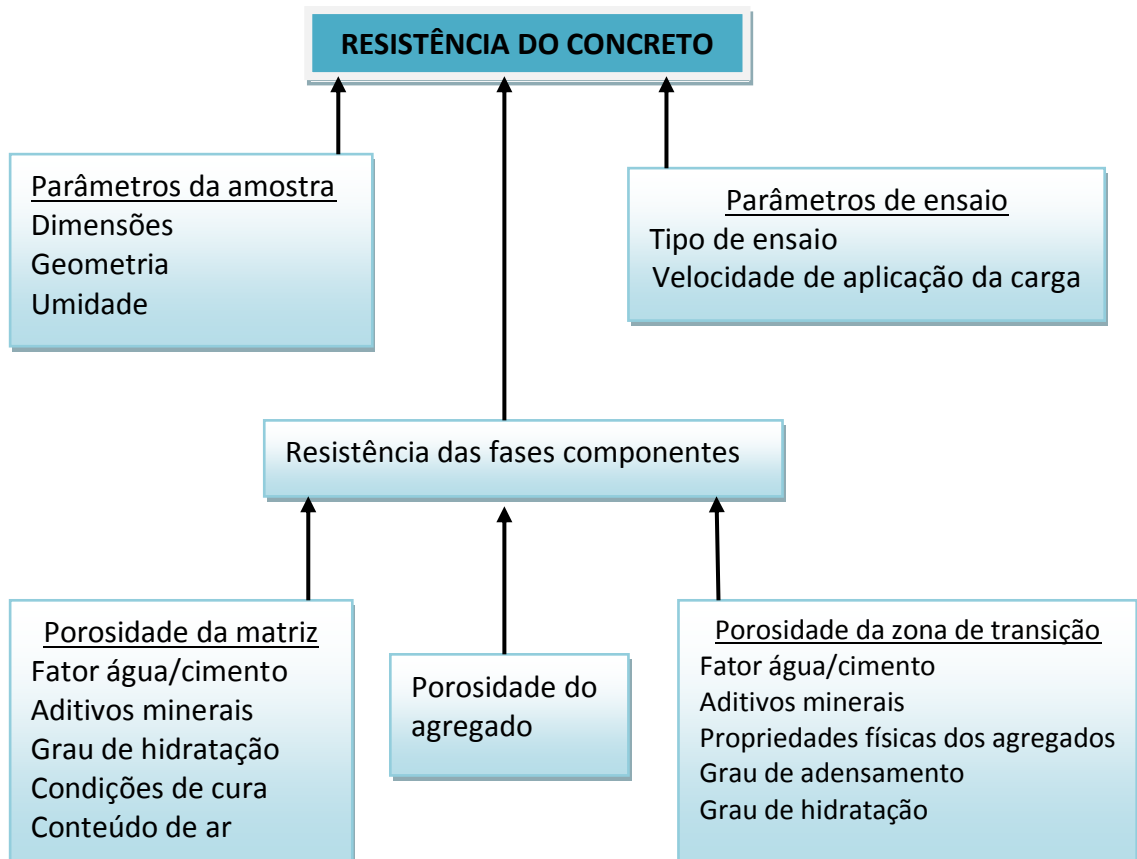


Figura 27 - Interação dos fatores que influenciam na resistência do concreto. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Quadro 7 - Exigências mecânicas para argamassas (NBR 13281/2005)

Classes	P MPa	M Kg/m ³	R MPa	C g/dm ² /min ^{1/2}	D Kg/m ³	U %	A MPa
1	≤ 2,0	≤ 1.200	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1.400	≤ 78	≤ 0,20
2	1,5 a 3,0	1.000 a 1.400	1,0 a 2,5	1,0 a 2,5	1.200 a 1.600	72 a 85	≥ 0,20
3	2,5 a 4,5	1.200 a 1.600	2,0 a 4,0	2,0 a 4,0	1.400 a 1.800	80 a 90	≥ 0,30
4	4,0 a 6,5	1.400 a 1.800	3,0 a 7,0	3,0 a 7,0	1.600 a 2.000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1.600 a 2.000	5,0 a 12,0	5,0 a 12,0	1.800 a 2.200	91 a 97	-
6	> 8,0	> 1.800	> 10,0	> 10,0	> 2.000	95 a 100	-

Legenda: P – Resistência à compressão (NBR 13279/2005)
M – Densidade seca de massa aparente (NBR 13280/2005)
R – Resistência à tração na flexão (NBR 13279/2005)
C – Coeficiente de capilaridade (NBR 15259/2005)
D – Densidade de massa no estado fresco (NBR 13278/2005)
U – Retenção de água (NBR 13277/2005)
A – Resistência potencial de aderência à tração (NBR 15258/2005)

b) PERMEABILIDADE E CAPILARIDADE

A permeabilidade é definida como a facilidade com que um fluido escoar através de um sólido. No caso da argamassa de revestimento, relaciona-se com a função de estanqueidade, propriedade muito importante para os revestimentos de fachada. Os vazios capilares são formados pela saída da água excedente e que não foi consumida pelas reações de hidratação do cimento. Essa quantidade excedente de água provoca, na mistura fresca, o afastamento dos grãos de cimento, que vai, paulatinamente, cedendo espaço para os produtos destas reações, que pode, dependendo da relação água/cimento e do grau de hidratação, obstruir ou segmentar os poros capilares. Em pastas com relação água/cimento maior do que cerca de 0,36, o volume de produtos hidratados não é suficiente para preencher os espaços vazios deixados pela evaporação da água excedente, e em pastas com relação água/cimento maior do que 0,70, mesmo a hidratação completa do cimento não seria suficiente para obstruir todos os capilares (CAMPITELLI, 1987). Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a porosidade capilar total diminui com o decréscimo da relação

água/cimento ou aumento do grau de hidratação, de modo que os poros de gel e os pequenos capilares não contribuem para o aumento da permeabilidade da pasta, ao contrário, a redução da porosidade capilar total está associada à redução dos poros grandes.

Santos (2006) considera que a permeabilidade é uma grandeza derivada de condições em que há contato permanente com a água, como em estruturas submersas. Tendo em vista os revestimentos de argamassa, os quais estão submetidos às condições naturais de molhagem e secagem, a absorção capilar é um parâmetro para análise melhor do que a permeabilidade. A ação capilar dos líquidos se deve à tendência em ascender pelos tubos capilares como consequência da tensão superficial e da diferença de pressão que ocorre na interface da água com o ar no interior dos poros.

A absorção da argamassa endurecida é uma maneira de avaliar a porosidade aberta, isto é, o volume de poros acessíveis à água, que pode ser determinado pela quantidade de água absorvida em um dado intervalo de tempo. Assim, na análise da cinética de absorção capilar são normalmente usados os coeficientes de capilaridade e de sorptividade. O coeficiente de capilaridade (k) pode ser obtido pela relação da altura coluna úmida (H) no interior do corpo de prova submetido ao ensaio de absorção pela quantidade de tempo (t), conforme a equação 2.4

$$H = k \times \sqrt{t} \quad (2.4)$$

Já o coeficiente de sorptividade (S) é calculado de acordo com a equação 2.5

$$X = S \times \sqrt{t} \quad (2.5)$$

Onde:

X = Líquido absorvido por unidade de área da seção transversal do corpo-de-prova em cm^3/cm^2

t = tempo em min

A taxa de absorção de água nas primeiras horas aumenta em função da raiz quadrada do tempo, e, à medida que os poros saturam-se, essa taxa tende a reduzir. Outro fator de redução da taxa inicial de absorção é o grau de exposição das faces externas do corpo-de-prova. As amostras com faces expostas ao ar livre tendem a perder umidade para o ambiente externo por evaporação e, com isso, a umidade interna cai rapidamente após um período de ganho inicial.

c) MÓDULO DE ELASTICIDADE

O grau de deformação de uma estrutura depende da magnitude da tensão imposta. O regime de deformação onde a tensão é proporcional à deformação é denominado de regime elástico, e a constante de proporcionalidade dessa relação é denominada de módulo de elasticidade. Esse módulo pode ser considerado como uma resistência do material à deformação elástica (CALLISTER, 2002). Quanto maior for esse módulo menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma dada tensão. No caso dos compósitos cimentícios não se observa proporcionalidade entre tensões e deformações, seja sob compressão ou tração, e, dessa forma, o gráfico obtido não apresenta linearidade, o que foi explicado por Mehta e Monteiro (1994) para o concreto, devido ao estado de microfissuração progressivo como segue:

Até aproximadamente 30% da última carga, as fissuras pré-existentes na zona de transição permanecem estáveis, e a curva tensão-deformação tende a ser linear. Acima dessa carga, o aumento da tensão provoca o aumento das fissuras em número, tamanho e largura, a relação tensão-deformação também aumenta e a respectiva curva tende a se desviar de uma linha reta. Acima de 75% da carga última, não só as fissuras da zona de transição tornam-se instáveis, como novas fissuras surgem na matriz, o que provoca grandes deformações, inclinando a curva tensão-deformação na direção vertical.

O módulo secante é obtido pela declividade de uma reta traçada da origem a um ponto do diagrama tensão-deformação. A NBR 8522/2003 afirma que o módulo de elasticidade é equivalente ao módulo secante entre 0,5 MPa e 30% da tensão última obtida no ensaio de resistência à compressão.

d) RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno que ocorre devido à rugosidade da base de aplicação ou da penetração em seus poros da pasta aglomerante ou da própria argamassa. Segundo Carasek (2007), a dissolução do cimento em água libera íons de aluminato, sulfato e cálcio que, por sucção capilar promovida pela porosidade da base, esses íons são transportados para o interior dos poros onde precipitam-se formando os compostos denominados de etringita, que contribui para o intertravamento da camada de revestimento no substrato. Desse mecanismo decorre que quanto maior a superfície de contato entre a argamassa de revestimento e o substrato, maior será a aderência obtida, e, portanto, a trabalhabilidade e a energia de aplicação, são fatores importantes relacionados à aderência da argamassa ao substrato. Nesse aspecto, argamassas mistas com substituição parcial do cimento pela cal, que por sua finura, possui propriedades plastificantes e de retenção de água, preenchem mais facilmente toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão e resistência de aderência (CARASEK, 2007).

Podemos notar, a partir do exposto, que a resistência de aderência da argamassa é influenciada por diversos fatores, tanto àqueles relacionados à sua própria constituição, como também pelas propriedades do substrato, pelo processo de execução e também pelas condições climáticas, como segue:

- Argamassa: Reologia, retenção de água, adesão inicial
- Substrato: Rugosidade, porosidade, sucção de água
- Execução: Energia de aplicação, limpeza e preparo da base
- Condições climáticas: Temperatura, umidade relativa, ventos

Em alvenaria de bloco, a porosidade característica do material influencia diretamente o desempenho do revestimento, uma vez que a resistência de aderência é atribuída em geral à penetração da pasta aglomerante no substrato. Alta capacidade de absorção de água dos blocos do substrato podem, em conjunto com a evaporação na face livre do revestimento, provocar retração plástica ao nível de provocar microfissuras na interface com o substrato, prejudicando a aderência. Por outro lado, blocos com baixa capacidade de sucção podem ocasionar o aparecimento de uma fina camada de água nesta região, podendo ocorrer, possivelmente, uma interface porosa. O emprego de tratamento superficial do substrato

com o objetivo de uniformizar a absorção de água ou aumentar a rugosidade pode minimizar essas ocorrências. Pode-se citar como exemplo a aplicação de chapisco (BAUER, 2005).

A avaliação da aderência dos revestimentos é realizada por meio de ensaio destrutivo, o qual mede a máxima tensão que um revestimento resiste quando submetido a um esforço normal de tração. No Brasil, a norma NBR 15258/2005 prescreve a metodologia para realizar essa avaliação, na qual o revestimento é cortado perpendicularmente ao seu plano, delimitando-se corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 5 cm de diâmetro, ou quadrados com 10 cm de lado. Sobre os corpos de prova são colados dispositivos (pastilhas) onde será acoplado o equipamento para promover esforço de tração até a ruptura. A resistência de aderência é calculada pela divisão da carga de ruptura registrada no equipamento pela área do corpo de prova.

As especificações normativas da NBR 13749/1996 (quadro 8) prescrevem os níveis mínimos de resistência de aderência, sem mencionar os níveis máximos. Revestimentos com altos valores de resistência de aderência tendem a apresentar geralmente alto módulo de elasticidade, e, dessa forma, estão mais propensos a um maior grau de fissuração em virtude de deformações impostas por movimentos de natureza estrutural ou termo-higroscópica (BAUER, 2005). Isto significa que alto valor de resistência de aderência ao substrato não garante necessariamente, adequação e durabilidade do revestimento de argamassa.

Quadro 8 – Limites de resistência de aderência à tração (NBR 13749, 1996)

Local de aplicação		Acabamento	Resistência de aderência (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto			≥ 0,20

Além dos valores de resistência de aderência, outro aspecto importante que deve ser observado nesse ensaio é tipo de ruptura ocasionada pelo esforço de tração nos corpos de prova. Esta pode ocorrer em diferentes interfaces, como mostra a figura 2.28. Carasek

(2007) menciona que quando a ruptura é do tipo coesiva (tipos B e C da figura 28), os valores da resistência de aderência são menos preocupantes, exceto quando é muito baixo, já para a ruptura do tipo adesiva (tipo A da figura 28), ocorrendo na interface argamassa-substrato ou argamassa-chapisco, os valores devem ser mais altos, pois existe um potencial maior para patologia. Silva (2004) salienta que na ruptura do tipo A, o valor da resistência de aderência é igual ao obtido no ensaio, já nos casos das rupturas dos tipos B, C e D, a resistência de aderência é maior do que o valor obtido no ensaio.

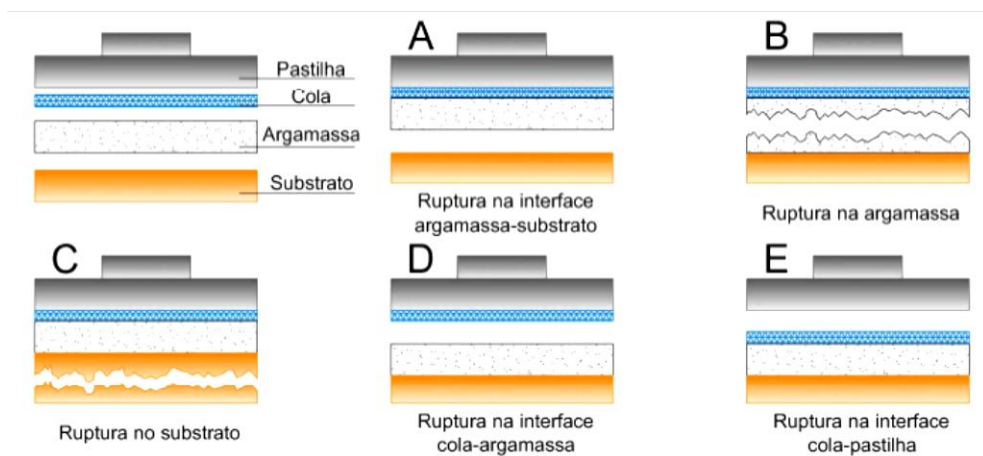


Figura 28 – Tipos de ruptura do ensaio de aderência à tração de revestimentos (CARASEK, 2007)

Os resultados do ensaio de resistência de aderência geralmente apresentam grande dispersão, devido à influência de diversos fatores intervenientes, como citado anteriormente (CARASEK, 2007). Bauer (2005) considera que isto pode ser atribuído à natureza dos materiais dos substratos convencionais, que apresentam elevada variabilidade quanto às suas características. Scartezinni (2002) afirma que a aplicação de chapisco no substrato de alvenaria contribui minimiza a diferença da absorção das juntas de argamassa e os blocos para cerca de 21%. Os estudos de campo de Gonçalves (2004) realizado com grandes amostras de revestimento de argamassa industrializada executado com rigor no controle das variáveis comprovam a alta variabilidade natural do revestimento de argamassa aplicada manualmente. Nesse estudo diferentes lotes de amostra apresentaram diferentes tendências de distribuição da resistência de aderência à tração.

2.4 – COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM AGREGADOS PLÁSTICOS

2.4.1 - INTRODUÇÃO

Serão apresentados nesta seção, os principais resultados, do ponto de vista desse estudo, de trabalhos científicos que tratam do tema do aproveitamento de resíduos plásticos como agregado em materiais cimentícios.

Nos últimos anos, o advento das novas tecnologias e intensificação do processo de industrialização, o crescimento e o perfil de consumo da população, transformaram a geração de resíduos em um problema no cenário ambiental, dado a escassez de áreas para adequada disposição e o alto custo envolvido no gerenciamento de resíduos, e os problemas com o saneamento público e contaminação ambiental.

As tecnologias desenvolvidas visando a reciclagem e/ou reutilização de resíduos contribuem para a resolução desses problemas a partir da produção de novas matérias-primas alternativas, podendo diminuir os custos dos setores industriais geradores e consumidores de resíduos, e, também preservando o ambiente. (LUCAS e BENATTI, 2008; ROCHA e CHERIAF, 2004).

Resíduos sólidos descartados de diversas naturezas como pneus, plásticos, vidro, aço (SIDDQUE *et AL*, 2007) foram utilizados em estudos nos últimos anos para avaliar o comportamento de materiais cimentícios após a incorporação desses resíduos. Em relação a uso do plástico reciclado em concreto, Siddique *et al* (2007) promoveram uma revisão de diversos trabalhos científicos, na qual as propriedades do concreto fresco e endurecido foram avaliadas. Os resultados, em geral, demonstram que os agregados de plástico reciclado no concreto reduz a resistência mecânica, efeito atribuído pela deficiência na aderência do agregado plástico com a pasta de cimento e pela menor resistência característica do plástico em relação aos agregados naturais. Destaca-se também a redução do módulo de elasticidade e do peso específico dos compósitos. Por outro lado o abatimento do concreto, medidos pelo ensaio do *slump*, aumentou com a inclusão do agregado leve de plástico reciclado.

2.4.2 – AGREGADOS DE PLÁSTICO RECICLADO EM CONCRETO

Naik et al (1996) estudaram experimentalmente o concreto com a adição de 0,5% a 4,5% em peso, de polietileno de alta densidade (PEAD) pós-consumo. Um traço sem a inclusão de partículas de PEAD reciclado e com resistência à compressão aos 28 dias de 35 MPa, foi adotado como referência. Embalagens obtidas de reciclagem foram trituradas e as partículas com dimensão mínima de 4,8 mm foram selecionadas para serem adicionadas ao traço de referência. Os resultados mostram que a resistência à compressão do concreto com até 0,5% de PEAD reciclado não sofreu redução, porém, acima desse teor, o percentual de redução foi de aproximadamente 45%, com adição de 2% de PEAD reciclado.

Choi *et al* (2004) utilizaram agregados leves obtido de garrafas PET, revestidos com escórias de alto forno granulada, nos teores de 25%, 50% e 75% em relação ao volume total de agregados. As partículas tinham dimensões entre 5 e 15 mm e o ar incorporado em todas as misturas foi mantido em $4,5 \pm 1\%$. Os resultados mostrados na Tabela 2 apresentam uma ligeira redução da resistência à compressão quando o percentual de agregado leve de PET foi de até 25% em relação ao volume de agregados. A resistência à tração, por outro lado, apresentou maior percentual de redução. O aumento do percentual de agregado leve de PET também ocasionou aumento no abatimento do concreto fresco, que foi atribuído à forma esférica e a superfície lisa desse agregado. As imagens feitas por MEV revelam que a falha na zona de transição do agregado leve de PET (figura 29a) é mais uniforme e ligeiramente maior do que aquela observada na zona de transição do agregado natural (figura 29b). Isso pode ter contribuído para reduzir a diferença na resistência à compressão citada anteriormente.

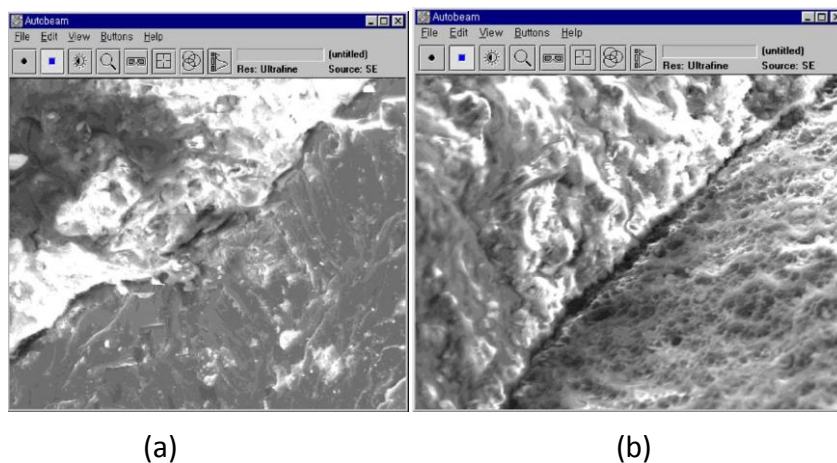


Figura 29 – Imagens por MEV da zona de transição: (a) do agregado natural; (b) do agregado leve de PET

Tabela 2 – Resultados das propriedades dos traços de concreto (CHOI *et al*, 2004)

a/c	% PET	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Slump (cm)
		3 dias	7 dias	28 dias			
0.53	0	18.4	24	31.5	3.27	23.5	10,0
	25	17.6	23.4	29.7	2.65	23.0	15,3
	50	17.1	21.5	26.3	2.25	21.2	19,9
	75	14.8	19.2	21.8	2.04	18.5	22,3
0.49	0	19.0	27.8	34.6	3.27	23.3	10,5
	25	18.8	26.7	33.7	2.76	22.8	15,4
	50	18.6	24.3	29.1	2.35	18.1	18,0
	75	15.8	21.6	23.2	1.94	16.7	21,4
0.45	0	24.8	31.3	37.2	3.32	25.5	13,5
	25	23.2	27.4	33.8	2.80	18.7	16,9
	50	22.0	26.5	31.8	2.55	17.3	18,4
	75	20.7	24.8	24.9	2.04	15.6	20,5

Zainab *et al* (2007) trabalharam com resíduos de plástico pós-consumo triturados em forma de flocos (80% de polietileno e 20% de polipropileno), substituindo a areia do concreto nos percentuais de 10, 15 e 20%. Foi usado como referência o traço com os seguintes consumos unitários: areia – 715 kg/m³, brita – 1020 kg/m³, cimento – 380 kg/m³, fator a/c – 0,53. As densidades da mistura fresca e seca, o abatimento e as resistências à compressão e à flexão diminuem à medida que aumenta o percentual de substituição da areia. A redução das propriedades mecânicas é justificada pela pouca aderência do agregado plástico à pasta de cimento. É interessante notar que as amostras com maiores teores de plástico reciclado apesar de reduzir a resistência à flexão, atingiram maiores deflexões mesmo após a carga de pico (figura 30b), ao passo que a amostra de referência apresentou falha súbita típica da ruptura frágil do concreto simples (figura 30a). Os autores consideram que as partículas de plástico detêm a propagação das microfissuras da matriz de cimento durante a flexão, contribuindo para um aumento da ductilidade do compósito.

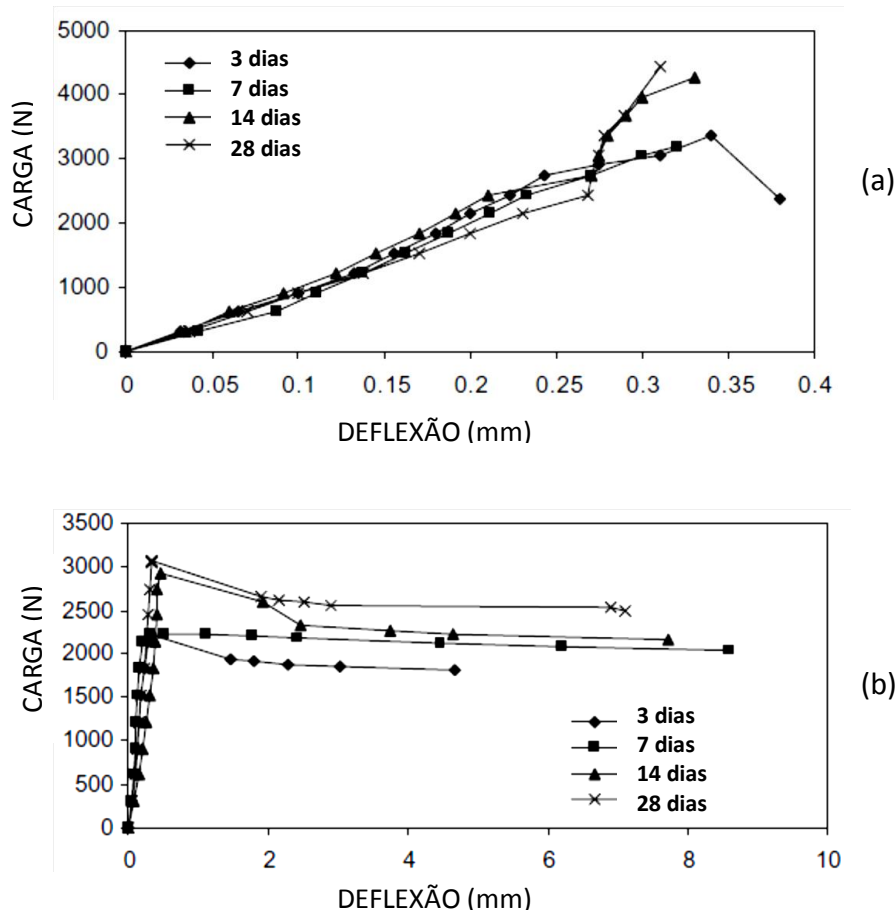


Figura 30 – Comportamento carga-deflexão na flexão do concreto: (a) com 0% de agregado plástico; (b) com 20% de agregado plástico. (ZAINAB *et al*, 2007)

Batayneh *et al.* (2007), substituíram até 20% do agregado miúdo do concreto por partículas de plástico, mantendo o fator a/c em 0,56. Eles concluíram que: (i) a adição de partículas plásticas acarretaram uma forte redução na resistência mecânica. Para uma substituição de 20%, a resistência à compressão caiu 72% em relação ao traço sem agregado de plástico. (ii) Comportamento similar, mas com menor efeito, foi obtido para a resistência à tração e à flexão. (iii) O abatimento medido reduziu com o aumento do teor de plástico no traço devido às formas irregulares dos resíduos poliméricos. Apesar da perda da resistência, o concreto com agregado plástico é admitido desde quando seja compatível com a resistência requerida para o respectivo elemento estrutural.

Kou *et al* (2008) avaliaram as propriedades do concreto leve com substituição de até 45% da areia em volume por raspas de tubos de PVC (figura 31) com módulo de finura aproximadamente duas vezes maior do que o da areia. Argila expandida como agregado graúdo foi utilizada em uma proporção constante nos traços, da mesma forma que o

cimento. Um superplastificante à base de naftaleno foi utilizado para ajustar a trabalhabilidade das misturas. Apesar do abatimento medido ter se mantido entre 170 e 175 mm, o aspecto visual das misturas frescas variou de homogêneo e consistente para o traço com 0% de PVC até áspero com sinais de exsudação para o traço com 45% de PVC. A resistência à compressão reduziu-se de 9,1% a 47,3% para os traços com 5% e 45% de PVC, respectivamente. A resistência à tração, realizada por compressão diametral, também diminuiu. Fatores como: (i) maior propagação das fissuras em torno das partículas de PVC, devido ao baixo módulo de elasticidade, (ii) superfície lisa e com água livre acumulada em torno das partículas de PVC, reduzindo a aderência com a pasta de cimento, e (iii) redução do empacotamento dos grãos devido à inclusão de partículas maiores de PVC, são apontados como causas para a perda de resistência mecânica. O módulo de elasticidade reduziu em aproximadamente 60% para o concreto com 45% de agregados de PVC. A retração por secagem também foi reduzida com o aumento do teor de partículas de PVC no concreto.

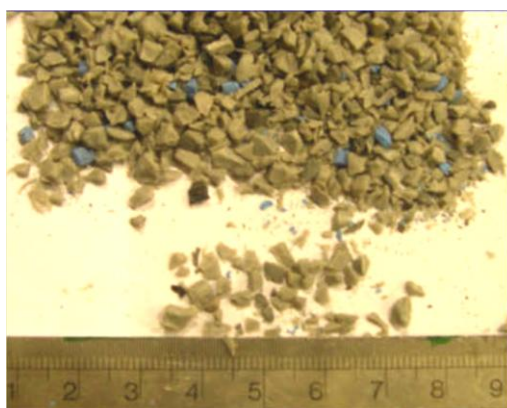


Figura 31 – Agregado leve de raspas de tubos de PVC. (KOU *et al*, 2008)

Outros estudos também utilizaram resíduos de garrafas PET como agregados em concreto. Albano *et al* (2009) substituíram 10% e 20% em volume do agregado miúdo por fragmentos de PET com as seguintes dimensões características: 0,26 cm (PET miúdo), 1,14 cm (PET graúdo) e uma mistura com 50% dessas frações. A presença das partículas de PET acarretou alterações na consistência do concreto, com redução do abatimento medido no ensaio do *slump*. A maior redução na resistência à compressão aos 28 dias foi verificada nos

traços com maior granulometria dos resíduos de PET, sendo que a mistura das frações apresentou a menor perda. A resistência à tração por compressão diametral reduziu de forma similar à compressão. Por outro lado, a redução do módulo de elasticidade verificada nas amostras de concreto com partículas de PET, não sofreu influência significativa do tamanho dessas partículas. A absorção de água por imersão aumentou com o teor de PET no concreto. Modro *et al* (2009) avaliaram dois tipos de resíduos de PET como agregados parciais do concreto: Um resíduo proveniente do descarte de uma empresa de reciclagem desse material, com forma granular fina e com presença de impurezas, denominado de areia de PET, e outro em forma de flocos, obtido da trituração de fitas de fixação de embalagens. A areia do traço de referência foi substituída em volume nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%. O abatimento verificado nas misturas com resíduos de PET mostram tendência de redução à medida que aumenta o percentual de resíduos na composição. A resistência à compressão foi ensaiada os 1, 3 e 7 dias e em todas as idades foram verificadas redução na resistência à compressão, verificando-se perdas significativas nos compósitos com areia de PET. As impurezas desse resíduo provavelmente causaram este efeito.

Um estudo com apenas um percentual de substituição de 5% em peso da areia do concreto por agregados obtidos de garrafas PET e com granulometria semelhante à da areia substituída foi realizado por Frigione (2010), caracterizando-se as propriedades do concreto fresco quanto à reologia e as propriedades mecânicas aos 28 e 365 dias. A partir de quatro traços tomados como referência, no qual foi substituído 5% do agregado miúdo, verificou-se que todas as misturas apresentaram características semelhantes com relação à reologia e homogeneidade, e também quanto à resistência mecânica, como observado na Tabela 3.

Os resultados desse estudo notabilizam-se pela pequena variação das resistências à compressão e à tração dos concretos com 5% de agregado miúdo de resíduos de PET em relação aos traços de referência. Da deformação atingida nas tensões adjacentes à tensão máxima e da forma da curva tensão-deformação (figura 32), observa-se que o concreto de referência apresentou uma ruptura mais frágil do que o concreto com agregados de PET. O módulo de elasticidade apresentou redução, e a forma de ruptura do concreto com agregado de PET indica que este poderá atingir uma deformação maior com manutenção da integridade do corpo de prova.

Tabela 3 – Resistências à compressão e à tração dos concretos (FRIGIONE, 2010)

Misturas	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	
	28 dias		365 dias		28 dias	
	MPa	Variação (%)	MPa	Variação (%)	MPa	Variação (%)
Referencia A	68,0		74,1		6,1	
Concreto A	67,5	-0,7	73,2	-0,9	6,0	-1,6
Referencia B	41,5		49,0		4,2	
Concreto B	40,7	-1,9	48,2	-1,6	4,1	-2,4
Referencia C	70,0		78,0		6,3	
Concreto C	69,7	-0,4	77,7	-0,4	6,3	0,0
Referencia D	44,0		53,5		4,7	
Concreto D	43,2	-1,8	52,5	-1,9	4,6	-2,1

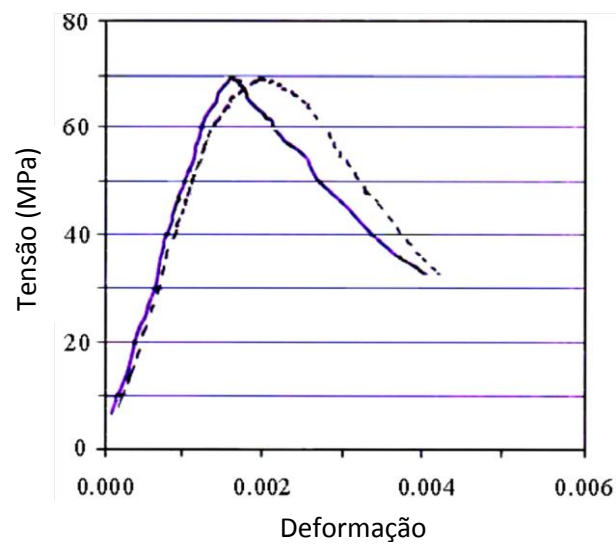


Figura 32 – Curva tensão-deformação do concreto de referência (linha cheia) e com substituição por agregados de PET (linha tracejada). (FRIGIONE, 2010)

2.4.3 – AGREGADO DE PLÁSTICO RECICLADO EM ARGAMASSA

Canellas (2005) substituiu a areia da argamassa por partículas floculadas de garrafas PET nos percentuais de 10, 30 e 50%, usando o traço de cimento e areia na proporção de 1:4 como referência. Os resultados mostram uma forte redução na resistência mecânica à medida que aumenta o teor de partículas de plástico na argamassa. A argamassa com 50% de substituição do agregado apresentou resistência à compressão cerca de seis vezes menor do que aquela verificada para o traço de referência. Salienta-se a importância de se efetuar a substituição dos agregados em volume dada a diferença entre seus pesos específicos. Assinala também que é importante considerar o tamanho e a forma das partículas do resíduo plástico como fatores que podem reduzir as perdas nas propriedades mecânicas.

O trabalho de Marzouk (2006) demonstra uma ligeira redução nas resistências à compressão e à flexão, 15,7% e 32,8%, respectivamente, quando foi efetuada a substituição de até 50% em volume da areia por resíduos de PET, apresentando forte redução quando o percentual de substituição superou 50%. A substituição por partículas de PET com tamanho máximo de 5 mm formaram os compósitos com melhores propriedades mecânicas. A absorção capilar reduziu com o aumento do teor de resíduos de PET nos corpos de prova, da mesma forma que o módulo de elasticidade, com 50% de redução para um percentual de substituição foi 50%. A análise microestrutural por microscopia por varredura eletrônica revelou uma matriz mais compacta quando o percentual de substituição do agregado foi até 50%. O trabalho demonstrou a importância do tamanho das partículas de plástico e das percentagens de substituição da areia para a modificação das propriedades mecânicas do compósito.

No trabalho de Akçaozoglul (2009) foram avaliadas as propriedades da argamassa com 100% de agregado leve obtido da granulação de garrafas PET, e com 50% de areia e 50% de agregado de PET. Nesses dois traços experimentais, avaliou-se também, a substituição de 50% do cimento por escória de alto forno. A resistência à compressão foi determinada aos 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias, os resultados mostram que a amostra com 100% de agregados de PET reduziu essa resistência aos 28 dias em 52% e a amostra com 50% de agregados de PET e areia reduziu em 42%. A substituição de 50% do cimento por escória de alto forno reduziu essas perdas em todas as amostras. Esse efeito foi invertido nos resultados do ensaio de resistência à flexão nas amostras com idades de 90 e 180 dias. Essa resistência foi reduzida

quando 50% em peso do cimento foi substituída por escória de alto forno. Aos 28 dias, a resistência à flexão das amostras com 100% e 50% de agregados de PET reduziu uniformemente em cerca de 46% daquela verificada para a argamassa de referência. A absorção de água das amostras com 100% de agregados de PET foi maior do que a verificada na amostra com 50% de PET e areia.

Choi et al (2009) desenvolveram agregados leves produzidos pela mistura de PET triturado, com dimensões 5 a 15 mm, e areia fina, passando na peneira 0,15 mm, que foram colocados em um misturador circular com temperatura interna de $250 \pm 30^\circ$ C. Foram realizados ensaios com argamassa com relação cimento/agregado 1:2,44 e água/cimento 0,60, substituindo a areia por agregado leve em 25%, 50%, 75% e 100%. Os ensaios realizados foram de absorção, consistência e resistência à compressão. Na última etapa foram produzidas amostras de concreto com relações a/c 0,45 – 0,49 – 0,53.

Os ensaios de caracterização mostraram que à medida que a areia foi substituída por agregado leve de PET (WPLA), a absorção de água diminuiu, chegando a 0%, para 100% de substituição. Foi verificado aumento do índice de consistência com o aumento do teor de agregado leve de PET devido à forma e a textura dessas partículas, proporcionando consistência mais fluida. As amostras com 25% de agregados de PET tiveram menor absorção capilar do que a argamassa de referência, já as argamassas com 50% e 75% de agregado leve de PET apresentaram maior absorção. Esse comportamento foi atribuído à granulometria dos agregados com esses percentuais de substituição, aumentando a porosidade da argamassa. A resistência à compressão diminuiu em cerca de 12% para amostras com 25% de agregado leve até 42%, com 100% de WPLA.

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) estudaram as propriedades físicas e mecânicas da argamassa utilizando resíduos de policarbonato (PC) e de polietileno tereftalato (PET) (figura 33), com dimensões máximas de 3,15 mm e 6,3 mm, respectivamente, em substituição a areia em 3%, 10%, 20% e 50%. A densidade da argamassa, no estado fresco e endurecido reduziu com o teor de agregados poliméricos. Não houve alteração da porosidade e a absorção de água com 3% de substituição da areia pelos resíduos utilizados, ocorrendo aumento em teores maiores do que 3%. A resistência à compressão reduziu em 9,8%, 30,5%, 47,1% e 69% para as misturas contendo 3%, 10%, 20% e 50% de agregados de PET, respectivamente. Com os mesmos teores de PC a redução foi de

6,8%, 27,2%, 46,1% e 63,9%. O módulo de elasticidade diminuiu de 37,3 GPa da referência para 11,8 e 14,2 GPa para a argamassa com 50% de PET e PC. As curvas carga-deflexão observadas no ensaio à flexão mostram um aumento da ductilidade com o aumento do teor de agregados plásticos, pela habilidade do agregado plástico em prolongar o intervalo de propagação das fissuras. Os resultados do cálculo da tenacidade na flexão mostram um aumento concomitante com o teor de agregados de PET e PC.

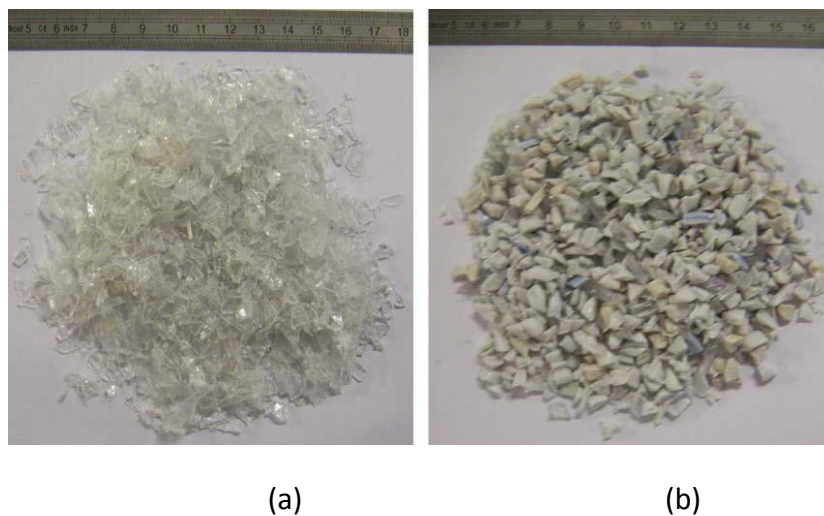


Figura 33 – Agregados de PET (a) e PC (b) (HANNAWI, KAMALI-BERNARD E PRINCE, 2010)

2.4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão literária sobre a utilização de resíduos plásticos como agregado em argamassa ou concreto mostra a predominância dos resíduos de garrafas PET nos estudos dessa área, provavelmente motivado pelo fato do PET ser um termoplástico de engenharia. Contudo outros resíduos termoplásticos comuns foram utilizados como o PVC e o PEAD, embora em poucos trabalhos. Não é verificado, mesmo nos trabalhos com resíduos de PET, uma convergência em relação à magnitude dos efeitos da substituição dos agregados naturais por resíduos plásticos, porém, pode ser estabelecido, a partir dos resultados dos estudos relacionados, que os agregados de resíduos plásticos em compósitos cimentícios

produzem redução da resistência mecânica, redução do peso específico, melhoria da ductilidade à compressão ou flexão e redução do módulo de elasticidade. Em face disso, alguns autores - Siddique *et al*, 2007; Marzouk *et al* (2006); Akçaozoglul (2009); Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) - mencionam que existe um potencial para o uso de resíduos poliméricos como agregados em concreto ou argamassa.

Em relação aos demais polímeros o polietileno de alta densidade possui baixo peso específico e resistência mecânica, com exceção da resistência à flexão e ao impacto. Além disso, possui baixo módulo de elasticidade, alta resistência à ácidos e bases, e, pela sua cadeia com ligações saturadas, apresenta resistência à degradação por agentes naturais. O polietileno de alta densidade figura entre os plásticos mais reciclados no Brasil, mas, apesar disso, há ainda uma grande quantidade a reciclar desses resíduos, de forma a minimizar esse passivo ambiental. Do exposto configura-se o uso potencial do polietileno de alta densidade em uma aplicação permanente, como a de agregado na construção civil, e, no caso específico desse estudo, para o uso em argamassa, donde espera-se resultar em redução de resistência mecânica, mas com menor peso específico e maior capacidade de deformação.

3 – METODOLOGIA

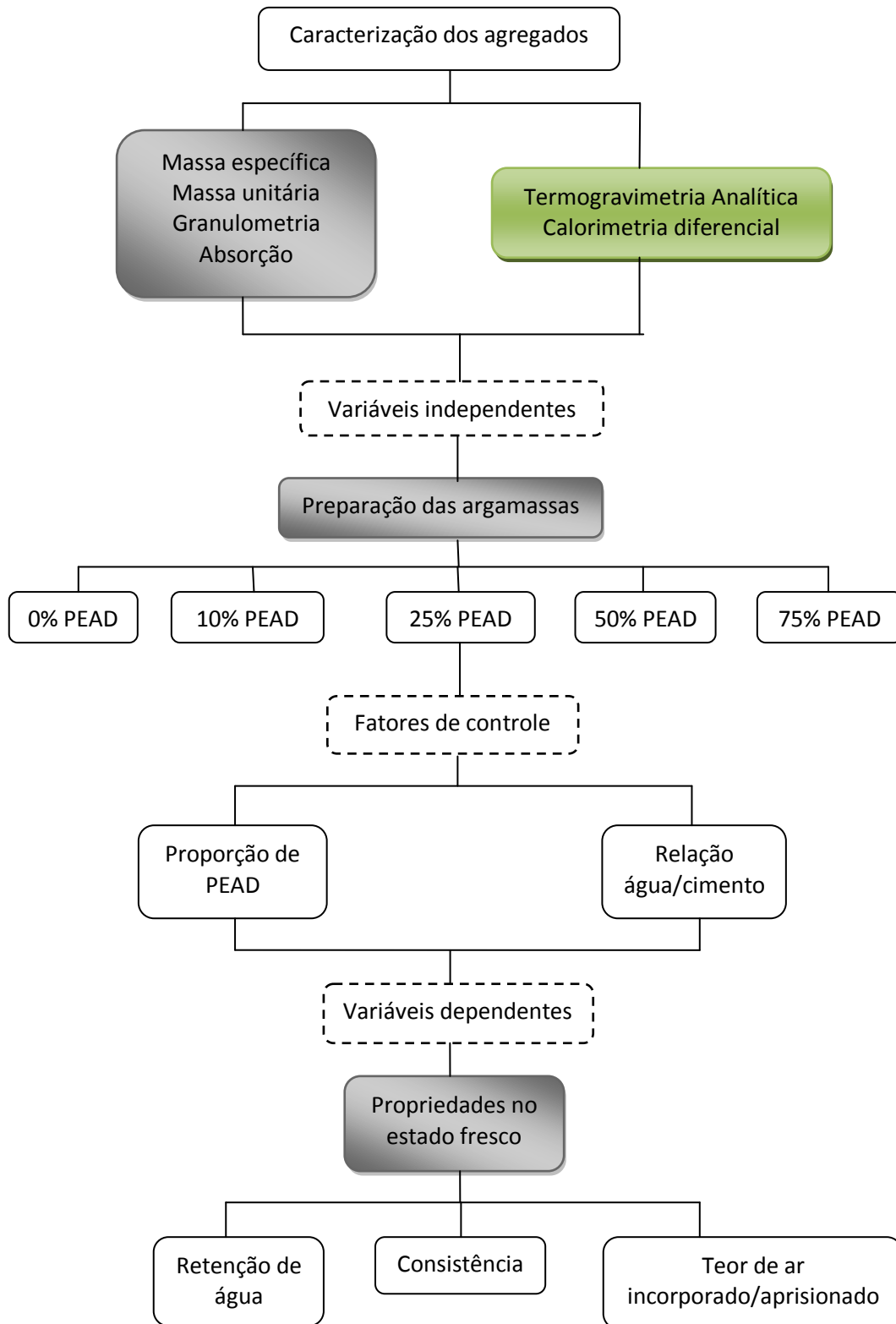
Este capítulo apresenta a descrição da metodologia utilizada neste trabalho tendo em vista os objetivos estabelecidos. São apresentados as etapas do estudo, suas variáveis e fatores de controle, os materiais e os métodos para avaliação das propriedades da argamassa fresca e endurecida.

3.1 – PROJETO EXPERIMENTAL

Esta pesquisa experimental foi delineada objetivando o estudo das propriedades da argamassa na qual seus agregados naturais são parcialmente substituídos por partículas de plástico reciclado, no caso específico, o polietileno de alta densidade. Nesse sentido, o estudo foi dividido em duas etapas. Na etapa inicial, com intuito de conhecer o comportamento das misturas com essa substituição e definir o traço para confecção dos corpos-de-prova, foi realizado inicialmente a caracterização dos materiais utilizados, e um estudo de dosagem com cinco traços experimentais de argamassa, buscando uma avaliação comparativa com relação as propriedades da argamassa fresca, que serão detalhados a seguir, na seção referente a dosagem.

As variáveis de saída ou independentes foram as argamassas, com um traço de referência e quatro traços substituindo gradativamente a areia por partículas de polietileno de alta densidade reciclado. Assim, os fatores usados para controlar as variáveis dependentes foram a proporção de agregado de plástico reciclado no traço e a relação água/cimento de modo a obter a mesma consistência, considerando o seu intervalo de variação. As variáveis dependentes nesta fase foram o índice de consistência, a retenção de água e o teor de ar incorporado/aprisionado.

A figura 34 mostra o fluxograma das etapas realizadas na fase inicial desta pesquisa, assim como a hierarquia das variáveis utilizadas. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da Argamassa – CETA e no Instituto de Química, da Universidade Federal da Bahia, como mostra a legenda da referida figura.



Legenda

 CETA-Ba  Instituto de Química - UFBA

Figura 34 – Fluxograma dos ensaios da 1ª fase da pesquisa

Os resultados dos ensaios da fase inicial e a avaliação visual das misturas foram tomados como base para o ajuste dos traços experimentais. A partir daí, foram definidos os traços para moldagem dos corpos-de-prova que seriam submetidos aos ensaios e análise concernentes à segunda fase do estudo. Como mostra fluxograma da figura 35, as propriedades que representam as variáveis dependentes foram estudadas nesta fase, a partir da variação percentual dos agregados de polietileno de alta densidade reciclado na composição dos traços. Sendo esse o único fator de controle, buscou-se estabelecer uma relação entre as variáveis dependentes e a quantidade de partículas de plástico reciclado na composição da argamassa.

As variáveis dependentes nesta etapa foram:

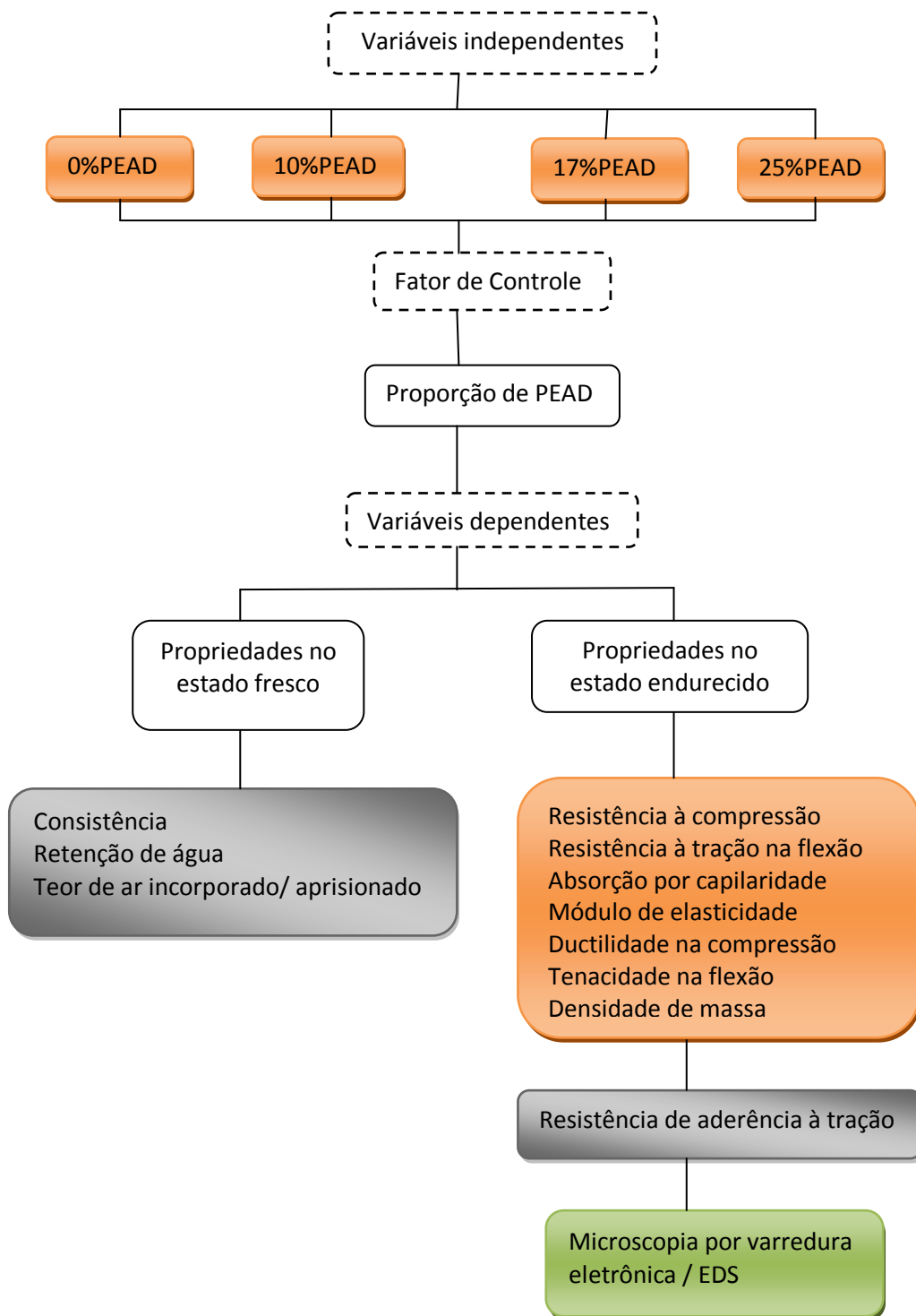
Propriedades no estado fresco:

- Consistência
- Retenção de água
- Teor de ar incorporado/aprisionado

Propriedades no estado endurecido:


- Resistência à compressão
- Resistência à tração na flexão
- Absorção de água por capilaridade
- Resistência de aderência à tração
- Módulo de elasticidade
- Ductilidade e tenacidade
- Densidade aparente de massa seca
- Microscopia por varredura eletrônica associada por análise por EDS

Os ensaios da segunda fase foram realizados no CETA, no Instituto de Química da UFBA, e no Laboratório de Estruturas da COPPE-UFRJ, de acordo com a legenda da figura 35



Legenda:

 CETA-Ba

 Instituto de Química – UFBA

 COPPE - UFRJ

Figura 35 – Fluxograma da 2ª fase da pesquisa experimental

3.2 – MATERIAIS

3.2.1 – Cimento e areia

Na pesquisa experimental foi utilizado como aglomerante hidráulico o cimento Portland CP-IIZ-RS classe 32, disponível comercialmente no mercado de Salvador. A caracterização física e química dos lotes dos cimentos utilizados foi fornecida pelo fabricante, conforme os quadros 9, 10, 11 e 12.

Quadro 9 – Caracterização química do cimento CP-IIZ-32 RS – 1ª etapa

Fonte: Votorantim

Ensaio Químicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Perda ao fogo - PF	NBRNM 18/04	3,85 %	≤ 6,5 %
Óxido de magnésio - MgO	NBRNM 14/04	3,28 %	≤ 6,5 %
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	NBRNM 16/04	3,00 %	≤ 4,0 %
Resíduo insolúvel - RI	NBRNM 22/04	4,52 %	≤ 16,0 %
Equivalente alcalino de Na ₂ O	-	0,68 %	Não aplicável
Óxido de cálcio livre - CaO	NBRNM 13/04	1,53%	Não aplicável

Quadro 10 – Caracterização física do cimento CP-IIZ-32 RS – 1ª etapa

Fonte: Votorantim

Ensaio Físicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Área específica (Blaine)	NBRNM 76/98	3.533 cm ² /g	≥ 2.600 cm ² /g
Massa específica	NBRNM 23/98	3,14 g/cm ³	Não aplicável
Finura – Resíduo na #200	NBR 12826/93	2,4 %	≤ 12,0 %
Finura – Resíduo na #325	NBR 12826/93	10,0 %	Não aplicável
Pasta de consistência normal	NBRNM 43/03	26,6 %	Não aplicável
Início de pega	NBRNM 65/03	2h:25min	≥ 1h
Fim de pega	NBRNM 65/03	3h:16min	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier	NBR 11582/91	0,9 mm	≤ 5 mm
Ensaio Mecânicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Resistência à compressão – 3 dias	NBR 7215/96	25 ± 0,9 MPa	≥ 10 MPa
Resistência à compressão – 7 dias	NBR 7215/96	30,7 ± 1,05 MPa	≥ 20 MPa
Resistência à compressão – 28 dias	NBR 7215/96	39,5 ± 0,97 MPa	≥ 32 MPa

Quadro 11 – Caracterização química do cimento CP-II-32 RS – 2ª etapa

Fonte: Votorantim

Ensaio Químicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Perda ao fogo - PF	NBRNM 18/04	2,77 %	≤ 6,5 %
Óxido de magnésio - MgO	NBRNM 14/04	2,98 %	≤ 6,5 %
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	NBRNM 16/04	2,98 %	≤ 4,0 %
Resíduo insolúvel - RI	NBRNM 22/04	9,33 %	≤ 16,0 %
Equivalente alcalino de Na ₂ O	-	0,63 %	Não aplicável
Óxido de cálcio livre - CaO	NBRNM 13/04	1,38%	Não aplicável

Quadro 12 – Caracterização física do cimento CP-IIZ-32 RS – 2ª etapa

Fonte: Votorantim

Ensaio Físicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Área específica (Blaine)	NBRNM 76/98	3.526 cm ² /g	≥ 2.600 cm ² /g
Massa específica	NBRNM 23/98	3,19 g/cm ³	Não aplicável
Finura – Resíduo na #200	NBR 12826/93	1,2 %	≤ 12,0 %
Finura – Resíduo na #325	NBR 12826/93	5,9 %	Não aplicável
Pasta de consistência normal	NBRNM 43/03	26,3 %	Não aplicável
Início de pega	NBRNM 65/03	2h:46min	≥ 1h
Fim de pega	NBRNM 65/03	3h:46min	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier	NBR 11582/91	0,7 mm	≤ 5 mm
Ensaio Mecânicos	Ensaio	Resultado	Especificação NBR 11578/91
Resistência à compressão – 3 dias	NBR 7215/96	23 ± 0,61 MPa	≥ 10 MPa
Resistência à compressão – 7 dias	NBR 7215/96	28,9 ± 0,60 MPa	≥ 20 MPa
Resistência à compressão – 28 dias	NBR 7215/96	38,5 ± 0,76 MPa	≥ 32 MPa

De acordo com as propriedades mostradas nas tabelas 9, 10, 11 e 12, o cimento utilizado na 2ª etapa dos experimentos, apresentou ligeiras mudanças, a exemplo da massa específica, propriedade importante para o cálculo do seu consumo unitário.

A areia utilizada como agregado natural na produção dos traços de argamassa em laboratório é proveniente da região metropolitana de Salvador e comumente encontrada em lojas especializada na venda de agregados para construção. Toda a areia foi previamente peneirada em malha com abertura 4,8 mm e em seguida, inspecionada para a retirada de raízes e folhas. O processo de homogeneização se deu por quarteamento e mistura manual das partes quarteadas.

3.2.2 – Polietileno de alta densidade reciclado (PEADr)

Polietileno de alta densidade reciclado foi utilizado como substituto da areia na argamassa. O PEAD_r foi obtido de uma empresa que atua no setor de reciclagem mecânica de embalagens plástica pós-consumo na região metropolitana de Salvador, na forma granular, denominado de pellets. Os pellets de PEAD_r foram transportados para uma empresa do pólo plástico da cidade de Camaçari, onde passaram por um processo industrial de moagem, denominada micronização. Nesse processo, as partículas de plástico recebem energia do moinho com ar comprimido, movendo-se em alta velocidade e os choques entre si provoca a redução de tamanho até o ponto desejado. Uma vantagem desse tipo de moagem é a reduzida possibilidade de contaminação do produto, pois o processo se desenvolve sem o contato com outro material. Na figura 36 pode-se observar partículas de PEAD_r micronizado utilizado como agregado plástico.



Figura 36 – PEAD_r micronizado

3.2.3 – Aditivo

Para melhorar a plasticidade e promover a homogeneidade das misturas foram utilizados aditivos plastificante e superplastificante, na 1ª e 2ª etapas do estudo, respectivamente. O aditivo plastificante utilizado, conforme o fabricante é especificado como substituto da cal em argamassa de revestimento e assentamento. O aditivo superplastificante, por sua vez, é composto químico à base de policarboxilato, com efeito mais significativo como redutor de água da mistura. As caracterizações desses aditivos foram fornecidas pelos fabricantes como mostram os quadros 13 e 14.

Quadro 13 – Características do aditivo plastificante. Fonte: Vedacit

Características	Valores / Descrição
Aspecto	Líquido marrom avermelhado
Aplicação	Argamassas de assentamento e reboco
Densidade	1,01 g/cm ³
Composição	Resinato de sódio
Dosagem (por kg de cimento)	2 ml
pH	12
Teor de sólidos	6 %

Quadro 14 – Características do aditivo superplastificante. Fonte: BASF

Características	Valores / Descrição
Aspecto	Líquido bege
Função principal	Superplastificante – 3ª geração
Densidade	1,067 – 1,107 g/cm ³
Composição	Policarboxilatos
pH	5 - 7
Teor de sólidos	28,5 – 31,5 %

3.3 – MÉTODOS

Foram aplicados neste estudo vários métodos para determinação das características dos agregados, como também das propriedades físico-mecânicas da argamassa no estado fresco e endurecido. Para o estudo dessas propriedades, o método de dosagem da argamassa foi dividido em duas etapas: A primeira consistiu na determinação das características dos agregados utilizados no trabalho e na determinação das propriedades da argamassa fresca com teores crescentes de PEADr em sua composição. A avaliação dos resultados anteriores permitiu os ajustes necessários ao traço da argamassa para a produção dos corpos-de-prova a serem ensaiados na segunda etapa do estudo, como exposto a seguir.

3.3.1 – Dosagem da argamassa

O método proposto por Gomes e Neves (2002) foi adotado neste trabalho para estabelecer o traço experimental na primeira etapa. Dessa forma, foram fixados inicialmente os seguintes critérios de dosagem:

- Consumo de cimento: 180 – 210 kg/m³ (camada única de revestimento)
- Teor de ar incorporado/aprisionado: 8 – 17%
- Índice de consistência: 260 ± 10 mm
- Retenção de água: > 85%

Na fase inicial foram preparados cinco traços de argamassa: A argamassa de referência, com 0% de PEADr, e com 10%, 25%, 50% e 75% de agregados de PEADr. A substituição dos agregados se deu de forma a manter o mesmo volume de agregados em todos os traços. Para isso foi calculado um fator de equivalência volumétrica entre os agregados utilizando a equação 3.1.

$$F_{eq} = \frac{\mu_{PEAD}}{\mu_{AREIA}} \quad (3.1)$$

Sendo:

μ_{PEAD} = Massa unitária do PEADr micronizado

μ_{AREIA} = Massa unitária da areia

Assim, a massa de PEADr micronizado com volume à areia substituída, foi calculada através da equação 3.2.

$$M_{PEADr} = F_{eq} \times M_{areia} \quad (3.2)$$

As argamassas foram preparadas para um mesmo índice de consistência de 260 ± 10 mm, determinando-se o teor de ar incorporado/aprisionado, retenção de água. O consumo unitário de cimento foi calculado com no trabalho de Gomes e Neves (2002) e está expressada pela equação 3.3. Ainda nesta etapa inicial foi utilizado uma aditivo químico substituinte da cal para conferir maior trabalhabilidade às misturas, na dosagem recomendada pelo fabricante.

$$Cc = \frac{100-w}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{A}{\rho_A} + \frac{P}{\rho_P} + X} \quad (3.3)$$

Onde:

Cc = Consumo de cimento por metro cúbico de argamassa

W = Volume de ar incorporado/aprisionado por metro cúbico de argamassa

ρ_c = Massa específica do cimento em kg/m^3

ρ_A = Massa específica da areia em kg/m^3

ρ_P = Massa específica do PEADr em kg/m^3

A = Proporção de areia no traço

P = Proporção de PEADr no traço

X = Quantidade de água em relação ao cimento

A partir da caracterização física dos agregados e do cimento obtidos na etapa inicial dos experimentos, que serão apresentados na seção de resultados, e da estimativa do teor de ar incorporado/aprisionado em 12%, formulou-se os traços apresentados na tabela 4,

com as relações água/cimento e cimento/agregado para que fosse obtido um índice de consistência e consumo de cimento de acordo com os critérios estabelecidos pelo método de dosagem.

Tabela 4 – Traços experimentais da argamassa na 1ª etapa do estudo

Teor de PEAD _r	Traço (em massa)				
	Cimento	Areia	PEAD	Água	Aditivo
0%	1	6		1,39	0,002
10%	1	5,4	0,13	1,34	0,002
25%	1	4,5	0,32	1,39	0,002
50%	1	3	0,65	1,43	0,002
75%	1	1,5	0,98	1,58	0,002

Foram determinados o índice de consistência, o teor de ar incorporado/aprisionado e a retenção de água das misturas, verificando-os com a relação aos critérios de dosagem. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5 – Propriedades da argamassa fresca na 1ª etapa

Teor de PEAD _r	A/C	Consistência (mm)	Teor de Ar* (%)	Retenção de água (%)
0%	1,39	265	11	88
10%	1,34	265	15	87
25%	1,39	262	16	88
50%	1,43	250	13	88
75%	1,58	227	9,5	87

*Incorporado/aprisionado

Os teores de substituição da areia por agregados de PEAD_r foram escolhidos de modo que essa substituição fosse gradativa e que houvessem traços em que a maioria dos agregados fosse composta ora por areia, ora por PEAD_r, como também aquele em que, em volume, contivesse a mesma proporção dos dois tipos de agregados. Os resultados da Tabela

5 mostram que praticamente todos os traços experimentais apresentaram propriedades satisfatórias do ponto de vistas dos critérios de dosagem adotado, mas, para os traços com 50% e 75% de PEADr, houve redução do teor de ar incorporado e índice de consistência. Isto indica, nesses teores, uma redução significativa da trabalhabilidade da argamassa, ocasionada pela redução da homogeneidade das misturas.

Os aspectos dos traços com os maiores teores de PEADr mostraram exsudação excessiva após o ensaio de consistência, em especial no traço com 75% de PEADr, com visível segregação das partículas. Assim, foi observado que o aumento da relação água/cimento não acarretou o aumento da fluidez da argamassa e sim, a exsudação da água livre, que, conjuntamente com o aumento do teor de agregados de PEADr, provocou segregação dos agregados e a consequente falta de homogeneidade, o que também pode ter contribuído para a redução do teor de ar incorporado nessas misturas. A figura 37 mostra o aspecto dos traços experimentais, sendo destacados os aspectos negativos de segregação e exsudação excessiva.

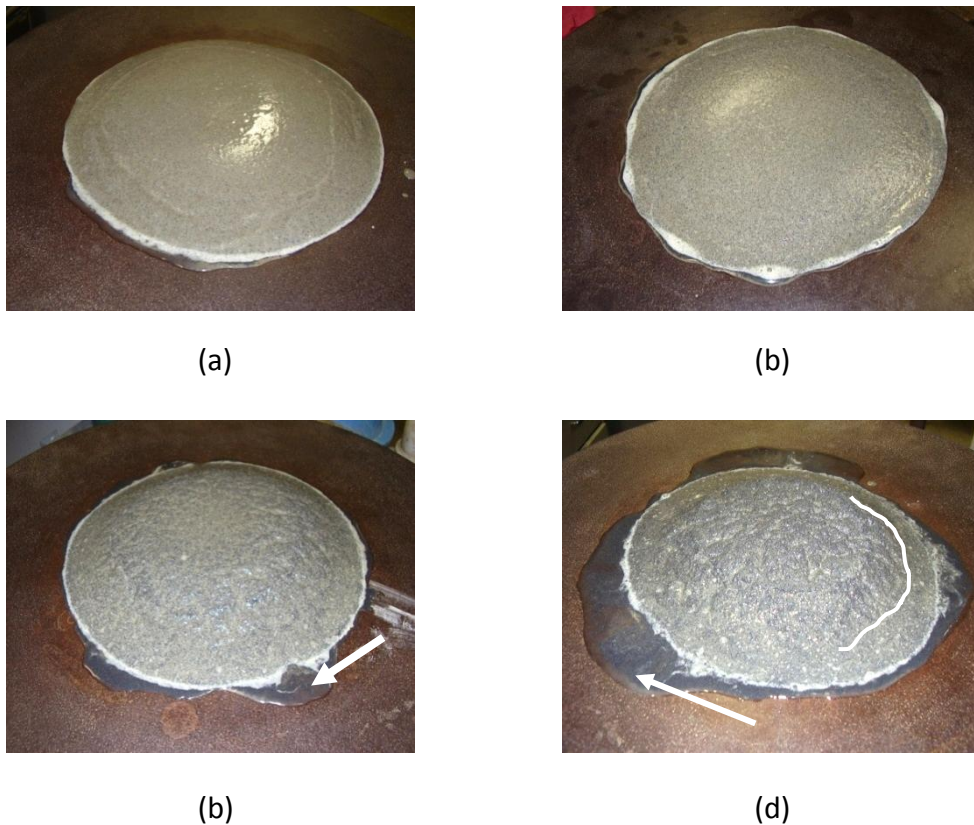


Figura 37 – Aspecto dos traços experimentais com diferentes teores de PEADr. (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%

Considerando os efeitos negativos expostos, os traços da argamassa foram reformulados limitando-se o teor de agregado de PEADr em 25% e substituindo o aditivo químico empregado inicialmente por um aditivo superplastificante, visando a redução da água de amassamento e dos efeitos adversos observados nas misturas inicialmente. O ajuste dos traços visou a produção de argamassas com aspecto e propriedades similares com relação à consistência e homogeneidade e também com a manutenção da relação água/cimento em todas as misturas. Devido à redução pretendida na água de amassamento, o índice de consistência das misturas foi pré-fixado em 250 ± 10 mm. A preparação da argamassa para moldagem dos corpos-de-prova ensaiados na segunda etapa foi feita de acordo com os novos traços ajustados, os quais são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 – Traços da argamassa na 2ª etapa do estudo

Argamassas		Traço (em massa)				
		Cimento	Areia	PEAD _r	Água	Aditivo SP
Abrev.	Pea _{d_r} (%)					
AR	0%	1	6		1,15	0,0024
AS-10	10%	1	5,4	0,13	1,15	0,0024
AS-17	17%	1	4,8	0,22	1,15	0,0024
AS-25	25%	1	4,5	0,32	1,15	0,0024

Foram então, escolhidos três teores de substituição da areia pelas partículas de PEADr até o limite de 25% em intervalos aproximadamente regulares. Estas composições foram usadas para o preparo da argamassa, que, posteriormente foram submetidas a diversos ensaios para avaliação de suas propriedades. Os métodos utilizados para essa avaliação são descritos a seguir.

3.3.2 – Caracterização dos materiais

A caracterização das propriedades físicas dos agregados em laboratório foi realizada utilizando os métodos mostrados no quadro 15.

Quadro 15 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados

Determinação	Norma
Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248/2003
Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	NBR 9776/87
Agregados – Determinação da massa unitária	NBR NM 45/2006
Agregado miúdo – Determinação da absorção de água	NBR NM 30 (2000)

A forma dos agregados foi caracterizada pelo exame em um microscópio óptico de luz transmitida do Núcleo de Tecnologia e Pesquisa em Rochas, da UFBA, da marca Olympus, modelo BX-40, com aumento de seis vezes.

A determinação da massa específica dos agregados de PEADr foi realizada adaptando-se o método com frasco de Chapman, no qual o líquido de imersão das partículas utilizado foi o álcool, devido ao menor peso específico desse material em relação à água.

Além das determinações relacionadas no quadro 15, foram realizadas também, a análise térmica do polietileno reciclado através dos ensaios de termogravimetria analítica (TGA) e de calorimetria diferencial de varredura (DSC). Para o ensaio de TGA, foi utilizado um módulo termogravimétrico da marca Shimadzu, modelo TG-50, onde uma amostra de PEADr com massa 6,592 g foi colocada em uma célula de platina para o aquecimento a uma taxa de 10° C/min até a temperatura de 600° C, em atmosfera de nitrogênio. Uma termobalança acoplada ao conjunto forneceu os dados da massa da amostra durante o ensaio que, juntamente com as respectivas temperaturas, originou a curva termogravimétrica do PEADr

e sua primeira derivada (DTGA), que foi plotada no eixo auxiliar do gráfico. A combinação das duas curvas tornou evidente a temperatura de degradação do material.

A calorimetria diferencial de varredura (DSC) permite o monitoramento de eventos que envolvem trocas de calor através da medição da quantidade de energia liberada ou absorvida por uma amostra quando submetida a um programa de aquecimento, resfriamento ou à temperatura constante. A temperatura de fusão do PEADr utilizado neste estudo foi determinada por DSC, na qual uma amostra desse material foi colocada em um calorímetro da marca Shimadzu, modelo DSC-60, em atmosfera de nitrogênio, sendo submetida a um aquecimento constante entre 20° C e 300° C. As temperaturas e fluxos de calor fornecidas pelo programa de computador associado ao sistema, permitiu a construção da curva do ensaio, onde a variação da entalpia referente ao processo de fusão do polímero fica evidenciada pelo pico formado na curva na temperatura onde ocorre aquele processo. O quadro 16 relaciona os parâmetros utilizados na realização do ensaio de DSC na amostra.

Quadro 16 – Parâmetros do ensaio de DSC

Peso da amostra (mg)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Faixa de temperatura (° C)	
		Início	Fim
3,00	10	20° C	300° C

3.3.3 – Caracterização da argamassa no estado fresco

Para o estudo das propriedades no estado fresco e moldagem dos corpos de prova, os traços de argamassa foram preparados de acordo com NBR 13276/2005. Foram utilizados uma balança digital com precisão de 0,01 g e uma argamassadeira elétrica com capacidade de cinco litros para a pesagem e mistura dos materiais, respectivamente. A sequência do preparo obedeceu sistematicamente a seguinte ordem:

- Pesagem dos materiais constituintes do traço
- Homogeneização manual dos materiais anidro
- Homogeneização na argamassadeira dos materiais anidro por trinta segundos

- Mistura dos materiais com o aditivo diluído na água de amassamento por três minutos
- Descanso da mistura por um minuto
- Mistura final por um minuto

Nos instantes após o preparo da mistura, a argamassa foi submetida aos ensaios para avaliação das seguintes propriedades:

a) Consistência

O índice de consistência da argamassa foi determinado de acordo com a NBR 13276/2005, no qual a argamassa é espalhada em uma mesa de consistência sob a ação de repetidos golpes. A figura 38 mostra a mesa de consistência, o molde e o soquete utilizados neste ensaio. O índice de consistência é a medida do espalhamento médio da argamassa em milímetros.



Figura 38 – Mesa de consistência, molde e soquete metálico

b) Teor de ar incorporado/aprisionado

O teor de ar incorporado/aprisionado da argamassa fresca foi determinado pelo método gravimétrico, de acordo com a NBR 13278/2005, na qual o teor de ar incorporado/aprisionado na mistura (Ta) é calculado conforme a equação 3.4.

$$Ta = 100 \times \left(1 - \frac{d}{dt}\right) \quad (3.4)$$

Onde:

d = Densidade de massa fresca

dt = Densidade teórica da argamassa

As densidades acima foram calculadas, seguindo os preceitos normativos, através das equações 3.5 e 3.6.

$$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{\gamma i}} \quad (3.5)$$

$$d = \frac{m}{v} \quad (3.6)$$

Onde:

mi = Massa seca dos materiais constituintes

γi = Massa específica dos materiais constituintes

m = massa da argamassa fresca

v = Volume calibrado do recipiente de ensaio

c) Retenção de água

A retenção de água foi avaliada pelo método da NBR 13277/2005, que consiste na medida de água retida pela argamassa após a sucção por meio de uma bomba de vácuo em um funil de filtragem. O cálculo da retenção de água é feito através da equação 3.7. A figura 39 mostra o funil *Buchner* e a bomba à vácuo do ensaio de retenção de água

$$Ra = \left[1 - \frac{Ma - Ms}{Af \times (Ma - Mv)} \right] \quad (3.7)$$

Onde:

Ma = Peso do molde com argamassa fresca antes do ensaio

Ms = Peso do molde com argamassa fresca após o ensaio

Mv = Peso do molde com filtro de papel umedecido

Af = Relação da massa de água pela massa total da mistura



Figura 39 – Funil de *Buchner* e bomba à vácuo

3.3.4 – Caracterização da argamassa no estado endurecido

Na segunda etapa do estudo, foram determinadas as propriedades da argamassa no estado endurecido relacionadas com a resistência mecânica, capacidade de absorver deformações, absorção de água por capilaridade e resistência de aderência ao substrato, através de métodos que serão detalhados adiante.

A argamassa foi preparada de acordo com NBR 13276/2005 e na sequência anteriormente descrita. Todos os corpos-de prova de cada traço foram moldados em uma única etapa de preparação, e, para esse fim, foi utilizado uma argamassadeira com capacidade de dez litros. Após a preparação, as amostras foram moldadas em formas metálicas, em três camadas, cada uma submetida ao adensamento da mesa vibratória por trinta segundos. A figura 40 mostra esses equipamentos.

Para evitar perda de água para o meio externo, as amostras de argamassa foram colocadas no interior de uma estante revestida por um filme plástico onde também foram colocados panos saturados com água, fechando-se com cobertores umedecidos até a saturação (figura 41). Após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em uma câmara úmida com 100% de umidade até a data de ensaio.



(a)



(b)

Figura 40 – (a) Argamassadeira 10 litros; (b) Formas metálicas e mesa vibratória



(a)



(b)

Figura 41 – Acondicionamento dos corpo-de-prova: (a) fechamento com filme plástico; (b) cobertura com cobertor úmido

a) Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi determinada para cada traço em amostras composta de seis corpos de prova cilíndricos com diâmetro 5 cm e altura 10 cm aos 36 dias de idade, de acordo com a NBR 5739/1994.

A execução do ensaio se deu em uma prensa da marca Shimadzu, modelo UH-F 1.000 kN (figura 42a), a uma taxa de deformação constante de 0,5% por minuto. Para a medição da deformação foram instalados dois transdutores no terço médio dos corpos de prova, conforme figura 42b.



(a)



(b)

Figura 42 – Prensa (a) e transdutores instalados (b) do ensaio de compressão axial

A área da seção transversal (A) dos corpos-de-prova foram calculadas pela equação 3.8, em que, aplicando-se na equação 3.9 os valores das cargas de compressão fornecida pelo programa de computador associado ao sistema, foram obtidas as respectivas tensões de compressão (σ_c).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.8)$$

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \quad (3.9)$$

Onde:

D = Diâmetro médio dos corpos de prova em milímetros

N = Carga de compressão em Newtons

O valor característico da resistência à compressão das amostras é apresentado em função do seu valor médio (F_{cm}) e do respectivo desvio-padrão (S), para um intervalo de confiança de 90% (I_c), o qual foi calculado através da equação 3.10

$$I_c = F_{cm} \pm e_o \quad (3.10)$$

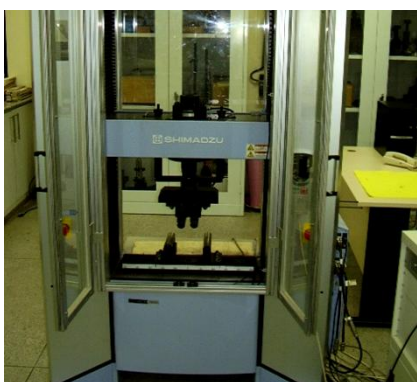
Onde e_o é o semi-intervalo de confiança, calculado através da equação (3.11) e com base nos valores para o fator *t student* ($t_{(n-1, \alpha/2)}$) para o nível de confiança de 90%, com n corpos de prova.

$$e_o = \frac{t_{(n-1, \alpha/2)} \times S}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

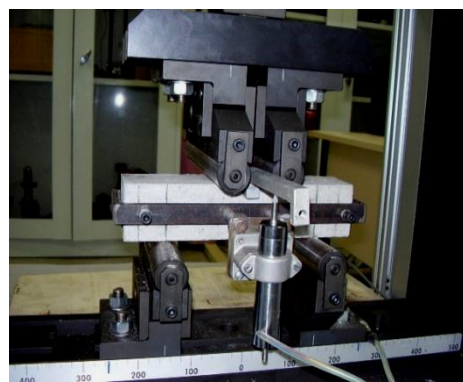
Os valores discrepantes foram eliminados até que todos estivessem contidos no intervalo especificado.

b) Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi baseado na NBR 13279/2005. As amostras, composta por quatro corpos de prova prismáticos com dimensões 50x50x230 mm foram ensaiadas com 36 dias de idade, sendo submetidas a um carregamento aplicado em dois pontos até a ruptura. O avanço da célula de carga foi constante em 0,1 mm/min, na prensa da marca Shimadzu, modelo AG-X 100 kN (figura 43a). Um transdutor foi instalado no centro do corpo de prova para as leituras dos deslocamentos durante o carregamento, como pode ser visto na figura 43b.



(a)



(b)

Figura 43 – Prensa (a) e transdutor instalado (b) do ensaio de flexão

O esquema estático do ensaio de flexão realizado nesse estudo é dado pela figura 44, com as dimensões em milímetros, onde N é a carga aplicada no ensaio.

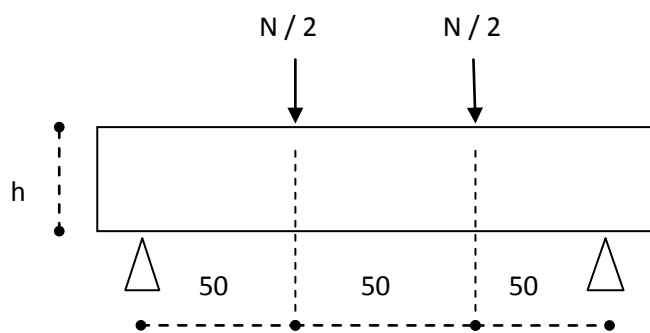


Figura 44 – Esquema do ensaio de flexão

O momento fletor (M) e a tensão de tração (σ_t) introduzidos pela flexão foram calculados com base na equação 3.12 e 3.13.

$$M = \frac{N}{2} \times 50 \quad (3.12)$$

Onde N é a carga aplicada na flexão do corpo-de-prova

$$\sigma_t = \frac{M}{I} \times \frac{h}{2} \quad (3.13)$$

Onde:

M = Momento fletor

I = Momento de inércia da seção transversal do corpo-de-prova

H = Altura da seção transversal do corpo-de-prova

O momento de inércia foi calculado com base nas dimensões da seção transversal dos corpos-de-prova, conforme a equação 3.14

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (3.14)$$

Os valores da resistência à tração na flexão, expressados pela sua média e o respectivo desvio-padrão, foram tratados estatisticamente da mesma forma que os valores da resistência à compressão.

c) Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade da argamassa foi obtido com base na NBR 8522/2003 com relação ao módulo de deformação secante. A partir do diagrama tensão (σ) x deformação (ϵ) do ensaio de compressão, as tensões correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura (σ_r) foram tomadas como base para o traçado da reta secante à curva do ensaio, como ilustra a

figura 45. A declividade da reta assim obtida determina o valor do módulo de elasticidade do material.

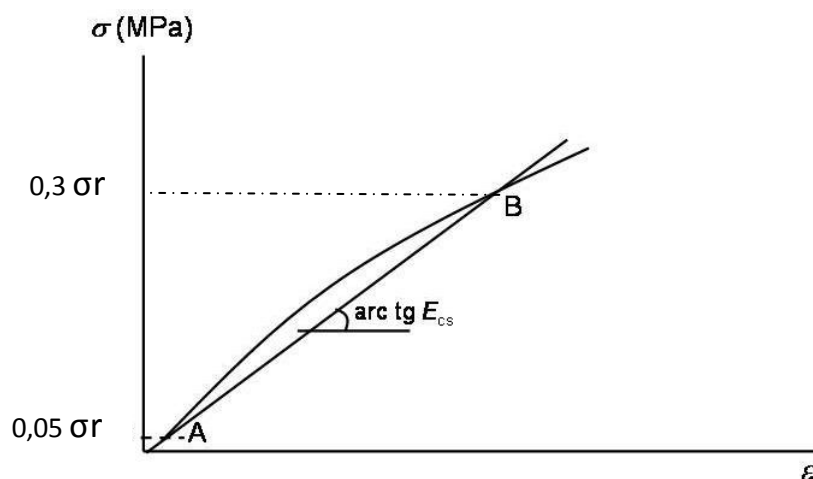


Figura 45 – Representação esquemática do módulo de deformação secante (NBR 8522/2003)

d) Ductilidade

Callister (2002) define ductilidade como o grau de deformação plástica suportada por um material quando da sua fratura. A deformação elástica caracteriza-se pela proporcionalidade com tensão aplicada, e, portanto, pela linearidade do diagrama tensão-deformação. Na deformação plástica não ocorre esta proporcionalidade e tampouco essa linearidade é observada.

A deformação plástica das amostras de argamassa desse estudo foi obtida a partir do diagrama tensão-deformação do ensaio de compressão até o ponto de ruptura. A partir desse ponto foi traçado uma reta paralela àquela obtida para determinação do módulo de elasticidade, ou seja, referente ao regime elástico (linha tracejada da figura 46). A intersecção dessa reta com o eixo das abscissas determinou a deformação plástica na compressão até o ponto de ruptura (δp), que equivale à deformação total até a tensão de ruptura, subtraindo-se a deformação elástica correspondente a essa tensão, conforme ilustrado esquematicamente na figura 46.

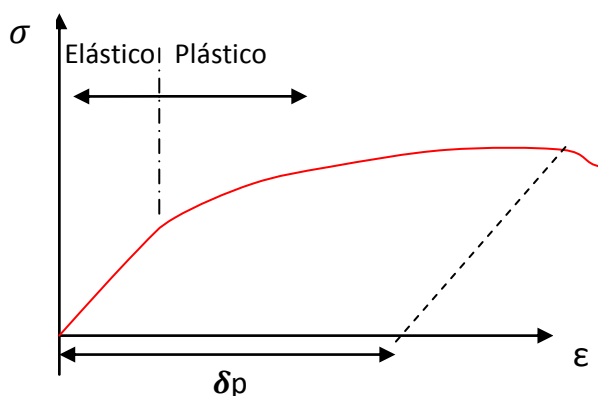


Figura 46 – Deformação plástica residual na ruptura

e) Tenacidade

Genericamente, tenacidade é um termo que representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua ruptura (CALLISTER, 2002). Em face disso, para um ensaio mecânico em concreto ou argamassa com pequena taxa de deformação, a tenacidade pode ser determinada a partir do diagrama carga-deslocamento pelo cálculo da área sob a curva, uma vez que a área assim obtida representa o trabalho realizado pela carga, que é medido em unidade de energia. A tenacidade, como uma medida da capacidade de absorção de energia, tem significativa influência das medidas geométricas do corpo de prova.

A tenacidade das amostras de argamassa foi determinada baseada no trabalho de Hannawi *et al* (2010), no qual são estabelecidos limites de deslocamentos em função do vão (L/n) para avaliação da tenacidade após a ruptura. Gopalaratnam e Gettu (1994) avaliam que esse método possui um caráter mais geral do que aqueles que utilizam a carga de primeira fissura para o cálculo da tenacidade, devido à falta de objetividade para definição desse ponto. Além disso, a deflexão de 1,9 mm utilizada como um dos parâmetros para esse cálculo é considerada arbitrária.

No presente estudo foram definidas as deflexões δ_{tb1} ($L/650$), δ_{tb2} ($L/750$) e δ_{tb3} ($L/1000$), como mostra a figura 47, onde L é o vão do corpo de prova, igual a 150 mm. Essas

deflexões foram escolhidas em função da deflexão máxima obtida nos ensaios de flexão e de forma que estivessem no trecho pós-ruptura de todas as amostras.

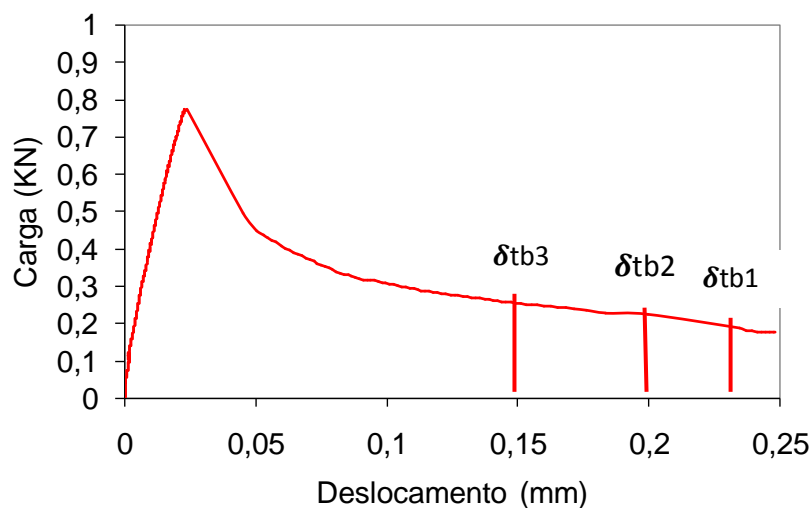


Figura 47 – Limites de deslocamento para o cálculo da tenacidade

Os fatores de resistência à flexão (σ_b) nas deflexões limites δ_{tb1} , δ_{tb2} e δ_{tb3} , foram utilizados na avaliação da tenacidade das amostras de argamassa desse estudo, calculando-os através da equação 3.15 (HANNAWI ET AL, 2010). É válido salientar a introdução dos parâmetros da geometria da amostra nessa avaliação.

$$\sigma_b = \frac{T_{jcl}}{\delta_{tb}} \frac{S}{Wd^2} \quad (3.15)$$

Onde:

T_{jcl} = Área sob a curva carga-deslocamento até o deslocamento limite

S = Vão do corpo de prova

δ_{tb} = Deflexão no meio do vão (pré-estabelecida em $L/650$, $L/750$ e $L/1000$)

W = Altura do corpo de prova

d = Profundidade do corpo de prova

f) Absorção de água por capilaridade

A avaliação da penetração de água na argamassa foi realizada através do ensaio de absorção por capilaridade em corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro aos 36 dias de idade. Os procedimentos para essa análise foram baseados na NBR 15259/2005 e no método adotado por Gonçalves (2000). Os corpos de prova, após o período de cura e secagem em estufa até a constância da massa, foram posicionados em um recipiente em contato com uma lâmina d'água com espessura constante de 5 ± 1 mm e recobertos com um filme de plástico para evitar a absorção da umidade do ar, conforme a figura 48. O aumento da massa dos corpos de prova por absorção de água foi monitorado em pesagens aos 10, 30, 60, 90 e 120 minutos do início do ensaio para o cálculo da absorção de água por capilaridade, conforme a equação 3.16, expressa em g/cm^2 .

$$Ai = \frac{Pu - Ps}{A} \quad (3.16)$$

Onde:

Ai = Absorção capilar em cada tempo, em g/dm^2 .

Pu = Peso úmido em cada tempo, em g.

Ps = Peso seco, em g.

A = Área da seção transversal em dm^2

Os valores calculados através da equação 3.16 que apresentaram desvio relativo superior a 20% do valor médio foram descartados. Nesses casos, a média da amostra foi recalculada até todos os corpos de prova apresentassem valores com desvio relativo menor ou igual a 20%.

Os valores da absorção capilar para cada amostra de argamassa foram plotados em um gráfico em função da raiz do tempo expresso em minutos. A inclinação da reta ajustada entre os pontos citados forneceu o coeficiente de capilaridade das amostras.

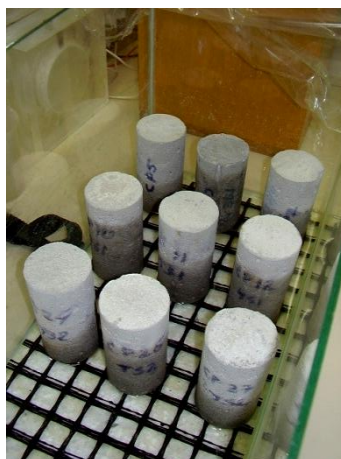


Figura 48 – Ensaio de absorção por capilaridade

g) Densidade de massa aparente

A determinação da densidade de massa aparente foi obtida baseando-se no método da NBR 13280/2005, através da relação entre a massa seca e o volume dos corpos-de-prova. Foram utilizadas as amostras do ensaio de absorção por capilaridade, que, após a secagem em estufa até a constância da massa, foram tomadas as suas medidas médias de comprimento e diâmetro, com o intuito de calcular o volume aparente. Obtidos os valores da massa seca e do volume aparente, a densidade de massa aparente (γ_a) foi obtida através da equação 3.17.

$$\gamma_a = \frac{M_s}{V_a} \quad (3.17)$$

Onde:

M_s = Massa seca

V_a = Volume aparente

h) Resistência de aderência à tração

O ensaio para determinação da resistência de aderência à tração foi realizado com base nas prescrições da NBR 15258/2005, utilizando como substrato, alvenaria confeccionada com bloco cerâmico (figura 49a). Uma camada de chapisco com argamassa de cimento e areia, na proporção 1:3, foi aplicada no substrato com o intuito de aumentar a rugosidade e minimizar as diferenças de absorção entre o bloco cerâmico e a argamassa de assentamento.

Após três dias de cura do chapisco por aspersão, o revestimento foi executado, consistindo em quatro painéis de argamassa, medindo 60x60 cm, cada um com um traço experimental, dosados conforme a tabela 6 (figura 49b). O preparo e a aplicação da argamassa foi manual, utilizando as ferramentas usuais para esse serviço: prumo de face, colher de pedreiro, régua de alumínio e desempenadeira de madeira. As mestras foram colocadas de modo que o revestimento obtivesse uma espessura de 20 ± 2 mm. Após o endurecimento da argamassa, os painéis foram recobertos com um pano que foi mantido úmido até o quinto dia após a aplicação da argamassa. Em seguida, os painéis foram expostos às variações atmosféricas de temperatura e umidade relativa até a data do ensaio.



(a)



(b)

Figura 49 – (a) Substrato com chapisco; (b) Painéis de argamassa aplicados

A seqüência do ensaio ocorreu conforme descrito na seção 2.3.6d e na referida norma, a saber: (i) lixamento e limpeza da superfície dos painéis; (ii) corte dos corpos de prova (figura 50a); (iii) colagem das pastilhas metálicas (figura 50b); (iiii) Ruptura e extração dos corpos de prova à tração utilizando um dinamômetro (figura 50c). A resistência de aderência à tração (R_i) de cada corpo de prova foi calculada de acordo com a equação 3.15. e dada em MPa.

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.15)$$

Onde:

P_i = Carga de ruptura, em newton

A_i = Área do corpo de prova, em milímetros quadrados

Foram extraídos sete corpos de prova aos 56 dias de idade para cada traço/painel de argamassa. Com base na variabilidade dos resultados de aderência à tração apresentados por Carasek (1997) e Gonçalves (2004), foram descartados os resultados cuja média e desvio padrão implicavam em um coeficiente de variação (CV) superior a 35%.

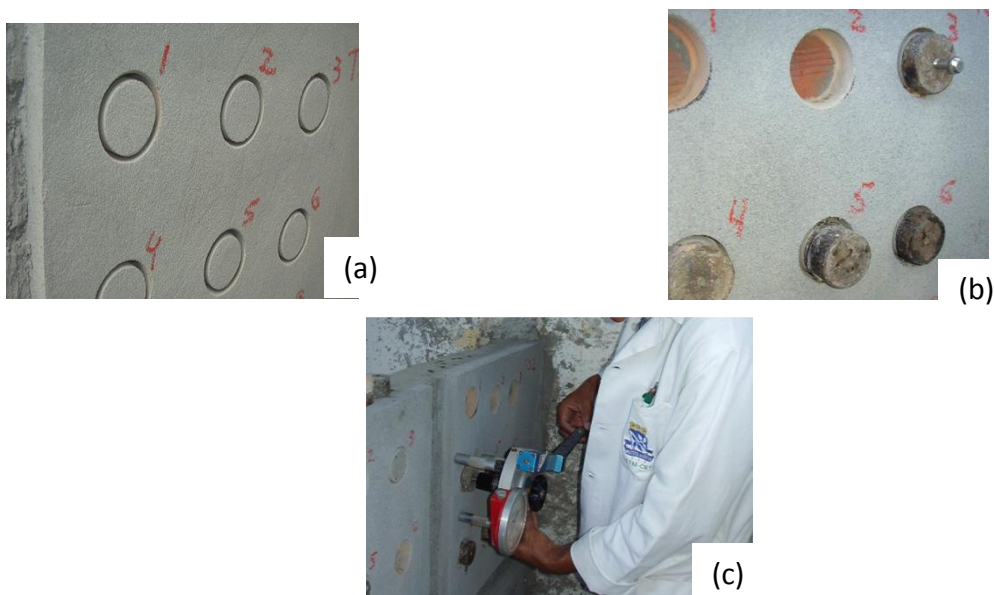


Figura 50: (a) corte dos corpos de prova; (b) Pastilhas metálicas coladas; (c) Ruptura por tração

i) Caracterização da microestrutura por microscopia de varredura eletrônica- EDS

Tendo em vista a utilização da microscopia eletrônica de varredura associada a espectrometria de dispersão de energia (EDS) na análise microestrutural nesse trabalho, será explanada a seguir uma breve revisão sobre esse método.

A microestrutura da pasta de cimento formada por pequenos cristais de cimento hidratado, partículas de cimento não hidratado e vazios em geral possui dimensões que, para sua visualização requer o uso do microscópio eletrônico de varredura. Este procedimento, de acordo com Costa et al (2009), consiste em um feixe de elétrons gerado na coluna óptica-eletrônica do aparelho, focando em ponto da amostra, varrendo-a. A interação desse feixe com o material provoca a ejeção de elétrons e radiação eletromagnética, constituindo os sinais detectáveis pelos sensores específicos, que pode ser: elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raio X característicos. As imagens obtidas através da captação dos elétrons secundários permitem avaliar a morfologia e a textura dos compostos, já a imagem obtida por meio dos elétrons retroespalhados permitem visualizar a heterogeneidade no interior da amostra.

Em conjunto com a obtenção de imagens pode ser identificada através do EDS, a composição química de partículas, regiões ou pontos de interesse na amostra. A interação do feixe de elétrons com o material da amostra emite raios-X com energia característica do material sobre o qual incide o feixe.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura para obtenção das micrografias e da composição química das amostras foi realizado em um microscópio eletrônico da marca Shimadzu, modelo SS 550. As amostras que foram submetidas ao ensaio foram extraídas dos blocos cortados da região posterior à de carregamento (figura 51) dos corpos-de-prova aos 95 dias de idade, os quais foram imersos em álcool isopropílico por 48 horas com intuito de paralisar as reações de hidratação do cimento.



Figura 51 – Região da extração das amostras para o ensaio de MEV-EDS

Lâminas com dimensões 1,0 x 1,0 x 0,5 cm foram cortadas em uma serra de baixa rotação, formando as amostras constituídas de três lâminas para cada traço de argamassa. A secagem desse material foi feita em cápsulas de alumínio dentro de uma estufa com temperatura de 100 ± 5 °C, por 48 horas, de onde foram relocadas para um dessecador até o momento da preparação para a realização da microscopia. Tal procedimento consiste em revestir o material com uma fina camada de ouro, devido à necessidade de torná-lo bom condutor de eletricidade, e, assim, proporcionar as interações eletrônicas necessárias nas análises por MEV-EDS.

A identificação dos produtos da hidratação do cimento, hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado (CSH), foi feita pela relação molar percentual desses produtos obtidos das análises do EDS associado ao MEV. O método adotado foi baseado nos trabalhos de Rossignolo (2009) e de Wasserman & Bentur (1996), no qual a relação Ca/Si foi um parâmetro para

análise da zona de interface agregado-pasta em concretos.

Foram estabelecidos perfis perpendiculares à região de interface da matriz da argamassa de referência e com agregados de PEADr, a partir do interior do agregado em direção à pasta. A linha de base do perfil foi dividida em intervalos aproximados de 10 micra, nos quais foram determinados a composição percentual dos óxidos presentes na pasta de cimento. Os perfis das relações entre os óxidos de cálcio e de silício foram relacionados com à presença do hidróxido de cálcio e do CSH.

4 – RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 - Cimento

Os laudos fornecidos pelo fabricante dos cimentos utilizados, cujos resultados estão relacionados nos quadros 11 e 12, demonstram que todas as propriedades analisadas atenderam aos requisitos da norma 11578/91.

4.1.2 – Propriedades físicas dos agregados

A granulometria dos agregados está caracterizada a partir dos dados mostrados nas Tabelas 7 e 8 e das curvas granulométricas da figura 52

Tabela 7 – Granulometria dos agregados de PEADr

Peneiras	Aberturas (mm)	%	
		Retida	Acumulada
8	2,36	0	0
16	1,18	0	0
30	0,60	15	15
50	0,30	53	68
100	0,15	28	96

Tabela 8 – Granulometria da areia

Peneiras	Aberturas (mm)	%	
		Retida	Acumulada
8	2,36	0	0
16	1,18	0	0
30	0,60	0	0
50	0,30	25	25
100	0,15	66	91

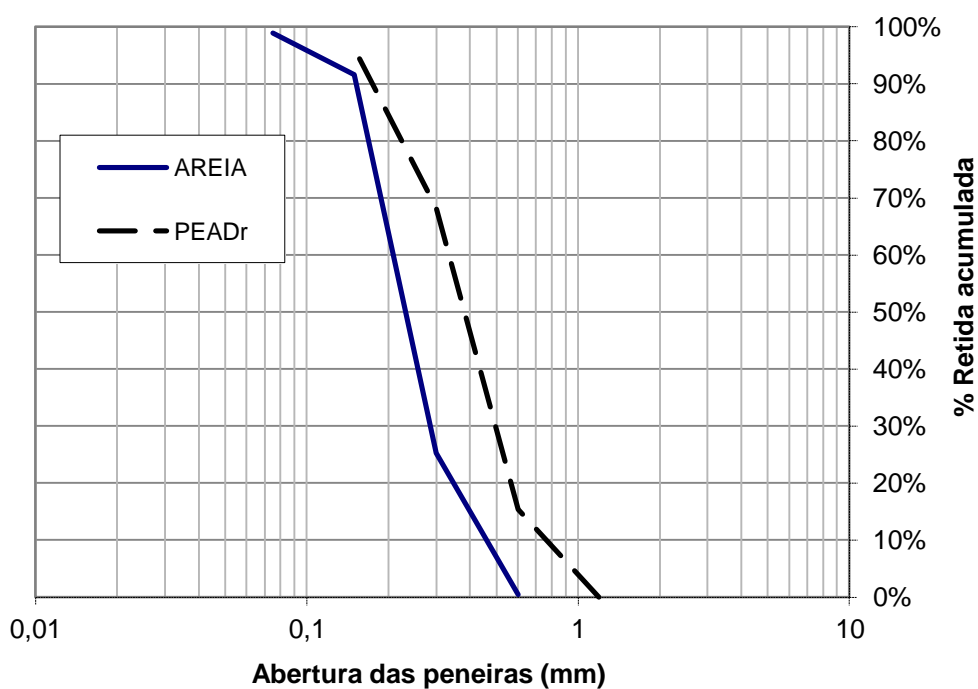


Figura 52 – Curvas granulométricas da areia e dos agregados de PEADr

O quadro 17 exhibe o resumo dos resultados das caracterizações dos agregados.

Quadro 17 – Resumo das características dos agregados

Determinação	Resultado	
	Areia	PEADr
Massa específica (g/cm^3)	2,63	0,967
Módulo de finura	1,16	1,79
Dimensão máxima (mm)	0,60	1,18
Massa unitária (g/cm^3)	1,47	0,32
Absorção de água (%)	0,36	-

A areia utilizada apresentou uma granulometria mais fina do que os agregados artificiais de PEADr, demonstrado pela curva granulométrica da areia, que está à esquerda daquela referente aos agregados de PEADr, e, por isso, possui maior teor de finos. Além

disso, o módulo de finura e a dimensão máxima da areia são menores do que a do PEADr. Carneiro e Cincotto (1999), avaliando a distribuição granulométrica da areia em argamassa, definiu como coeficiente de uniformidade (C) a relação entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10% passantes, obtidos da curva granulométrica, segundo o qual, areia com coeficiente menor do que cinco é considerada muito uniforme. Avaliando os agregados desse trabalho por esse parâmetro de uniformidade com os valores passantes obtidos a partir das curvas mostradas na figura 52, obteremos os resultados mostrados nas equações 4.1 e 4.2.

$$C_{\text{areia}} = 0,25 / 0,14 = 1,78 \quad (4.1)$$

$$C_{\text{PEADr}} = 0,42 / 0,18 = 2,33 \quad (4.2)$$

A areia e o PEADr, são, portanto, agregados muito uniformes. Isto também pode ser comprovado pela distribuição granulométrica exibidas nas tabelas 7 e 8, na qual há retenção em poucas peneiras. Em verdade, o coeficiente de uniformidade está relacionado com a inclinação da curva granulométrica do agregado, no sentido de que quanto mais próximo da unidade estiver esse coeficiente, mais inclinada e vertical estará a curva. Nesse contexto areia possui maior uniformidade do que os agregados de PEADr, e a curva granulométrica da mistura entre ambos estará em uma posição intermediária, e será, portanto, também uniforme.

Embora a uniformidade dos grãos possa influenciar o índice de vazios do agregado, outros fatores como dimensão máxima, forma e grau de empacotamento das partículas devem ser considerados. A massa unitária, como uma propriedade que integra essas outras citadas, foi utilizada por Carneiro, Cincotto e John (1997), estabelecendo-se o parâmetro denominado de densidade de empacotamento (ρ), obtido pela relação da massa unitária pela massa específica do agregado. Avaliando a areia e os agregados de PEADr por esse parâmetro, obteremos os resultados mostrados nas equações 4.3 e 4.4.

$$\rho_{\text{areia}} = 1,47 / 2,63 = 0,55 \quad (4.3)$$

$$\rho_{\text{PEADr}} = 0,32 / 0,967 = 0,33 \quad (4.4)$$

Dos valores acima verifica-se que os grãos de areia ocupam 55% do volume unitário, enquanto os agregados de PEADr ocupam 33%, donde conclui-se que os vazios nos agregados de PEADr são significativamente maiores do que os da areia. A princípio, esses resultados remetem a um volume maior de pasta de cimento na matriz das argamassas com agregados de PEADr, que poderá influenciar em suas propriedades físico-mecânicas. Todavia, é necessário considerar outros fatores que também influenciam tais propriedades. Como exemplo, pode-se citar a forma irregular das partículas de PEADr, como mostra a figura 53, e sua dimensão máxima, as quais poderão ter efeito desfavorável do ponto de vista da textura e plasticidade das misturas, e do aumento da zona de transição, o que irá afetar negativamente a resistência da argamassa. Essas hipóteses serão discutidas a partir dos resultados obtidos para as propriedades das argamassas.

É importante também salientar as diferenças entre as massas específicas e unitárias da areia e do PEADr, características que influenciam diretamente o peso específico da argamassa da argamassa fresca e endurecida.



Figura 53 – Partícula de PEADr (ampliação 6X)

4.1.3 – Análise térmica

Os resultados da análise térmica do PEADr estão representados em forma de curvas, obtidas dos dados de ensaio fornecidos pelo programa de computador associado ao sistema, e que são apresentados em função da temperatura.

a) CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)

A curva obtida a partir do ensaio de DSC dos agregados de PEADr está mostrada na figura 54.

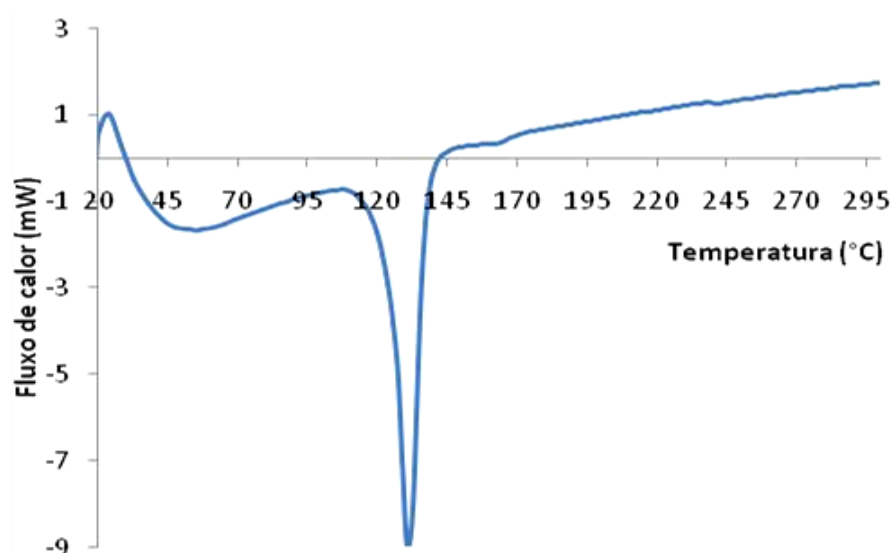


Figura 54 – Curva de DSC do PEADr

Podemos observar apenas um pico de fusão até a temperatura de 300 °C. A presença de um único pico de fusão do PEADr, em torno de 130 °C comprova que não há contaminação pela mistura com outras resinas, como PET ou PVC. O pico de fusão apresenta-se bem definido, mostrando que a fusão do PEADr ocorreu em uma temperatura específica, comprovando também a uniformidade desse plástico reciclado.

b) TERMOGRAVIMETRIA

A análise termogravimétrica foi realizada a partir do resultado do ensaio, o qual gerou a curva TGA e sua derivada (DTGA) mostradas na figura 55. Os resultados foram comparados com os obtidos por Torres (2007), para a termogravimetria do PEAD virgem, conforme quadro 18, e com a termogravimetria dos estudos de Candian (2007), com PEAD reciclado.

Quadro 18 – Dados da termogravimetria do PEAD (TORRES, 2007)

Temperatura de início da degradação (° C)	Temperatura de final da degradação (° C)	Temperatura de degradação acelerada (° C)
300	490	460

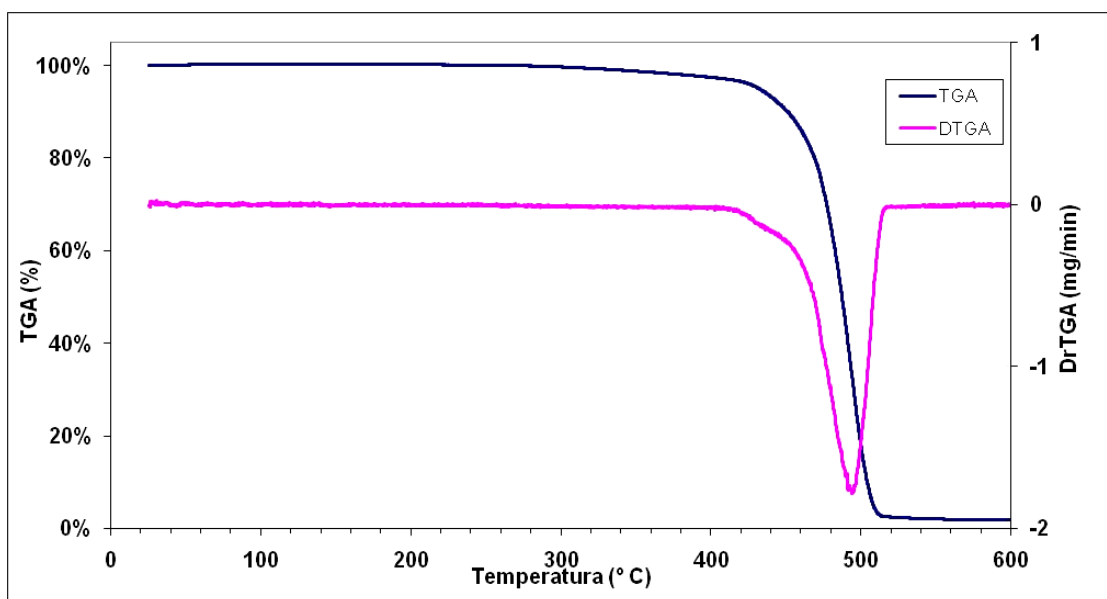


Figura 55 – Curvas TGA e DTGA da amostra de PEADr

Os dados obtidos nesse estudo para as temperaturas de degradação do PEADr estão resumidos no quadro 19. A amostra de PEADr apresenta 100% da massa inicial até a temperatura de 275 °C, a partir da qual ocorre uma redução de massa até a temperatura de aproximadamente 515 °C. Nesse intervalo ocorreu uma perda de massa de 97,44% de sua massa inicial, resultante da degradação do polímero. A degradação acelerada ocorreu na temperatura de 492 °C, onde a curva DTGA apresenta um pico. A partir de 515 °C a curva TG apresenta um patamar, correspondendo a uma massa residual de 2,56% da massa inicial, que pode estar relacionada à presença de aditivos ou pigmento inorgânicos. Os resultados obtidos por Candian (2007) foram semelhantes aos apresentados nesse estudo.

Quadro 19 – Dados da termogravimetria do PEADr

Temperatura de início da degradação (° C)	Temperatura de final da degradação (° C)	Temperatura de degradação acelerada (° C)
275	515	492

Comparando esses resultados com aqueles do quadro 18, percebemos uma variação nas temperaturas características da degradação do PEAD virgem e reciclado. Isso ocorre provavelmente por degradação térmica no processo de reciclagem, em que há quebra das ligações covalentes e posterior reticulações na cadeia do polímero, o que provoca mudanças no comportamento térmico do material. Convém salientar que, como mostra a figura 55, não ocorreu perda de massa e, portanto, degradação na temperatura de fusão do material, pois, como citado na seção 2.1.3, nesse ponto ocorre apenas a mudança para o estado viscoso do plástico, devido à fusão dos seus cristalitos.

A partir dos resultados desse ensaio podemos comprovar que o plástico reciclado utilizado como agregado nesse estudo é composto por 97,44% de PEAD, não sendo detectada a presença de mais de um tipo de polímero no plástico reciclado utilizado, pois a curva termogravimétrica evidencia apenas um evento térmico, referente à degradação do PEADr.

4.2 – PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

O índice de consistência, teor de ar incorporado/aprisionado, retenção de água e consumo unitário de cimento foram determinados em todos os traços de argamassa no estado fresco desse estudo. Os resultados estão resumidos na Tabela 9, onde os traços são diferenciados de acordo com o percentual de PEADr: AR é a argamassa de referência (0% de PEADr), AS-10 (10% de PEADr), AS-17 (17% de PEADr) E AS-25 (25% de PEADr).

Tabela 9– Propriedades das argamassas no estado fresco

Argamassa	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consistência (mm)	Teor de Ar* (%)	Retenção de água (%)
AR	216,18	256	19	67
AS-10	213,51	253	22	62
AS-17	224,55	246	21	64
AS-25	222,39	243	22	60

*Ar incorporado/aprisionado

Em relação aos traços experimentais na 1ª fase desse estudo, mostrados na Tabela 5, os resultados da tabela 9 mostram uma redução da consistência e da retenção de água, ao passo que houve um aumento do teor de ar nas argamassas. A menor relação água/cimento dos traços atuais (tabela 9) contribuiu para a redução da consistência supra. A eficiência na dispersão das partículas de cimento proporcionada pelo uso do superplastificante reduziu a relação água/cimento das misturas sem prejudicar a consistência e homogeneidade, como podemos notar pela figura 56, onde as argamassas AR e AS-25, com mesma relação água/cimento, apresentam aspectos semelhantes com relação à homogeneidade. O aditivo superplastificante atuou também como agente incorporador de ar, tendo em vista que houve um aumento de 8%, 7% e 6% no teor de ar das argamassas AR, AS-10 e AS-25, respectivamente, em relação aos traços da tabela 5, sendo este outro fator que pode contribuir para melhoria da plasticidade. Além disso, o nível de dispersão das partículas de cimento conferido pelo uso desse aditivo não favorece o aprisionamento de líquidos na pasta. Devido a esse efeito, os resultados da retenção de água apresentaram substancial redução nos traços atuais.

Em relação às propriedades da argamassa no estado plástico estudadas, a figura 57 ilustra a variação do índice de consistência, enquanto a figura 58 ilustra as variações do teor de ar incorporado/aprisionado em conjunto com a retenção de água.



(a)

(b)

Figura 56 – Argamassas no estado plástico: (a) AR; (b) AS-25

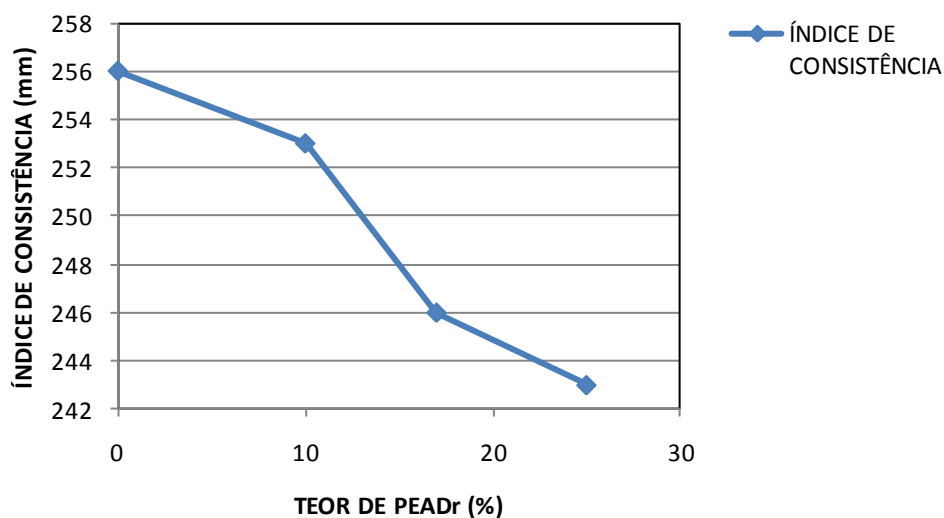


Figura 57 – Variação do índice de consistência em função do teor de PEADr

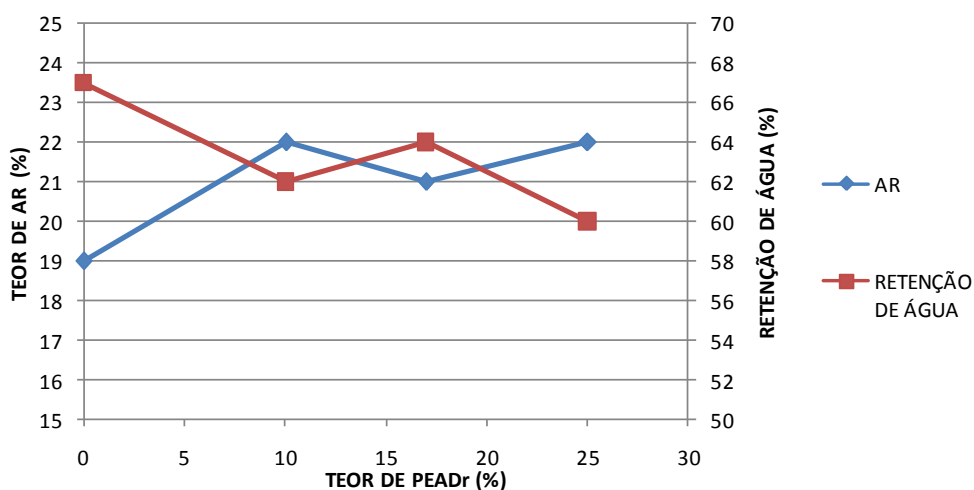


Figura 58 – Variação do teor de ar incorporado e retenção de água em função do teor de PEADr.

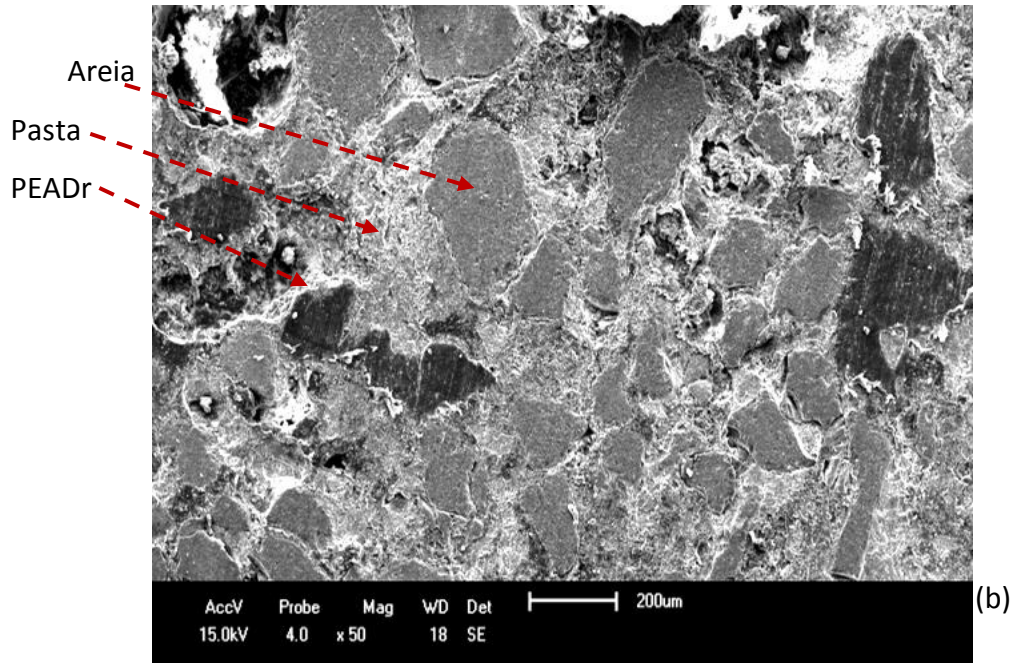
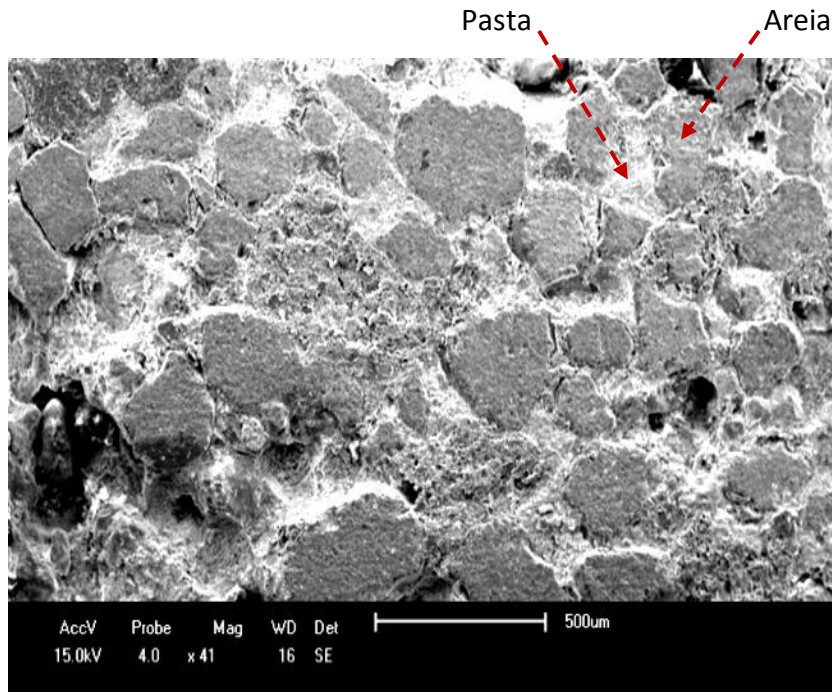
A consistência das argamassas sofreu uma ligeira redução com o aumento do teor de agregados de PEADr. Com a substituição da areia, o teor de finos reduz e aumenta a quantidade de partículas com forma irregular de PEADr, reduzindo parâmetros de trabalhabilidade da argamassa, como a consistência.

A argamassa com agregados de PEADr apresentou maior teor de ar incorporado/aprisionado e menor retenção de água. Como demonstrado anteriormente, a areia possui maior densidade de empacotamento do que os agregados de PEADr, e, conseqüentemente, possui menor volume de vazios. Ao substituir a areia por agregados de PEADr, ocorreu o aumento do volume de vazios dos agregados resultante, e, considerando que o volume de pasta de cimento foi o mesmo para todos os traços, as misturas com

agregados de PEADr proporcionaram condições de aprisionar maior volume de ar. A partir disso, poderia-se inferir que o teor de ar incorporado/aprisionado seria proporcional ao teor de substituição da areia, porém esse efeito não foi verificado. O mesmo teor de ar incorporado/aprisionado entre as misturas AS-10 e AS-25 indicam que o volume de ar incorporado/aprisionado entre ambas foi equivalente, provavelmente devido à densidades de empacotamento semelhantes. O menor teor verificado para a AS-17 pode ser atribuído ao maior grau de empacotamento dos agregados dessa composição em relação às demais com PEADr.

O teor de finos (GOMES e NEVES, 2002) e o grau de flocculação das partículas de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994) influenciam a propriedade de retenção de água na argamassa. O conjunto desses dois fatores contribuíram para a redução da retenção de água nos traços de argamassa com agregados de PEADr. O maior teor de finos do traço de referência, como também a maior proximidade das partículas de cimento devido ao menor teor de ar incorporado/aprisionado, conferiram a esta mistura maior capacidade de retenção de água. O menor teor de ar incorporado/aprisionado pode ter contribuído para o maior valor obtido da retenção de água do traço AS-17. A dispersão das partículas de cimento promovida pela ação do superplastificante ocasionou o baixo teor de retenção de água em todas as misturas, tomando-se como base o método de dosagem adotado.

As micrografias da figura 59, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostram as matrizes das argamassas estudadas nesse trabalho. A matriz da argamassa de referência, AR, apresenta uma distribuição granulométrica mais contínua dos agregados, já a argamassa AS-10 apresenta maior volume de pasta entre os grãos, proveniente do menor grau de empacotamento das partículas. As matrizes das argamassas AS-17 e AS-25 mostram uma predominância de grãos maiores, mas, em geral, o volume de pasta de cimento entre os grãos da matriz da AS-17 é menor, pela maior densidade de empacotamento dos grãos.



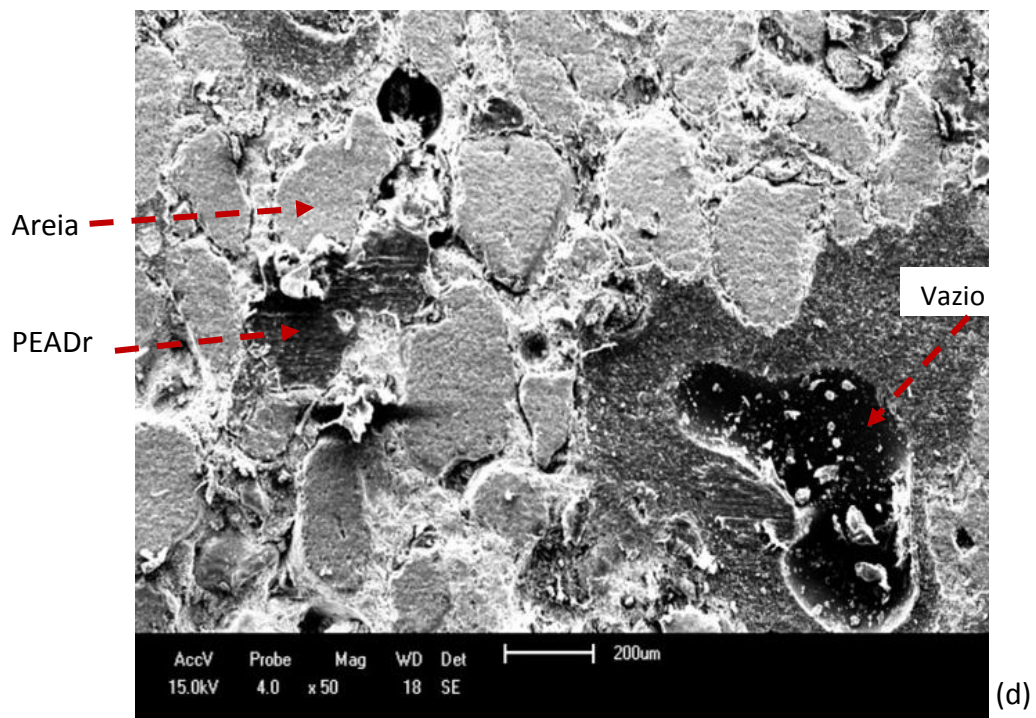
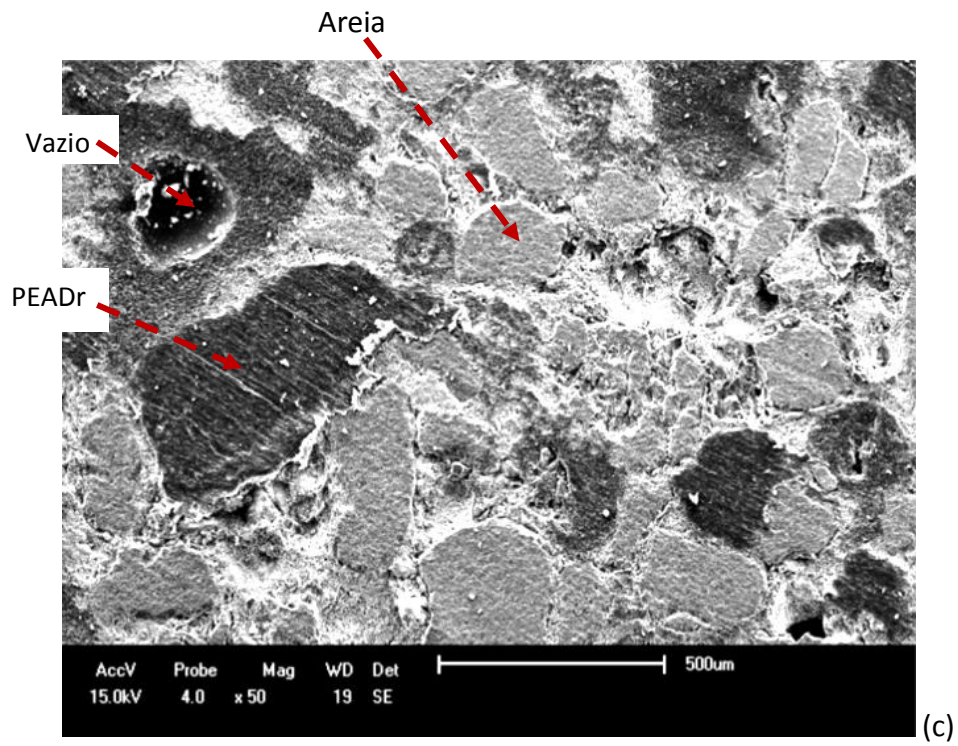


Figura 59 – Micrografias das amostras de argamassa: (a)AR (ampliação 41X); (b) AS-10 (ampliação 50X); (c) AS-17 (ampliação 50X); (d) AS-25 (ampliação 50X)

4.3 – PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas das argamassas no estado endurecido. Tendo em vista a função de revestimento das argamassas estudadas, foram determinadas as seguintes propriedades: Resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade e ductilidade na compressão, tenacidade na flexão, absorção de água por capilaridade, densidade de massa seca e resistência de aderência à tração.

4.3.1 – ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS

Com o objetivo de consubstanciar os resultados das propriedades citadas, será feita inicialmente uma análise dos produtos da hidratação do cimento relativos à matriz das argamassas. São apresentados os cálculos dos volumes percentuais dos materiais constituintes dos traços deste estudo, nos quais foram estimados os percentuais dos volumes dos produtos hidratados de cimento e da porosidade, definida como a soma dos poros capilares com os vazios do ar incorporado/aprisionado. Em seguida são apresentados os perfis Ca/Si das amostras de argamassa, onde são analisados os resultados.

I – VOLUMES PERCENTUAIS DAS ARGAMASSAS

O método utilizado nesta seção foi baseado nos estudos de Quarcioni et al (2009). As variáveis de saída para os cálculos foram os traços unitários em massa empregados nesse estudo, apresentado na Tabela 6.

a) Traços em volume

Os traços em massa foram convertidos para traços em volume dividindo-se as proporções unitárias dos traços em relação à massa de cimento pelas suas respectivas massas específicas constantes nos quadros 12, 14 e 17. O memorial de cálculo dos traços em volume é apresentado no anexo 1A.

b) Volumes das misturas frescas

Os volumes totais dos traços de argamassa no estado fresco foram calculados pela totalização dos volumes dos seus materiais constituintes. O teor de ar incorporado/aprisionado foi considerado para completar 100% do volume da argamassa. Assim, utilizando o método de cálculo de Quarcioni *et al* (2009) através da equação 4.5, foram calculados os volumes totais das misturas. Os cálculos dos volumes das argamassas estão demonstrados no anexo 1B.

A Tabela 10 mostra os traços em volume e os seus respectivos volumes totais.

$$\text{Volume total com \% de ar} = \frac{\text{Volume total dos materiais}}{1 - \text{ar incorporado (\%)}} \quad (4.5)$$

Tabela 10 – Conversão do traço em massa para o traço em volume

Argamassas	Traço (em volume)					Total	Ar (%)	Total com % de ar
	Cimento	Areia	PEAD	Água	Aditivo			
AR	0,3135	2,2814		1,15	0,0022	3,7470	19	4,6260
AS-10	0,3135	2,0532	0,1344	1,15	0,0022	3,6533	22	4,6838
AS-17	0,3135	1,8251	0,2275	1,15	0,0022	3,5183	21	4,4535
AS-25	0,3135	1,7110	0,3309	1,15	0,0022	3,5076	22	4,4969

c) Volumes percentuais dos componentes das argamassas no estado endurecido

O volume unitário da água combinada nas reações de hidratação e os respectivos volumes dos produtos resultantes, assim como o volume da água adsorvida nos poros de gel e da água evaporável foram calculados através das equações 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 (NEVILLE, 1997).

Foi considerado que o volume de água combinada quimicamente (Ac) equivale a 23% da massa de cimento anidro (Mc) e o volume dos sólidos resultantes da hidratação (Vs) corresponde à soma do volume do cimento anidro com a água combinada menos um fator de 0,254 (NEVILLE, 1997).

$$Ac = 0,23 \times Mc \quad (4.6)$$

$$Vs = Vc + Ac (1 - 0,254) \quad (4.7)$$

A porosidade do gel, estimada em 28%, permite calcular a água adsorvida (Ag) através da equação 4.8. O volume da água evaporável (Ve) pode ser calculado, então, pela diferença entre o volume da água total da mistura (Va) e a soma dos volumes da água combinada com o da água adsorvida nos poros do gel, conforme a equação 5.9 (NEVILLE, 1997):

$$\frac{Ag}{Ag+Vs} = 0,28 \quad (4.8)$$

Das equações 4.6 e 4.7, vem:

$$Ac = 0,23 \times 1,00 = 0,23$$

$$Vs = 0,3135 + 0,23 \times (1 - 0,254) \Rightarrow Vs = 0,4851$$

Da equação 4.8, vem:

$$\frac{Ag}{Ag+0,4851} = 0,28 \Rightarrow Ag = 0,1886$$

$$Ve = Va - (Ac + Ag) \quad (4.9)$$

Donde:

$$Ve = 1,15 - (0,23 + 0,1886) \Rightarrow Ve = 0,7314$$

O quadro 20 resume os valores calculados supra.

Quadro 20 – Volume dos sólidos hidratados e da água na pasta de cimento

Água combinada	Sólidos hidratados	Água do gel	Água evaporável
0,23	0,4851	0,1886	0,7314

Os volumes percentuais de cada fase ou componente da argamassa (cimento, areia, PEADr, aditivo, água combinada e evaporável, sólidos hidratados) foram calculados pela

relação entre o volume do componente ou fase e o volume total da mistura fresca mostrado na tabela 10. A porosidade foi então estimada pela soma dos volumes percentuais de água evaporável e ar incorporado/aprisionado. A tabela 11 mostra os resultados obtidos e o anexo 1C, a demonstração dos cálculos.

Tabela 11 – Volumes percentuais dos componentes das argamassas

Traços	Cimento	Areia	PEADr	Aditivo	Água não evaporável	Sólidos hidratados	Água evaporável	Ar (%)*	Poros (%)
AR	6,78%	49,3%	0,0%	0,05%	9,05%	10,49%	15,81%	19	34,81
AS-10	6,69%	43,8%	2,9%	0,05%	8,94%	10,36%	15,61%	22	37,61
AS-17	7,04%	41,0%	5,1%	0,05%	9,40%	10,89%	16,42%	21	37,42
AS-25	6,97%	38,0%	7,4%	0,05%	9,31%	10,79%	16,26%	22	38,26

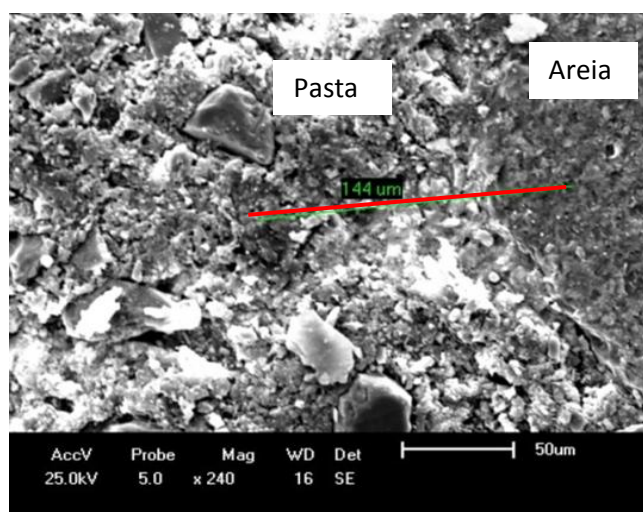
*ar incorporado/aprisionado

Da Tabela 10 observa-se a redução do volume das misturas à medida que o teor de substituição aumenta, devido à menor densidade do PEADr em relação à areia, mas essa redução não é gradativa ao ser considerado o volume de ar incorporado/aprisionado. A AS-10 e a AS-17 são os traços com maior e menor volume total, respectivamente. Uma vez que os volumes percentuais mostrados na Tabela 11 são calculados sobre o volume total das misturas, estima-se que a AS-17 contenha o maior teor de sólidos entre todas as composições, já a AS-10, o menor teor. A argamassa de referência possui maior percentual volumétrico de agregados. Assim, embora a areia tenha maior densidade de empacotamento, a mistura de referência apresenta um dos maiores volumes e, conseqüentemente, reduz a concentração de sólidos hidratados. Em relação à estimativa da porosidade, definido pela soma dos poros capilares com o volume de ar incorporado/aprisionado, a AS-10 e a AS-17 apresentam praticamente o mesmo valor e a AS-25, uma porosidade ligeiramente superior.

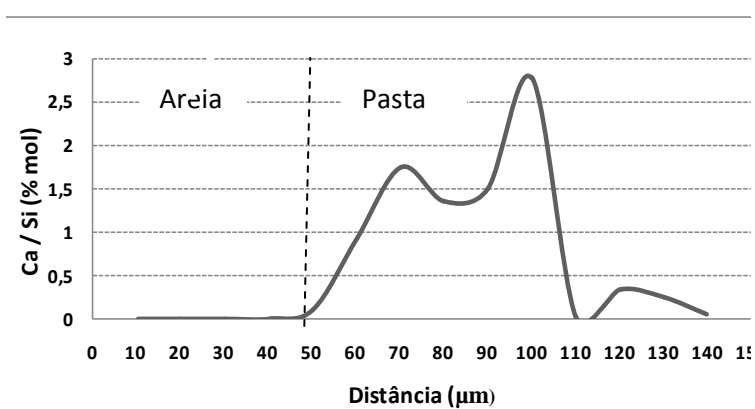
Da Tabela 11 estima-se que mais de um terço dos volumes totais das argamassas seja relativo ao volume de poros. Essa propriedade, juntamente com o volume de sólidos hidratados, influenciam a resistência mecânica e a capacidade de absorção da argamassa como será visto adiante.

II – ANÁLISE POR MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA – EDS

As figuras 60, 61, 62 e 63 mostram as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, no modo elétron secundário, da matriz da argamassa. A linha vermelha indica a linha de base para obtenção dos respectivos perfis Ca/Si.

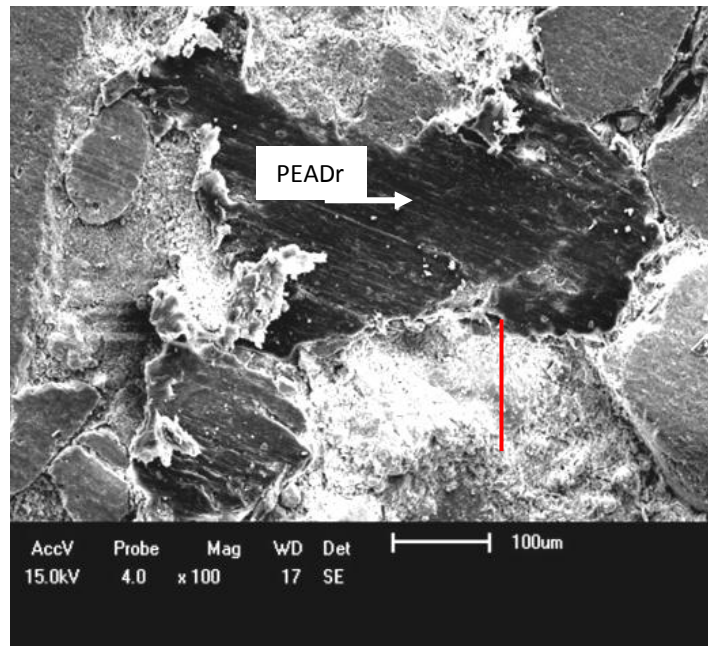


(a)

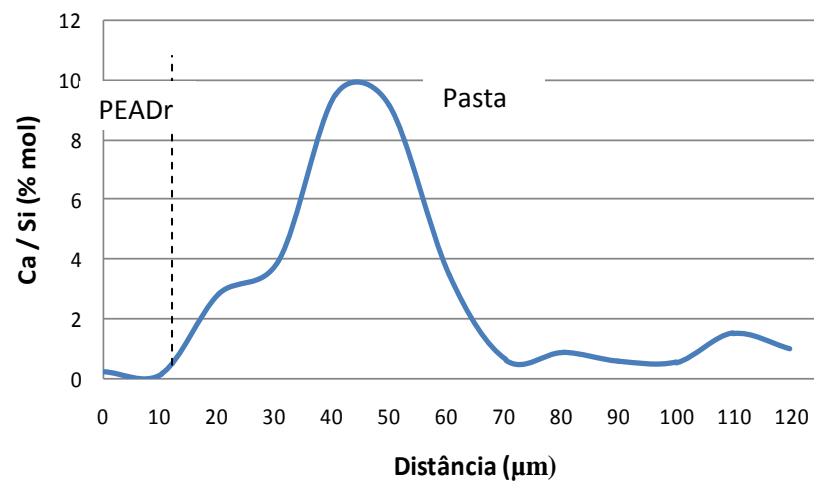


(b)

Figura 60 – (a) Micrografia da matriz da argamassa (aumento 250x); (b) Perfil Ca/Si: areia - pasta de cimento

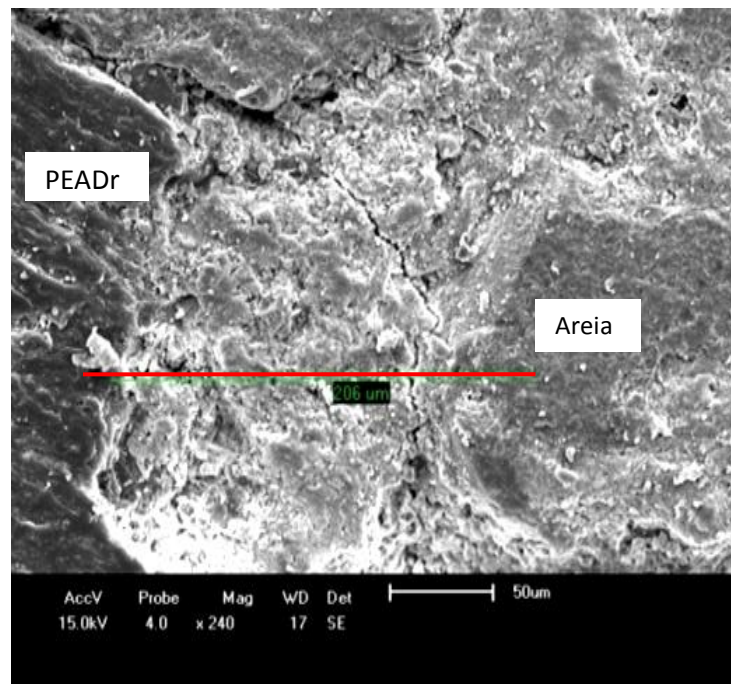


(a)

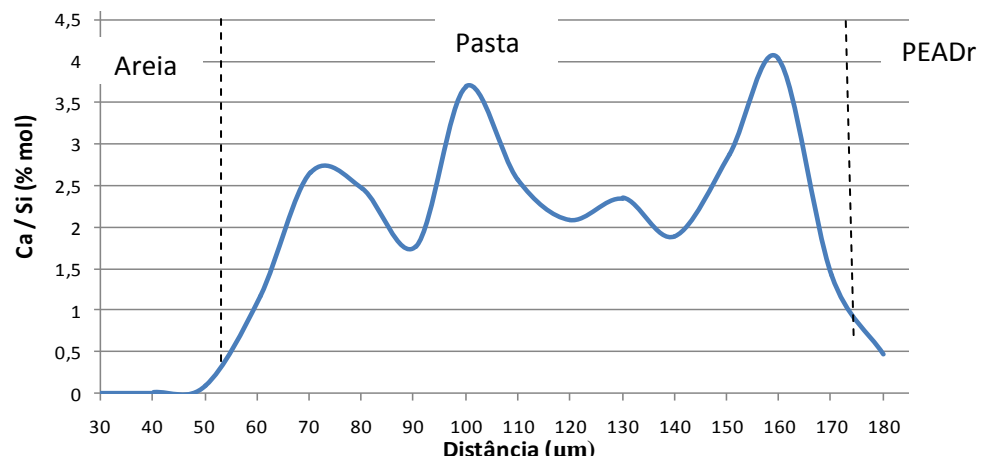


(b)

Figura 61 – (a) Micrografia da matriz da argamassa (aumento100x); (b) Perfil Ca/Si: PEADr – pasta de cimento

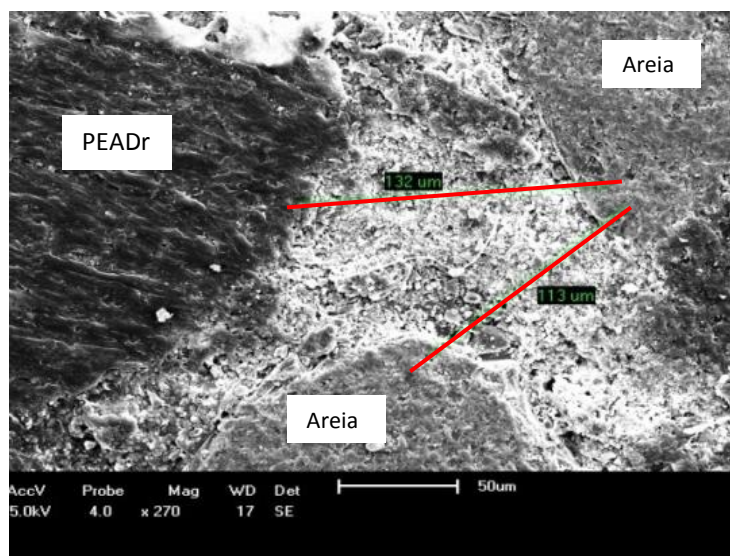


(a)

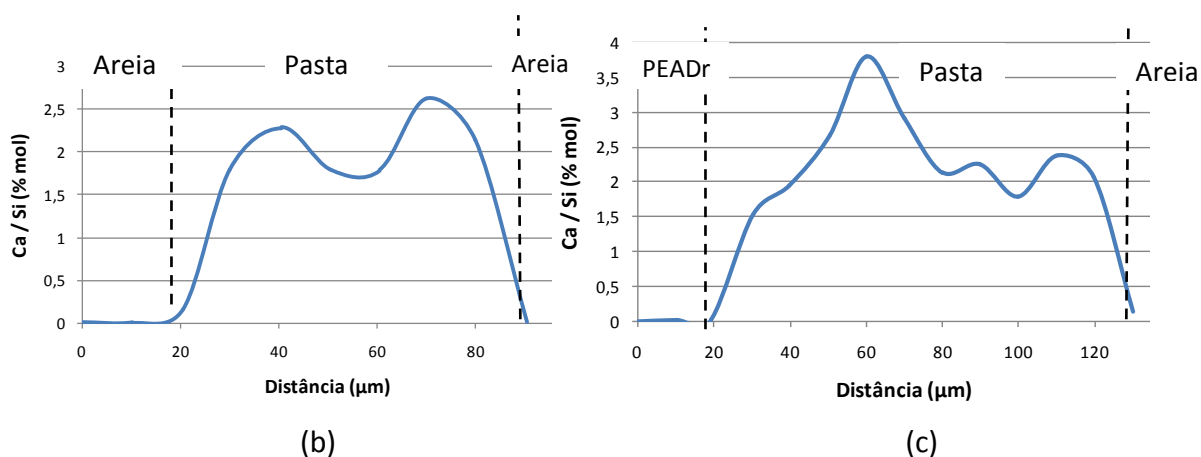


(b)

Figura 62 – (a) micrografia da matriz da argamassa (aumento 240x); (b) Perfil Ca/Si: areia - PEADr



(a)



(b)

(c)

Figura 63 – (a) Micrografia da matriz da argamassa(aumento 270x); (b) Perfil Ca/Si: areia – areia; (c) Perfil Ca/Si: PEADr – areia

Apesar de não ter sido possível a clara distinção da espessura da zona de transição agregado-pasta pela análise dos perfis Ca/Si das figuras 60, 61, 62 e 63, é possível notar valores maiores nos pontos da pasta de cimento próximos dos agregados de PEADr. Isto indica que nessa região, as estruturas de hidróxido de cálcio estão mais presentes, o que pode ser atribuído à não absorção das partículas de PEADr, o que aumenta a relação água/cimento efetiva da pasta e, conseqüentemente, propicia o crescimento de tais estruturas.

4.3.2 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à compressão estão resumidos graficamente na figura 64. A argamassa de referencia obteve um valor de 3,34 MPa. Como mostra a Tabela 12, esse valor foi reduzido em 28%, 12% e 33% para as amostras AS-10, AS-17 e AS-25, respectivamente, não havendo portanto redução linear dessa resistência. Redução similar foi obtida por Choi *et al* (2009).

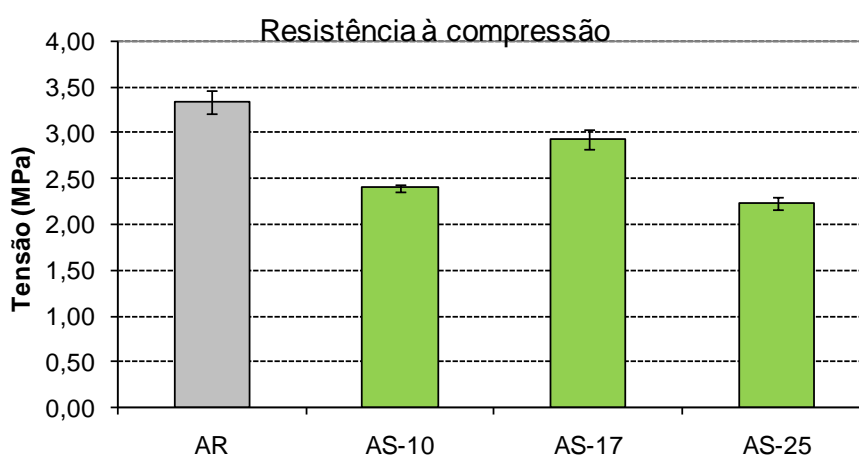


Figura 64 – Resistência à compressão

Tabela 12 - Resistência à compressão

Argamassa	Tensão de compressão (MPa)	S (MPa)	Redução (%)
AR	3,34	0,13	-
AS-10	2,40	0,03	28
AS-17	2,93	0,11	12
AS-25	2,24	0,07	33

Legenda – S = Desvio padrão

As deformações medidas durante o ensaio produziram, em conjunto com as respectivas tensões, as curvas tensão *versus* deformação das amostras de argamassa, mostradas na figura 65.

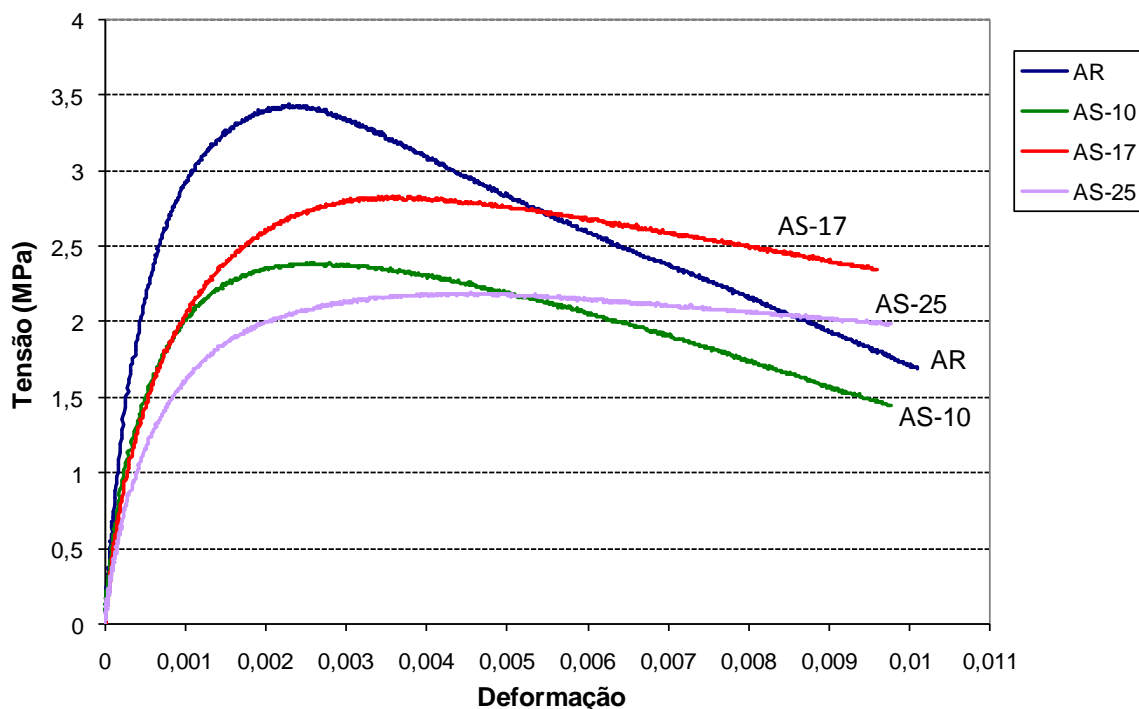


Figura 65 –Tensão *versus* deformação à compressão.

À medida que aumenta o teor de agregados de PEADr na argamassa, o material resiste mais à tensão de compressão após a ruptura. No caso, por exemplo, da amostra da argamassa de referência, à medida em que o material deforma, ocorre uma redução gradual da tensão de compressão após o rompimento, já na amostra AS-25, o material continua se deformando, mas a redução na tensão é bem menor do aquela verificada para amostra de referência. Este aspecto pode ser observado nos corpos de prova após o rompimento no ensaio de compressão, mostrados na figura 66.

A amostra da argamassa de referência ficou parcial ou totalmente destruída após o ensaio, enquanto que a AS-10 apresentou fissuração e fraturas nos corpos de prova. As amostras das argamassas AS-17 e AS-25 apresentaram sinais de ruptura provavelmente pelo esbojamento causado pela deformação. Este comportamento deve-se à forma de propagação das trincas na pasta de cimento. As partículas de PEADr, possuindo baixo módulo de deformação, proporciona áreas capazes de deformar-se consideravelmente na vizinhança das trincas à medida que a tensão é aplicada. Com isso, o nível de tensão nas extremidades das trincas é reduzido, retardando a sua instabilidade e propagação. Torna-se

claro que esse efeito é incrementado à medida em que aumenta o teor de agregados de PEADr.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 66 – Corpos de prova após o ensaio de compressão: (a) AR; (b) AS-10; (c) AS-17; (d) AS-25

O efeito do retardamento das fissuras citado anteriormente, não aumentou, porém, a resistência à compressão das argamassas com agregados de PEADr. Sendo uma propriedade resultante da interação de diferentes fatores, a resistência mecânica da argamassa depende da resistência de suas fases componentes, como mostra o diagrama da figura 27. No presente estudo, alguns fatores foram mantidos constantes, como relação água/cimento, condições de cura, geometria dos corpos de prova, outros, porém variaram, e, assim contribuíram de diferentes formas para a resistência obtida, alguns de forma cumulativa, como segue.

A resistência mecânica das partículas de PEADr são significativamente menores do que a dos grãos de areia, e, portanto, o esqueleto formado pela mistura de agregados tem

menor resistência do que aquele formado apenas pela areia. A absorção praticamente nula do PEADr contribuiu para a redução da resistência da pasta de cimento pelo aumento da relação Ca/Si, e, portanto, das estruturas de hidróxido de cálcio, conforme discussão na seção 4.3.1-II. A influência desses fatores para a redução da resistência mecânica da argamassa aumenta com o teor de agregados de PEADr e, juntamente com o teor de poros, pode ter contribuído significativamente para as diferenças mostradas na tabela 12 entre a Ar e as amostras com agregados de PEADr. Por outro lado, entre essas composições não foi observado redução da resistência à compressão com o aumento do teor de PEADr. Nesse aspecto, além da quantidade de agregados plásticos, é necessário analisar a porosidade e o teor de sólidos hidratados calculados na tabela 11. A AS-17, com teor intermediário de agregados plásticos, mas com uma das menores porosidades e maior teor sólidos hidratados, apresentou a maior resistência entre as amostras com substituição dos agregados. A AS-25 apresentou menor resistência à compressão, o que pode ser atribuído à quantidade de agregados de PEADr e os efeitos advindos desse teor, e também pela maior porosidade estimada na tabela supra, embora também seja estimado para esse traço, um dos maiores percentuais de sólidos hidratados de cimento, o que mostra que esse fator não prevaleceu sobre os demais. Então, o grau de empacotamento dos agregados com os seus respectivos efeitos, constituiu um fator importante para a resistência à compressão das amostras com agregados de PEADr. A importância da granulometria no processo de substituição da areia por partículas plásticas pode ser ilustrada pelos resultados obtidos por Frgione (2010): A ligeira redução na resistência mecânica do concreto, não superior a 2%, foi obtida nos concretos com substituição de 5% da areia por resíduos plásticos com praticamente o mesmo perfil granulométrico do agregado natural.

4.3.3 – DUCTILIDADE NA COMPRESSÃO

A deformação plástica foi obtida a partir do diagrama tensão-deformação à compressão, conforme a figura 67 e os resultados da Tabela 13.

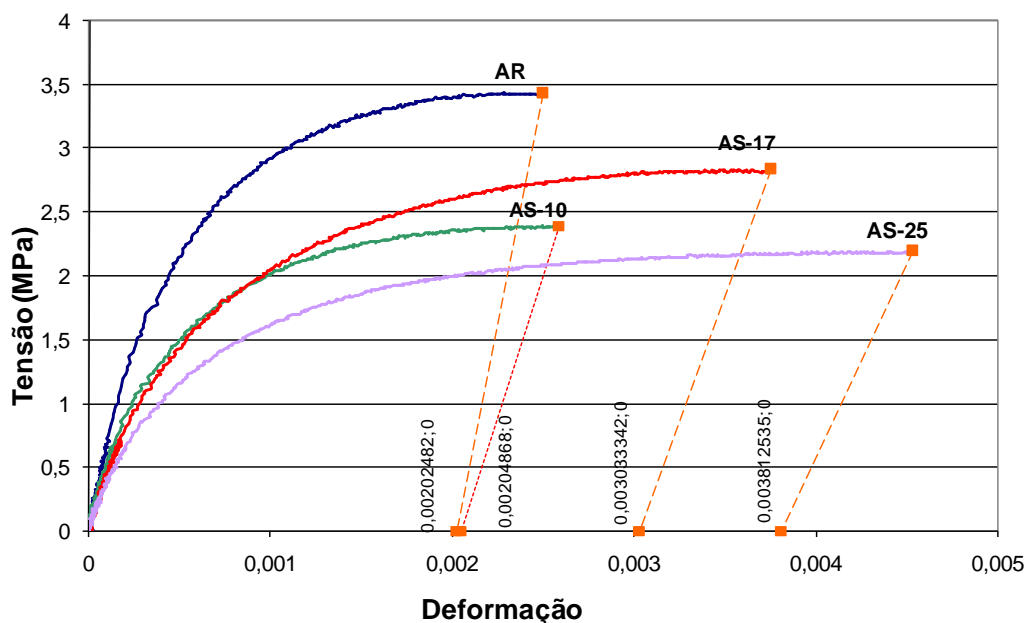


Figura 67 – Deformação plástica na ruptura à compressão

Tabela 13 - Deformação plástica

Argamassa	Deformação plástica (%)	Aumento (%)
AR	0,20	-
AS-10	0,20	0
AS-17	0,30	50
AS-25	0,38	90

A deformação total na tensão de ruptura da argamassa AS-10 foi ligeiramente superior à da argamassa de referencia. Subtraindo-se a deformação elástica, representada pela linha tracejada, da deformação total, não foi obtido aumento da ductilidade da AS-10 em relação à AR. Entre essas amostras, a maior integridade dos corpos de prova da AS-10 mostrados na figura 66 pode ser atribuída à redução do módulo de elasticidade, como será mostrado adiante. Por outro lado, a AS-25 apresentou um aumento da deformação plástica da ordem de 90% daquela obtida para a argamassa com 0% de agregados de PEADr, esse aumento percentual foi da ordem de 50%, no caso da AS-17. Isso mostra que os teores de 17% e 25% de agregados de PEADr proporcionou um incremento da ductilidade da argamassa, corroborando o aspecto desses corpos de prova após a ruptura à compressão, exibidos na figura 66.

4.3.4 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A figura 68 e a Tabela 14 exibem os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão.

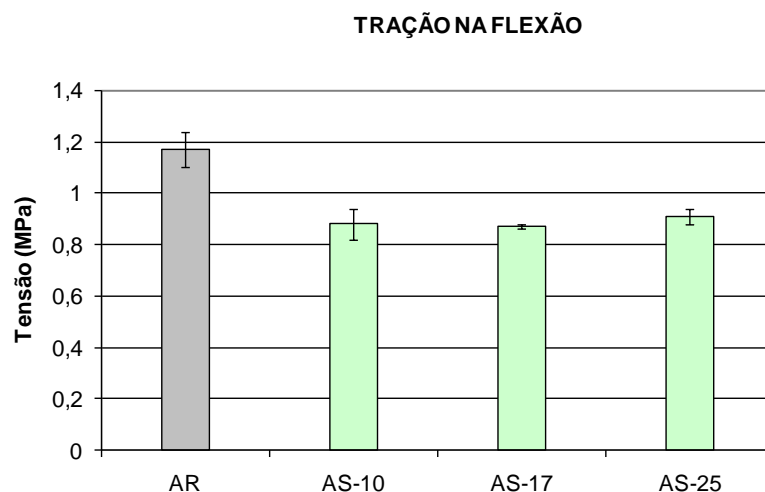


Figura 68 – Resistência à tração na flexão

Tabela 14 - Resistência à tração na flexão

Argamassa	Tensão de tração na flexão (MPa)	S (MPa)	Redução (%)
AR	1,17	0,07	-
AS-10	0,88	0,06	25
AS-17	0,87	0,01	26
AS-25	0,91	0,03	23

Legenda – S = Desvio padrão

De forma semelhante à resistência à compressão, foi verificado que a resistência à tração na flexão reduziu com a substituição da areia por agregados de PEADr. Entre as composições com agregados de PEADr, a variação dessa resistência foi diferente do caso anterior. Não houve diferenças significativas com relação aos valores obtidos da resistência à tração na flexão nas amostras AS-10, AS-17 e AS-25, mas também não foi detectada redução linear dessa propriedade. Por outro lado, na análise das curvas tensão-deflexão mostradas

na figura 69, observa-se diferenças no comportamento das argamassas estudadas. A amostra AS-10 apresentou uma evolução da deflexão em função da tensão semelhante àquela verificada na amostra de referencia e ambas apresentam um pico definido típico da ruptura frágil. Nas amostras AS-17 e AS-25, no entanto, verifica-se maiores deflexões para a um mesmo nível de tensão, em relação às primeiras. A curva das amostras AS-17 e AS-25 exibem uma curvatura nas tensões pré-ruptura, ocasionada pelo acréscimo das deflexões experimentadas nesse trecho. Isto indica que as amostras com maiores teores de agregados de PEADr apresentaram um comportamento mais dúctil na ruptura à flexão.

A redução da resistência à tração na flexão das amostras com agregados de PEADr pode ser explicada pela redução da resistência da pasta de cimento.

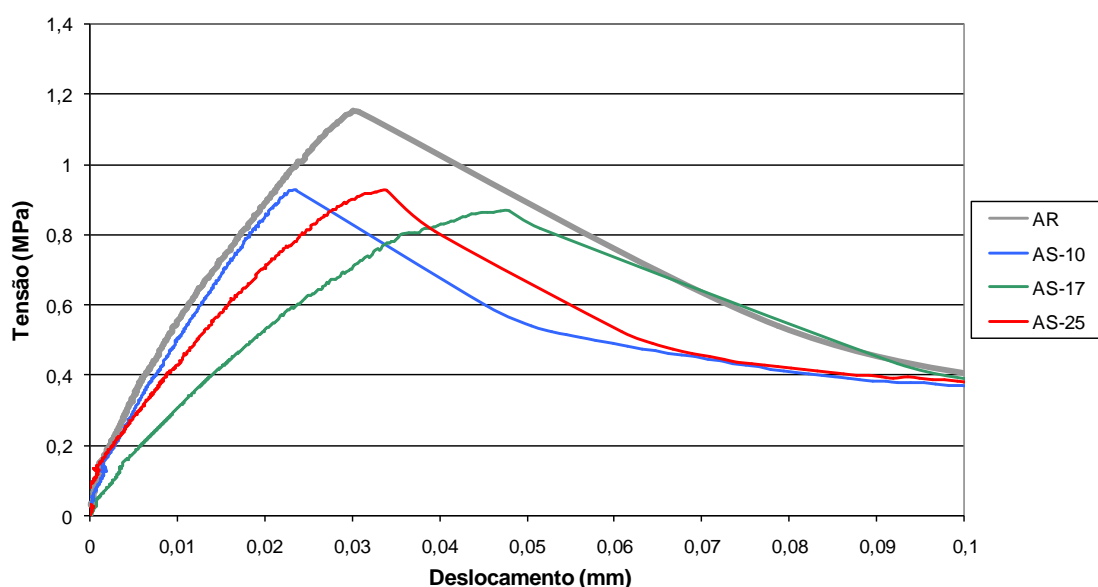


Figura 69 – Tensão versus deslocamento na flexão das argamassas

De forma diferente da ruptura à compressão, onde os materiais à base de cimento rompem pela propagação de numerosas fissuras, na tração esses materiais rompem pela união de poucas fissuras. Esse é um aspecto importante na avaliação do comportamento obtido entre as argamassas com agregados de PEADr, mostrados na figura 69. A amostra AS-17, com maior teor de sólidos hidratados estimado, provavelmente conseguiu distribuir de forma mais efetiva as tensões na pasta de cimento, de modo que o aumento de tensões nas extremidades das trincas foi maior do que nas demais composições. Por outro lado, as

partículas de PEADr também foram submetidas à distribuição de tensões na pasta, que, sendo um polímero com relativa alta capacidade de alongamento, proporcionou maiores deformações, acelerando a união das fissuras, e, assim, rompendo com menores tensões. O equilíbrio desses dois fatores, teor de PEADr e de sólidos hidratados, pode ter sido melhor na composição da amostra AS-25. O menor teor de sólidos hidratados juntamente com maior quantidade de agregados de PEADr, reduziu a tensão de instabilidade das trincas, ocasionando um ligeiro aumento da resistência à tração na flexão, que ocorreu com um deslocamento menor do que a amostra AS-17. A quantidade dos agregados de PEADr utilizado nesse estudo na amostra AS-10 não resultou em um incremento do deslocamento no ensaio à flexão.

4.3.5 – TENACIDADE NA FLEXÃO

A partir do diagrama carga-deslocamento mostrado na figura 70, foram calculadas as tenacidades nas deflexões L/1000, L/750 e L/650, onde L é o vão do corpo de prova, igual a 150 mm, utilizadas no cálculo dos fatores de resistência à flexão (σ_b), cujos resultados são mostrados na Tabela 15.

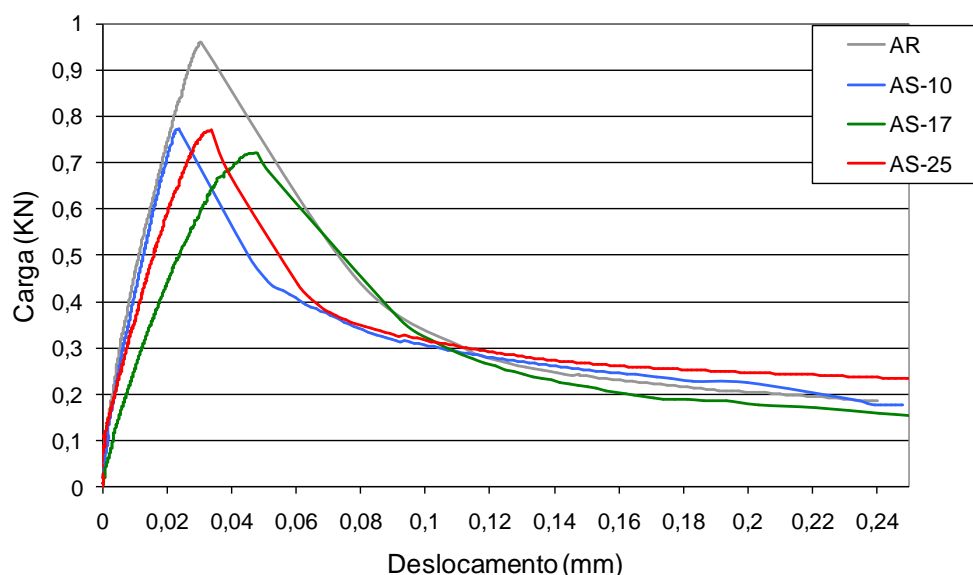


Figura 70 – Diagrama carga-deslocamento na flexão

Tabela 15 - Fatores de resistência à flexão

Argamassa	$\sigma_b/1000$ (MPa)	$\sigma_b/750$ (MPa)	$\sigma_b/650$ (MPa)
AR	0,68	0,59	0,55
AS-10	0,44	0,40	0,38
AS-17	0,47	0,41	0,39
AS-25	0,47	0,43	0,41

Os resultados obtidos demonstram que ocorreu um incremento da tenacidade com o aumento do teor de agregados de PEADr, porém não foi suficiente para que a tenacidade das argamassas com agregados de PEADr fosse maior do que a verificada para a argamassa de referência. A redução, em torno de 30%, da carga de ruptura na flexão das amostras com agregados de PEADr, contribuiu significativamente para a redução das respectivas áreas sob o diagrama carga-deslocamento, de modo que as tenacidades verificadas para essas amostras foram menores do que a amostra de referência em todos os deslocamentos previamente estabelecidos. Isto indica que a substituição da areia por PEADr nos teores estudados não provocou aumento na capacidade de absorção de energia na flexão com relação a argamassa sem agregados de PEADr.

4.3.6 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade das amostras, calculados pelo método da secante conforme a NBR 8522/2003, foram obtidos e constam na figura 71. A redução do módulo de elasticidade ocorreu de forma gradual com o teor de PEADr nas composições. Este era um efeito esperado devido às observações registradas no ensaio de compressão, no sentido de que o aumento do teor de PEADr acarretou uma fratura mais dúctil naquele ensaio. De acordo com a Tabela 16, o módulo de elasticidade reduziu em até 58% em relação à argamassa de referência. Considerando esse percentual e o respectivo teor de substituição, essa redução do módulo de elasticidade foi maior do que as que foram obtidas em estudos anteriores. Esta propriedade se deve às características do polietileno de alta densidade, que

possui um módulo de deformação significativamente menor do que os plásticos de engenharia como o PET, um dos resíduos mais utilizados com agregados em substituição à areia em argamassa/concreto.

Tabela 16 – Percentual de redução do módulo de elasticidade

Argamassas	Módulo de elasticidade (GPa)	Redução (%)
AR	7,18	-
AS-10	4,43	38
AS-17	3,90	45
AS-25	3,01	58

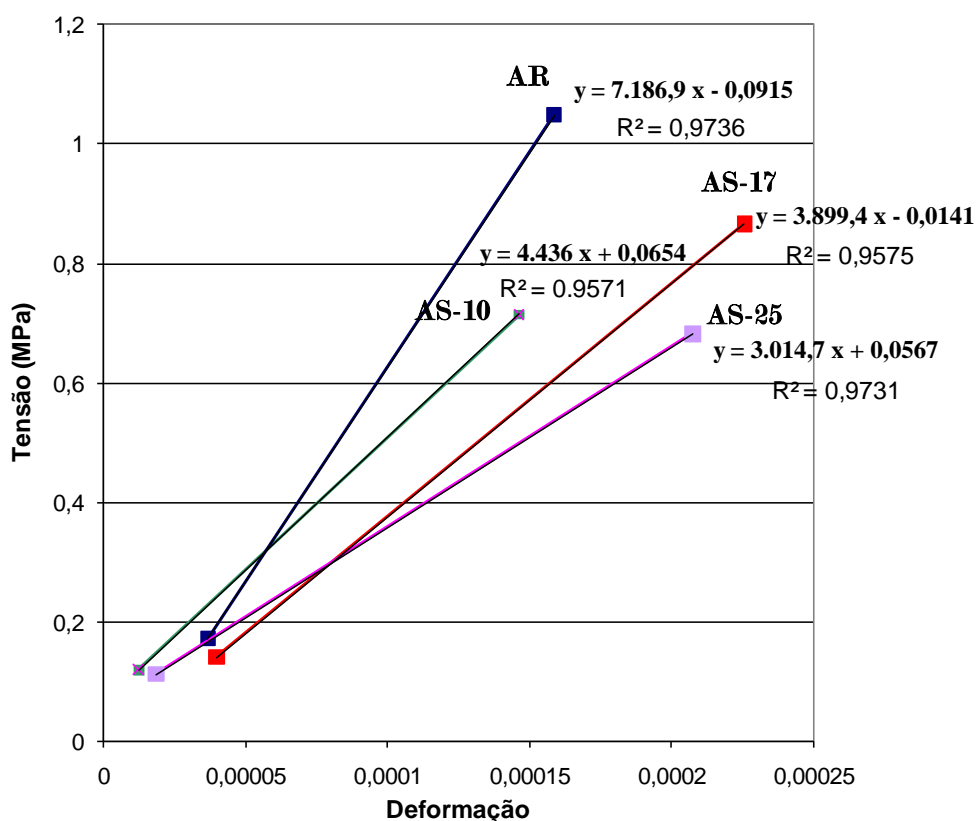


Figura 71 – Módulo de deformação à compressão das argamassas

Os agregados de PEADr, com baixo módulo de deformação, absorvem as tensões geradas pelo carregamento causando deformações consideráveis na vizinhança das

microfissuras, as quais são consideradas como estáveis até o limite de 30% da carga de ruptura. Este efeito torna-se cumulativo, pois a deformação verificada no ensaio é o somatório das microdeformações de cada partícula do agregado de PEADr, e assim, as composições com maior teor de PEADr apresentaram menor módulo de elasticidade pela maior capacidade de deformação sob estado de compressão. A porosidade estimada significativamente maior nos traços com agregados de PEADr em relação ao traço de referência (Tabela 11) é um fator de redução da resistência mecânica e naturalmente do módulo de elasticidade, tendo em vista que o módulo de deformação da pasta de cimento é influenciado também pela sua porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Em termos percentuais a redução do módulo de elasticidade obtido nesse estudo é maior do que aquele verificado em trabalhos anteriores, de acordo com a revisão exposta no capítulo três. Isso se deve ao baixo módulo de deformação do PEAD, o que proporcionou maior deformação volumétrica do compósito em relação aos resultados obtidos anteriormente.

4.3.7 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A figura 72 mostra o gráfico da absorção de água por capilaridade em g/dm^2 em função da raiz do tempo em minutos das amostras de argamassa desse estudo. A inclinação da reta interpolada entre os pontos do ensaio forneceu o coeficiente de capilaridade das amostras constante na Tabela 17.

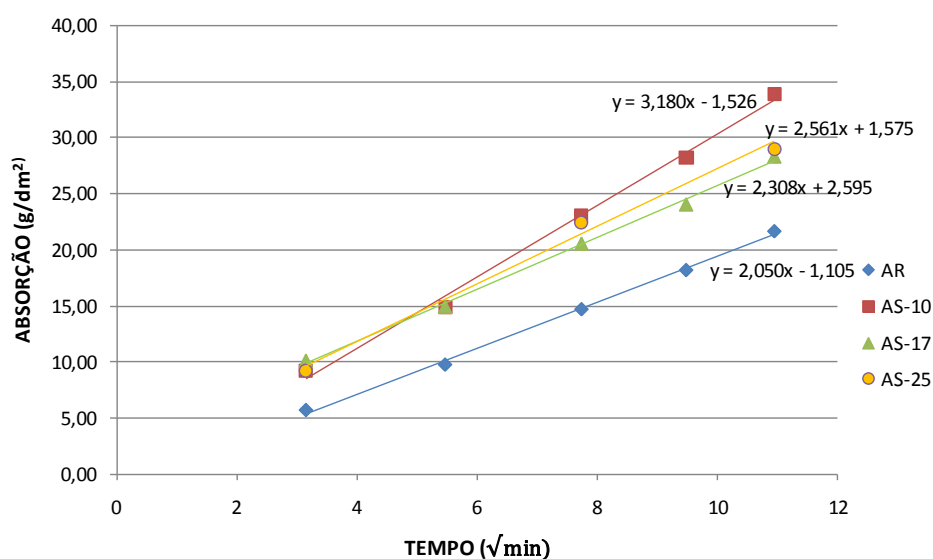


Figura 72 – Absorção capilar em função do tempo

Tabela 17 – Coeficiente de capilaridade

Argamassas	Coeficiente de capilaridade (g/dm²/min^{1/2})
AR	2,05
AS-10	3,18
AS-17	2,30
AS-25	2,56

As argamassas com agregados de PEADr apresentaram maior coeficiente de absorção por capilaridade, o que significa que a porosidade aberta desses compósitos é maior do que a de referência. Assim como na avaliação da resistência mecânica, o aumento do coeficiente de capilaridade verificado na AS-10, AS-17 e AS-25 está também relacionado com teor de sólidos hidratados e com a porosidade avaliados na Tabela 11. Essa correlação baseia-se no fato de que os produtos hidratados de cimento podem segmentar os poros capilares de modo a torná-los inacessíveis para o efeito de sucção capilar. Assim, o maior teor de sólidos hidratados em conjunto com o menor teor de poros da AS-17 contribuiu para a redução do coeficiente de absorção capilar, conforme os resultados da Tabela 17. Por sua vez, a AS-10, com o menor teor de sólidos hidratados, embora estimando-se teor de poros praticamente o mesmo da AS-17, apresentou o maior percentual de poros abertos e do respectivo coeficiente de capilaridade. O aumento médio de 3% em volume do teor de poros promovido pelo ar incorporado/aprisionado nas argamassas com PEADr em relação à referência contribuiu para o aumento da absorção por capilaridade. Em suma, a estimativa para o teor de poros e de sólidos hidratados convergem para os resultados obtidos da absorção por capilaridade.

4.3.8 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados do ensaio de aderência à tração são mostrados na Tabela 18 e na figura 73.

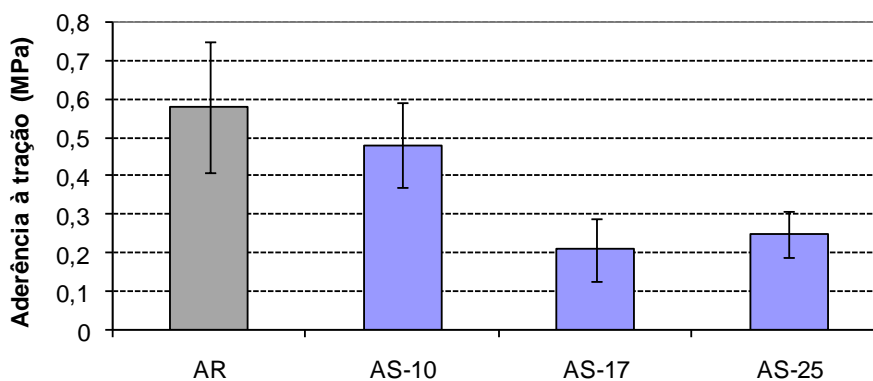


Figura 73 – Resistência de aderência à tração

Tabela 18 – Resistência de aderência à tração

Argamassas	Resistência de aderência à tração (MPa)	S (MPa)	CV (%)
AR	0,58	0,17	29
AS-10	0,48	0,11	23
AS-17	0,21	0,08	35
AS-25	0,25	0,06	26

Legenda: S = desvio padrão

CV = Coeficiente de variação

A partir dos resultados obtidos verifica-se que as argamassas AR e AS-10 atendem aos requisitos com relação à resistência de aderência à tração para revestimento de parede interno e externo, de acordo com a NBR 13749/1996. Sob o mesmo requisito, as argamassas AS-17 e AS-25 apresentaram compatibilidade para revestimento de parede interna com acabamento de pintura ou base para reboco.

Os resultados mostram que ocorreu redução no valor médio da resistência de aderência à tração nos revestimentos de argamassa com agregados de PEADr. Essa redução pode ser atribuída à redução da trabalhabilidade da argamassa com agregados de PEADr, uma vez o aumento do teor dessas partículas reduziu o índice de consistência e a retenção

de água da argamassa, como mostra as figuras 57 e 58. Dessa forma, a extensão de contato da argamassa com o substrato foi menor, reduzindo a resistência de aderência.

A forma de ruptura indicada no quadro 21 mostra que a resistência de aderência dos traços estudados foi aquele obtido no ensaio, tendo em vista que a ruptura ocorreu em sua maior parte na interface argamassa/chapisco.

Quadro 21 – Forma de ruptura no ensaio de aderência à tração

Argamassa	Forma de ruptura			
	Chapisco/ substrato	Argamassa / chapisco	Argamassa	Superfície
AR	32%	68%		
AS-10	14%	57%	28%	
AS-17		50%	25%	25%
AS-25	34%	58%	8%	

4.3.9 – DENSIDADE APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

A figura 74 mostra o resultado da determinação da densidade aparente da argamassa no estado endurecido.

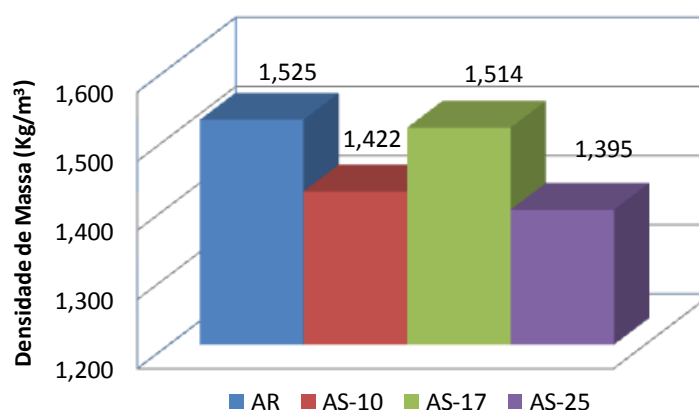


Figura 74 – Densidade de massa no estado endurecido

A substituição gradativa da areia por agregados de PEADr reduziu a densidade da argamassa endurecida. Esse resultado já era esperado em função das diferenças de massa específicas entre os agregados, o que acarretaria em redução da densidade da argamassa endurecida de forma gradual com o aumento do teor de PEADr, porém a amostra AS-17, embora com maior teor de agregados plásticos do que a AS-10, apresentou maior densidade. Esse resultado pode ser atribuído ao menor volume da mistura para a amostra AS-17, que, dessa forma, proporcionou maior concentração de sólidos hidratados, acarretando em aumento da densidade. Na amostra AS-25, contendo o maior percentual de agregados plásticos e também com maior estimativa de teor de poros, apresentou a menor densidade no estado endurecido entre as amostras de argamassa estudadas.

5 – CONCLUSÕES

Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas da argamassa utilizando partículas de PEAD reciclado como alternativa aos agregados naturais. A partir dos resultados obtidos no estudo experimental, enumeram-se as seguintes conclusões:

1 – Os agregados de PEAD obtidos da reciclagem mecânica de plásticos e triturados por micronização apresentaram características semelhantes às da areia com relação à uniformidade e finura. Todavia, diferenças foram identificadas na densidade de empacotamento, forma das partículas e massa específica. As partículas de PEADr em geral apresentaram forma irregular e com menor massa específica em relação à areia utilizada. As características físicas dos agregados de PEADr determinaram um menor grau de empacotamento, e, por conseguinte, maior volume de vazios. A análise térmica demonstra que os agregados de PEADr são isentos de contaminantes por outras resinas poliméricas e são constituídos 97,44% de PEAD.

2 – Com o método de dosagem utilizado nesse trabalho, o aumento do teor de agregados de PEADr nos traços da argamassa ocasionou a redução da trabalhabilidade, sendo verificados exsudação excessiva, segregação das partículas e redução do índice de consistência a partir de 50% em volume de PEADr nos agregados dos traços experimentais estudados. Diante disso, é recomendável a redução da relação água/cimento da argamassa quando o percentual de partículas de polietileno de alta densidade for superior a 50%.

3 – O aumento do teor de agregados PEADr nos traços de argamassa estudados promoveu uma ligeira redução do índice de consistência. Verificou-se um aumento do teor de ar incorporado/aprisionado nas argamassas com agregados de PEADr, efeito atribuído ao maior volume de vazios dessas partículas. A dispersão das partículas de cimento promovida pela ação do aditivo superplastificante não favorece o aprisionamento de líquido na argamassa. Em consequência, o teor de retenção de água das misturas estudadas foi menor do que o teor especificado pelo método de dosagem. Os traços com agregados de PEADr apresentaram redução da retenção de água, pela redução do teor de finos e aumento do teor de ar incorporado/aprisionado nestas misturas.

4 – A utilização de agregados de PEADr reduziu a resistência mecânica da argamassa, no caso, a resistência à compressão e à tração na flexão. Entretanto a redução observada não foi gradativa com o aumento da quantidade de agregados de plástico reciclado como observado em estudos anteriores. A variação da porosidade da argamassa endurecida, estimada em cerca de 40% nos traços desse estudo, e do teor de sólidos da pasta hidratada pode ter contribuído para a não linearidade observada, onde a amostra com 17% de PEADr apresentou o menor percentual de redução de resistência à compressão, com 12%. A substituição de 17% e 25% da areia por agregados de PEADr proporcionou um incremento da ductilidade da ordem de 50% e 90%, respectivamente. Porém, com 10% de substituição não verificado incremento da ductilidade. Por sua vez, o módulo de elasticidade da argamassa apresentou redução de 58% em relação à amostra de referência quando a 25% da areia foi substituída por PEADr. O aumento verificado no deslocamento à flexão da argamassa com agregados de PEADr não compensou a perda de resistência mecânica, de modo que não foi verificado aumento da capacidade de absorção de energia, e conseqüentemente da tenacidade.

A absorção de água por capilaridade foi maior nos traços de argamassa com PEADr, devido à diferença verificada no teor de ar incorporado/aprisionado nesses traços em relação à argamassa de referência, o que contribuiu para aumentar o teor de macroporos da pasta de cimento, e, por conseqüência, da capacidade de absorção. De forma coerente com os valores estimados para o teor de poros e sólidos hidratados das argamassas, a amostra com 17% de PEADr apresentou o menor coeficiente de capilaridade em relação à que continha 10% e 25% desses agregados.

A substituição da areia por partículas de PEADr reduziu a resistência de aderência à tração ao substrato, onde apenas o traço com 10% de substituição atende integralmente os requisitos da NBR 13749/1996. A redução da trabalhabilidade e, conseqüentemente, da extensão de contato entre a argamassa e o substrato, pode ter contribuído para esse efeito. A maioria dos corpos de prova apresentaram ruptura na interface argamassa/chapisco.

5.1 – CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Os resultados desse trabalho mostram que a utilização de resíduos de polietileno de alta densidade como agregado em argamassa conduz a um substancial aumento da ductilidade e redução do módulo de elasticidade à compressão, tornando-os interessante em aplicações específicas na construção civil como argamassa de encunhamento ou argamassa de contrapiso. Isto configura uma alternativa para destinação de todo excedente não reciclado de produtos pós-consumo de PEAD, o que reduz o passivo ambiental pela disposição inadequada desses resíduos ao passo que reduz a extração de matérias-primas.

A observação da granulometria e do grau de empacotamento da mistura de agregados provenientes de resíduos poliméricos com agregados naturais é conveniente no sentido de que, misturas de agregados com maior densidade de empacotamento poderão acarretar em um menor potencial para aprisionamento de ar e maior consumo unitário de cimento, podendo reduzir, dessa forma, as diferenças entre as propriedades físicas e mecânicas entre os compósitos convencionais e com agregados leves poliméricos.

O método utilizado para a estimativa percentual da porosidade e dos materiais constituintes da argamassa mostrou-se conveniente para previsão das propriedades que definem o seu comportamento.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o caráter dessa pesquisa, a qual caracterizou as propriedades básicas da argamassa utilizando alternativamente agregados de PEAD reciclado, sugere-se, para o desenvolvimento dessa área do conhecimento, a realização de estudos abordando os seguintes aspectos:

- Caracterização da permeabilidade e da conectividade dos poros do compósito com agregado de PEADr,.
- A aplicação em argamassa com menor relação água/cimento e/ou maior relação cimento/agregado, como em argamassa de contra-piso ou para concreto
- O uso da cal ou de aditivos minerais, objetivando a redução do fator água/cimento com manutenção da trabalhabilidade e aumento do desempenho mecânico
- Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do compósito com PEADr sob o efeito da temperatura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro/RJ, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

_____. **NBR 7215**: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro/RJ, 1991.

_____. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro/RJ, 1987.

_____. **NBR 7217**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 1987.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

_____. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro/RJ, 1977.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro/RJ, 1995.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – **Requisitos.** Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro/RJ, 1996.

_____. **NBR 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro/RJ, 2005

_____. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; HERNANDEZ, M.; MATHEUS, A.; GUTIERREZ, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management**, v. 29, 2009.

ALCÂNTARA, R.L.; CARVALHO, L.H.; RAMOS, S.M.L.S. Propriedades mecânicas de resíduos plásticos urbanos da região nordeste. Influência das condições de processamento. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, v.5, n.3, p.42-47, 1995.

AKCAOZOGLU, S.; ATIS, C.D.; AKCAOZOGLU, K. Na investigation on the use of shredded waste PET bootles as aggregate in lightweight concrete. **Waste Management**, v. 30, 2010

ARAÚJO JR, J.M. **Contribuição ao estudo das propriedades físico-mecânicas das argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 175p. 2004.

AZEVEDO, G.O.D. **Por menos lixo: A minimização dos resíduos sólidos na cidade de Salvador/Bahia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 163 f. 2004.

BARBOSA, N.P. **Considerações sobre materiais de construção convencionais e não convencionais**. Departamento de Tecnologia da Construção Civil. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. UFPB. João Pessoa. 2005

BASF – Glenium 51. Disponível em: < <http://www.basf.com.br/PT/produtos/aditivos/GLENIUM51/Pages/default.aspx> > Acessado em Fev/2010

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**, v. 27, 2007.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. Editora LTC. 5ª ed. Rio de Janeiro, 2001.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades. Brasília: **LEM-UnB**. Sinduscon-DF, 2005 p7-49.

BRASKEM, Brasil. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/site/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/folha_dados/folha_dados.aspx?id=1&linha=Poliolefinas&familia=PE%20Polietileno>

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. G.C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2007.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**, 5.ed., Rio de Janeiro, LTC: P.529 – 534, 2002.

CAMPITELLI, V.C. Porosidade do concreto. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: EPUSP, 15p. 1987.

CANDIAN, L.M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. 153p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 78p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CANEVAROLO JR. S.V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Artlier-ABPol. 1ª reimpressão. São Carlos, 2004.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.24, n.6, p.1599-1602. 2002.

CARDOSO, R. S.; ADISSI, P. J.; XAVIER, L. H.; XAVIER, V. A. **Ciclo de vida do produto, tecnologia e sustentabilidade: Breve análise da gestão ambiental de resíduos sólidos no Brasil**, In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, 2007.

CARNEIRO, A.M.P.; CINCOTTO, M.A.; JOHN, V.M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características da argamassa. **Ambiente Construído**. São Paulo, v.1, n.2, p.37-44, jul-dez 1997.

CARNEIRO, A.M.P.; CINCOTTO, M.A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: EPUSP, 14p. 1999.

CEMPRE – compromisso empresarial para reciclagem. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>> acessado em abril/2009

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.; Aproveitamento de resíduos na construção. **Coleção Habitare ANTAC**, Porto Alegre, 2003. Vol. 4. p. 72-88.

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Constr Build Mater**, 2009. doi:10.1016/j.conbuildmat. 2009.02.036

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; CHUNG, J.S.; CHO, S.K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and research concrete**, 2004.

COSTA *et al.* Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia eletrônica de varrimento. **Ciência e tecnologia dos materiais**. v.21, n.3/4. 2009.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. de S. Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.13, n.1, p.1-13, 2003

DATAMARK. Dados de Embalagem – Materiais por peso. Disponível em: <http://www.datamark.com.br/NewDatamark/ASP/FS/FS_PK_P.ASP> acessado em março/2010

DE PAOLI, M. A. Degradação e estabilização de polímeros. 2008. Disponível em: <www.chemkeys.com> Acessado em março de 2009

FORLIN, F. J.; FARIA, J. A. F. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, v.12, n.1, p. 1-10. 2002.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bootles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**. v.30. 2010.

GODOY, E. H. P.; BARROS, M. M. S. B. **Diretrizes para produção de contrapisos estanques**. São Paulo: EPUSP, 36p., 2000. Disponível em: <<http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BT268.pdf>> > acessado em abril/2009

GOMES, A.O. Propriedades das argamassas de revestimentos de fachadas. **Comunidades da construção – sistemas à base de cimento**. Salvador-Bahia, 2008. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/comunidades/salvador/ciclo3/htms/download/Propriedades_das_argamassas_de_revestimento_2008.pdf> Acessado em março/2010

GOMES, A.O.; NEVES, C.M.M. Proposta de dosagem de argamassas contendo argilominearias. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.2, n.2, p.19-30, abr-jun 2002.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo do corte do granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 113p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, S.R.C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – Estudo de caso**. 148p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil – Universidade de Brasília. Brasília, 2004

GORNI, A.A.; **Introdução aos plásticos**. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>> Acessado em 15 mar 2010

HANNAWI, K.; BERNARD, S.K.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties os mortars conating PET and PC waste aggregates. **Waste Management**. 2010.

HARTMANN, C.T.; HELENE, P.R.L. Avaliação de aditivos superplastificantes base de policarboxilatos destinados a concretos de cimento portland. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: EPUSP, 22p. 2003.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm> acessado em outubro/2008

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 102 f. 2000.

KOU, S.C.; LEE, G.; POON, C.S.; LAI, W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. **Waste Management**. v.29. 2009.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em agronegócios e meio ambiente**, v.1, n.3, p. 405- 418, 2008.

MACHADO, P.F.M.P.B. **Polimerização via radical livre para polímeros lineares e ramificados usando iniciadores nomo e difuncionais**. 147p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 1991.

MARTINELLI, F.A.; HELENE P.R.L. Usos e funções das argamassas mistas destinadas ao revestimento de alvenarias. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: EPUSP, 11p. 1991.

MARZOUK, O. Y.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. **Waste Management**, 2006, v. 27, p. 310-318.

MEHTA, K.; MONTEIRO, J.M. Concreto: estrutura , propriedades e materiais. 1ª Ed. São Paulo. Editora Pinni, 1994.

MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R.; OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento portland contendo resíduos de PET. **Revista matéria**, v.14, n.1, p. 725-736, 2009.

MONITORAMENTO DOS ÍNDICES DE RECICLAGEM MECÂNICA NO BRASIL (2008). Disponível em: http://www.plastivida.org.br/2009/Reciclagem_IRMP.aspx

NAIK, T. R.; SINGH, S.S.; HUBER, C. O.; BRODERSEN, B. S. Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. **Cement and concrete research**, 1996. v. 26, n° 10, p. 1489 – 1492.

NASH, W.A. Resistencia dos materiais. Rio de Janeiro. Livros técnicos. 1974.

NEVILLE, A.N. Propriedades do concreto. 2ª Ed. São Paulo. Editora Pinni. 1997.

OHAMA, Y. **Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Properties and process technology**. Noyes publications. 236p. 1995

PARENTE, R. A. **Elementos estruturais de plástico reciclado**. 142 f. Dissertação (mestrado). Engenharia estruturas – SET/EESC/USP, São Carlos – SP, 2006.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. Plásticos: Características, usos, produção e impactos ambientais. Maceió. Edufal, 2005.

PRÓS E CONTRAS DE RECICLAR PLÁSTICOS. Disponível em: <http://www.plastico.com.br/revista/pm323/plastivida.htm>

QUARCIONI, V.A; CHOTOLI, F.F.; ÂNGULO, S.C.; GUILGE, M.S.; CAVANI, G.R; CASTRO, A.L.; CINCOTTO, M.A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.9, n.4, p.175-187, out-dez 2009.

RECICLAGEM DE PLÁSTICOS (2005). Disponível em: <http://www.setorreciclagem.com.br/modules.php?name=News&file=print&sid=326> acessado em junho/2008.

RESINAS POLIÉSTER. Disponível em <<http://www.induspol.com.br/resina.htm>>

RIBEIRO, M. V. **Procedimentos para avaliação da degradação de reservatórios de polietileno para água potável expostos à intempéries**. 173p. Dissertação (mestrado). EPUSP – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve estrutural: Influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.9, n.4, p.119-127, out-dez 2009.

SANTOS, F.I.G. **Avaliação das propriedades hidrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas**. 154p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

SANTOS, A.S.F.; AGNELLI, J.A.M ; MANRICH, R. Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, v.14, n.5, p.307-312, 2004;

SCARTEZINI, 2002 *et al*. Influencia do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos em argamassa. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.2, n.2, p.85-92, abr-jun 2002.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: A review. **Waste Management**, 2007, doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011

SILVA, V.S.S. **Aderência de chapiscos de concretos – melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz**. 229p. Tese (Doutorado). Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais - EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SPINACE, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia de reciclagem de polímeros**. Quim. Nova, São Paulo, v.28, n.1, 2005.

TORRES, A. A. U. **Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo**. 180f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Interfacial interactions in lightweight aggregates concretes and their influence on the concrete strength. **Cement and concrete composites (18)**. p. 67-76, 1996.

ZAINAB, I. Z. ; AL-HASHMI, E.A., Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, **Waste Management**, 2007, doi:10.1016/j.wasman.2007.08.023

ANEXO 1

Este anexo apresenta o memorial de cálculo dos volumes percentuais dos materiais constituintes dos traços de argamassa e da estimativa de suas porosidades.

ANEXO 1A - Traços das argamassas em volume

Variáveis de saída:

- Traço unitário em peso

Argamassa	Cimento	Areia	PEADr	ÁGUA	ADITIVO
AR	1	6		1,15	0,0024
AS-10	1	5,4	0,13	1,15	0,0024
AS-17	1	4,8	0,22	1,15	0,0024
AS-25	1	4,5	0,32	1,15	0,0024

- Massas específicas

$$\text{Cimento} = 3,19 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Aditivo superplastificante} = 1,10 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Areia} = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{PEADr} = 0,967 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Água} = 1,00 \text{ g/cm}^3$$

Traços em volume:

AR

$$\text{Cimento} = \frac{1}{3,19} = 0,3135$$

$$\text{Areia} = \frac{6}{2,63} = 2,2814$$

$$\text{Água} = \frac{1,15}{1,00} = 1,15$$

$$\text{Aditivo} = \frac{0,0024}{1,10} = 0,002$$

AS-10

$$\text{Cimento} = \frac{1}{3,19} = 0,3135$$

$$\text{Areia} = \frac{5,4}{2,63} = 2,0532$$

$$\text{PEADr} = \frac{0,13}{0,967} = 0,1344$$

$$\text{Água} = \frac{1,15}{1,00} = 1,15$$

$$\text{Aditivo} = \frac{0,0024}{1,10} = 0,002$$

AS-17

$$\text{Cimento} = \frac{1}{3,19} = 0,3135$$

$$\text{Areia} = \frac{4,8}{2,63} = 1,8521$$

$$\text{PEADr} = \frac{0,22}{0,967} = 0,2275$$

$$\text{Água} = \frac{1,15}{1,00} = 1,15$$

$$\text{Aditivo} = \frac{0,0024}{1,10} = 0,002$$

AS-25

$$\text{Cimento} = \frac{1}{3,19} = 0,3135$$

$$\text{Areia} = \frac{4,5}{2,63} = 1,7110$$

$$\text{PEADr} = \frac{0,32}{0,967} = 0,3309$$

$$\text{Água} = \frac{1,15}{1,00} = 1,15$$

$$\text{Aditivo} = \frac{0,0024}{1,10} = 0,002$$

ANEXO 1B - Volumes totais das misturas frescas

$$\text{Volume total dos materiais} = V_{\text{cimento}} + V_{\text{areia}} + V_{\text{PEADr}} + V_{\text{água}} + V_{\text{aditivo}}$$

$$\text{Volume total com ar incorporado} = \frac{\text{Volume total dos materiais}}{1 - \text{teor de ar (\%)}}$$

AR

$$\text{Volume total dos materiais} = 0,3135 + 2,2814 + 1,15 + 0,0022 = 3,7470$$

$$\text{Volume total com ar incorporado} = \frac{3,7470}{1-0,19} = 4,6260$$

AS-10

$$\text{Volume total dos materiais} = 0,3135 + 2,0532 + 0,1344 + 1,15 + 0,0022 = 3,6533$$

$$\text{Volume total com ar incorporado} = \frac{3,6533}{1-0,22} = 4,6838$$

AS-17

$$\text{Volume total dos materiais} = 0,3135 + 1,8251 + 0,2275 + 1,15 + 0,0022 = 3,5183$$

$$\text{Volume total com ar incorporado} = \frac{3,5183}{1-0,21} = 4,4535$$

AS-25

$$\text{Volume total dos materiais} = 0,3135 + 1,7110 + 0,3309 + 1,15 + 0,0022 = 3,5076$$

$$\text{Volume total com ar incorporado} = \frac{3,5076}{1-0,22} = 4,4969$$

ANEXO 1C – Volumes percentuais dos componentes da argamassa no estado endurecido.

$$\text{Água não evaporável} = \text{água combinada} + \text{água do gel} = 0,23 + 0,1886 = 0,4186$$

$$\text{Água evaporável} = \text{água total} - \text{água não evaporável} = 1,15 - 0,4186 = 0,7314$$

$$\text{Porosidade (\%)} = (\%) \text{ água evaporável} + (\%) \text{ ar incorporado/aprisionado}$$

AR

$$\begin{array}{l} \text{Cimento} \\ \frac{0,3135}{4,6260} = 6,78\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Areia} \\ \frac{2,2814}{4,6260} = 49,3\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Aditivo} \\ \frac{0,0022}{4,6260} = 0,05\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Água não evaporável} \\ \frac{0,4186}{4,6260} = 9,05\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Sólidos hidratados} \\ \frac{0,4851}{4,6260} = 10,49\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Água evaporável} \\ \frac{0,7314}{4,6260} = 15,81\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Porosidade} \\ 15,81\% + 19\% = 34,81\% \end{array}$$

AS-10

$$\begin{array}{l} \text{Cimento} \\ \frac{0,3135}{4,6838} = 6,69\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Areia} \\ \frac{2,0532}{4,6838} = 43,8\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{PEADr} \\ \frac{0,1344}{4,6838} = 2,90\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Aditivo} \\ \frac{0,0022}{4,6838} = 0,05\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Água não evaporável} \\ \frac{0,4186}{4,6838} = 8,94\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Sólidos hidratados} \\ \frac{0,4851}{4,6838} = 10,35\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Água evaporável} \\ \frac{0,7314}{4,6838} = 15,61\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Porosidade} \\ 15,61\% + 22\% = 37,61\% \end{array}$$

AS-17

Cimento
 $\frac{0,3135}{4,4535} = 7,04\%$

Areia
 $\frac{1,8251}{4,4535} = 40,98\%$

PEADr
 $\frac{0,2275}{4,4535} = 5,11\%$

Aditivo
 $\frac{0,0022}{4,4535} = 0,05\%$

Água não evaporável
 $\frac{0,4186}{4,4535} = 9,40\%$

Sólidos hidratados
 $\frac{0,4851}{4,4535} = 10,89\%$

Água evaporável
 $\frac{0,7314}{4,4535} = 16,42\%$

Porosidade
 $16,42\% + 21\% = 37,42\%$

AS-25

Cimento
 $\frac{0,3135}{4,4969} = 6,97\%$

Areia
 $\frac{1,7110}{4,4969} = 38,04\%$

PEADr
 $\frac{0,3309}{4,4969} = 7,36\%$

Aditivo
 $\frac{0,0022}{4,4969} = 0,05\%$

Água não evaporável
 $\frac{0,4186}{4,4969} = 9,31\%$

Sólidos hidratados
 $\frac{0,4851}{4,4969} = 10,78\%$

Água evaporável
 $\frac{0,7314}{4,4969} = 16,26\%$

Porosidade
 $16,42\% + 22\% = 38,26\%$