



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DO AGREGADO NATURAL POR RESÍDUOS DE EVA – INFLUÊNCIA
EM PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS, MICROESTRUTURAIS
E DE DURABILIDADE**

Alex Jussileno Viana Bezerra

RECIFE, 2014

ALEX JUSSILENO VIANA BEZERRA

**CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DO AGREGADO NATURAL POR RESÍDUOS DE EVA – INFLUÊNCIA
EM PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS, MICROESTRUTURAIS
E DE DURABILIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Estruturas, orientada pelos professores Arnaldo Manoel Pereira Carneiro e Aluísio Braz de Melo.

RECIFE, 2014

B574c

Bezerra, Alex Jussileno Viana.

Concretos com substituição parcial do agregado natural por resíduos de EVA – influência em propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade. / Alex Jussileno Viana Bezerra. - Recife: O Autor, 2014.

269 folhas, il., foto., color., gráfs. e tabs.

Orientador: Prof^o. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Co-orientador: Prof.^o Dr. Aluizio Braz de Melo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2014.

Inclui Referências, lista de tabelas, figuras, quadros e apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Resíduo. 3. EVA. 4. Concreto. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (orientador). II. Melo, Aluizio Braz de. III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2014-280



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da defesa da Tese de Doutorado intitulada

**CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO NATURAL
POR RESÍDUOS DE EVA – INFLUÊNCIA EM PROPRIEDADES FÍSICAS,
MECÂNICAS, MICROESTRUTURAIS E DE DURABILIDADE**

defendida por

Alex Jussileno Viana Bezerra

Considera o candidato APROVADO

Recife, 28 de fevereiro de 2014

Orientadores:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Aluizio Braz de Melo – UFPB
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Holmer Savastano Junior – USP
(examinador externo)

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira– IFPB
(examinador externo)

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto – UFPE
(examinador interno)

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro – UFPE
(examinador interno)

DEDICATÓRIA

A Deus,
à minha mãe Vianita,
à minha esposa Marta Viana, às filhas Ana Júlia e Maria Vitória, e a todos os
meus irmãos: Jussara, Jussano, Jussênia, Jussiano, Jussélio e Jusselmo.

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, pela sua presença ininterrupta e decisiva em todas as atividades desenvolvidas;

ao Espírito Santo, pela iluminação e pelo dom da sabedoria;

aos orientadores, Professor Arnaldo Carneiro e Professor Aluísio Braz, pelos ensinamentos transmitidos, pela confiança e pela amizade que foram fundamentais à conclusão deste trabalho;

ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE pela liberação de minhas atividades docentes para a realização do Doutorado. Agradeço ao então reitor, Prof. Claudio Ricardo, ao atual reitor, Prof. Virgílio Araripe, e aos diretores do Campus de Juazeiro do Norte, professores Wilson Cordeiro e Antônio Adhemar;

ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, pela acolhida e oportunidade de realização deste curso. Agradeço especialmente ao Prof. Jaime Cabral, ao Prof. Paulo Régis, a Andrea Negromonte e Claudiana;

à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo financiamento da bolsa de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa;

ao Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE, local onde foram realizados alguns ensaios. Agradeço aos pesquisadores e técnicos de laboratório, Wilson Souza, Edwin Milet, Francisco Rangel e Gian Duarte. Agradeço também pelo apoio recebido das funcionárias Josy e Juliete Queiroz;

ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, por permitir realizar os ensaios com cloretos; especial agradecimento ao professor Gibson Meira e à laboratorista Munique Lima e a todo apoio dado pela professora Valdith Lopes;

a TECOMAT, pela realização dos ensaios do módulo estático de elasticidade à compressão;

ao Departamento de Física da UFPE, por permitir a realização de ensaios em seus laboratórios; agradeço especialmente aos técnicos Sérgio Santos e Tarcyla Gomes;

ao departamento de Engenharia de Minas da UFPE, local em que realizei muitos ensaios, agradeço aos amigos Maurílio, Marcelo Khan e Jacyara Vieira;

ao departamento de Engenharia Química da UFPE, por permitir a realização dos ensaios de termogravimetria, agradeço especialmente ao Prof. José Geraldo;

aos professores do Doutorado, pelo ensinamento ministrado, em especial, à disponibilidade do Prof. Antonio Acácio, que colaborou sempre quando recorri a ele;

ao Prof. Gorki Mariano, sempre muito acessível e grande colaborador na obtenção de algumas imagens das amostras;

ao Prof. Jefferson Queiroz e ao Ricardo Fonseca, pelos ensinamentos de Química;

aos técnicos do departamento de estruturas, os amigos Ezequiel Siqueira e João Cazusa, e aos bolsistas Leandro Luz e João Sobral, pela seriedade e compromisso a esta pesquisa;

à Profa. Angélica, uma pessoa muito especial e muito prestativa nas ajudas em meus estudos;

à Profa. Auxiliadora, pela realização da revisão ortográfica do texto;

agradecimentos especiais aos amigos de estudo no curso, pela amizade e carinho em todos os momentos vividos e sonhados, agradecendo em especial pela luz da iluminada Elaine; pela alegria da minha irmãzinha Juliana; pelo equilíbrio de Cláudia; pela sabedoria de Aline; pelo entusiasmo da paulista recifense Marília; pela fraternidade de Fuad; pela força de Marcondes; pela centralidade de Jaime; pelas sábias filosóficas de Mauro. A todos vocês, eternos amigos, sempre e sempre obrigado;

aos amigos professores e alunos do IFCE Campus Juazeiro do Norte, especialmente os que fazem parte da coordenação de construção civil, em destaque ao amigo Paulo Filho;

às tias-mães, Doutinha e Bibi, sempre a me proteger com suas bênçãos (*in memorian*);

enfim, aos meus familiares, que, mesmo à distância, sempre transmitiram sentimentos de união fraterna. À minha mãe Vianita, pelas suas orações e incentivo. Ao meu pai José Airton e a todos os meus irmãos que sempre torcem por mim. À minha querida esposa, Marta, por ter escolhido se dedicar totalmente a me apoiar na realização deste trabalho e por sempre acreditar em mim. Às minhas amadas filhas, Ana Júlia e Maria Vitória, por serem minhas fontes de vida.

A todos, muitas graças e bênçãos.

“Coloca no Senhor tua alegria e Ele dará o que pedir teu coração”
(Salmos, 36)

RESUMO

No presente trabalho, fez-se um estudo sobre a substituição parcial do agregado natural por resíduos de EVA (etileno acetato de vinila), avaliando quais as influências em propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e na durabilidade de concretos de consistência plástica. Para tal, foram realizadas três etapas: a dosagem dos concretos EVA, a avaliação das condições de absorção prévia do EVA em água, e as condições da durabilidade dos concretos EVA. Com a concretização dessas etapas, foram propostos dois traços com a mesma proporção entre cimento e agregados, 1: 2,3 (1: m; em volume), sendo um deles substituindo totalmente a brita por EVA, mas ambos mantendo a mesma relação água/cimento (0,49; em massa). Portanto, foram propostas para aplicação em concreto estrutural, limitado a 30 MPa, a dosagem com substituição parcial da brita por EVA, com teor de até 18 % de EVA em relação ao volume total de agregados (miúdo e graúdo); e para aplicação em concreto não estrutural (15 MPa) a dosagem com teor de até 44% de EVA em relação ao volume total de agregados. Quanto à imersão prévia do agregado de EVA em água, concluiu-se que tal procedimento é desnecessário e desaconselhável, devido ter deixado a zona de transição pasta-agregado de EVA mais porosa, se comparada com a amostra sem imersão prévia. Nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, o EVA causa algumas alterações influenciadas pelo teor de EVA incorporado, aliado aos arranjos entre as partículas dos elementos que compõem o compósito. As propriedades mais influenciadas são a perda de resistência mecânica, a redução do módulo estático de elasticidade à compressão e a diminuição da densidade do concreto. Quanto às condições da durabilidade, no que se refere aos ataques por cloretos de sódio, não há influência significativa no comportamento dos concretos com uso de EVA, sem imersão prévia em água, se comparados aos concretos convencionais. Entretanto, ao se utilizar agregados de EVA imersos previamente em água, devido à maior porosidade na zona de transição, existe uma tendência de maior concentração de cloretos no interior da pasta. Em relação a ataques por sulfato de sódio, nos concretos com teores de EVA acima de 44% em volume, em relação ao total de agregados, ocorreu uma tendência de diminuição da resistência à tração. Conclui-se que o uso do resíduo de EVA como agregado leve em concretos de consistência plástica, apresenta-se como uma alternativa viável, limitado a resistência à compressão de até 30MPa e para concretos com baixo módulo de elasticidade, e deve-se ter ressalva com seu uso em condições severas de presença de sulfatos, sendo mais apropriada sua aplicação sem a imersão prévia em água.

Palavras-chave: Resíduo. Agregado de EVA. Concreto.

ABSTRACT

In this work, a study about partial substitution of natural aggregate by EVA (ethylene vinyl acetate) residue was carried out with the objective of evaluating the influence of EVA on physical, mechanical, microstructural and durability properties of concretes of plastic consistency. To achieve these goals, three steps were taken: the EVA concrete mixture; assessment of previous absorptions conditions of EVA in water; the durability conditions of EVA concrete. With the completion of these steps, two mixtures were proposed, both with the same proportion between cement and aggregates, 1: 2.3 (1: m, in volume), one of these mixture with total replacement of gravel by EVA, but both with the same (w/c) ratio (0.49; in mass proportion). Two distinct mixtures were proposed: one mixture for use in structural concrete and limited to 30 MPa with partial replacement of gravel by EVA, containing up to 18% EVA in relation to total volume of aggregates (coarse and fine aggregates); and the other one containing up to 44% EVA in relation to total volume of aggregates, for use in non-structural concrete (15Mpa). As for the previous immersion in water of EVA aggregate, it was concluded that this procedure is unnecessary and inadvisable because the transition zone: cement paste-EVA aggregate turned out to be more porous when compared to the EVA paste without previous immersion. EVA causes some changes in the physical and mechanical properties of concrete influenced by the content of incorporated EVA, together with the arrangements between the particles of the elements that make up the composite. Thus, loss of strength, decrease of static modulus of elasticity in compression of hardened concrete and decrease of density of concrete are the most affected properties. On terms of durability, there is no significant influence on the behavior of concretes using EVA submitted to sodium chloride attack, without prior immersion on water, when compared to conventional concrete. However, when using EVA aggregates previously immersed in water, there is a trend towards greater concentration of chloride inside the cement paste, due to the higher porosity in the transition zone. There was a trend of decrease of tensile strength, with regards to sodium sulfate attack in concretes with levels of EVA above 44 % in volume in relation to the total aggregates. It follows that the use of residue of EVA as lightweight aggregate in concrete of plastic consistency is a feasible alternative, being limited only to the use of concrete of compressive strength up to 30MPa and to low modulus of elasticity concrete. Care must be taken when using it use in severe conditions in the presence of sulfates, being more suitable its application without the prior immersion in water.

Keywords: Residue. EVA aggregate. Concrete

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de resíduos de EVA da indústria de calçados.....	31
Figura 2.2 – Resíduos de EVA dispostos de forma inadequada, próximo de Porto Alegre.....	33
Figura 2.3 – Célula de aterro para resíduos da indústria calçadista no Rio Grande do Sul.	33
Figura 2.4 – Microscopia do composto de EVA, com ampliação 150x. Variação do tamanho celular entre a pele e o interior da amostra.	34
Figura 2.5 – Evolução da resistência à compressão dos concretos com uso de agregados sem e com a pré-molhagem.	39
Figura 2.6 – Relação Resistência à Compressão e Teores de EVA para concretos com mesmos traços e uso de agregados de EVA com dimensões máximas diferentes (Bezerra, 2002).	45
Figura 2.7 – Relação Resistência à Compressão e Teores de EVA para concretos diferentes e uso de agregados EVA $D_{máx}$ 9,5mm (Garlet, 1998; Bezerra, 2002; Santiago, 2008; Polari Filho, 2008)..	46
Figura 2.8 – Módulo de deformação e teor EVA na mistura, em função do traço de concreto.	49
Figura 2.9 – Desenho esquemático da zona de transição entre o agregado normal e a matriz.	51
Figura 3.1 – Curvas Granulométricas dos agregados naturais.	65
Figura 3.2 – Ensaios de absorção de água nas amostras de EVA, com artifícios que forcem a amostra ficar imersa em água.	67
Figura 3.3 – Amostra de EVA imersa em balão para ensaio de absorção de água.	68
Figura 3.4 – Curva absorção de água do agregado de EVA até estabilização do processo	70
Figura 3.5 – Curva Granulométrica do agregado artificial EVA.	71
Figura 3.6 – Espectro de infravermelho do pó do resíduo de EVA.	73
Figura 3.7 – Difrátograma de Raios-X do resíduo de EVA.	74
Figura 3.8 – Curvas TG/DTG dos agregados de EVA utilizados na Etapa I.	75
Figura 3.9 – Curvas TG/DTG dos agregados de EVA utilizados nas Etapas II e III.	75
Figura 3.10 – Imagem do grão do agregado EVA por meio da lupa.	77
Figura 3.11 – Imagens em MEV do agregado de EVA, obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).	79
Figura 3.12 – Espectros EDS do agregado de EVA.....	80
Figura 4.1 – Desenho esquemático das proporções entre os componentes das misturas, 36 traços.....	89
Figura 4.2 – Detalhe da execução da mistura e da moldagem dos corpos-de-prova.....	90
Figura 4.3 – Curvas Granulométricas resultantes das misturas/proporções entre a areia grossa (areia de rio) e a brita “0”.....	91
Figura 4.4 – Massas unitárias resultantes das misturas/proporções entre a areia grossa (areia de rio) e a brita “0”.....	92
Figura 4.5 – Curvas Granulométricas resultantes das misturas anidras entre areia fina (teor de argamassa de 50%), areia grossa de rio e brita “0”.....	94
Figura 4.6 – Imagens das composições dos agregados para as misturas 70/30; 60/40 e 50/50.	96
Figura 4.7 – Imagens das composições dos agregados para as misturas 40/60; 30/70 e 20/80.	97
Figura 4.8 – Relação entre as massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados e a porcentagem de EVA em relação ao volume total dos agregados (VT(%)).	98
Figura 4.9 – Ensaio de abatimento do tronco de cone para a mistura 40/(60)-EVA40.....	99
Figura 4.10 – Relação entre porcentagem do volume de EVA incorporado e a massa específica seca dos concretos avaliados nos estudos Etapa I.....	101
Figura 4.11 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e percentuais de EVA presentes no volume total de agregados para os concretos avaliados nos estudos - Etapa I.....	104

Figura 4.12 – Relação entre a média dos valores de resistência à compressão aos 28 dias e a massa específica dos concretos avaliados nos estudos - Etapa I.	107
Figura 4.13 – Relação entre Fator de Eficiência aos 28 dias e percentuais de EVA presentes no volume total de agregados para os concretos avaliados - Etapa I.	109
Figura 5.1 – Desenho esquemático da linha imaginária, perpendicular à interface pasta-agregado, com os pontos para obtenção do EDS.....	116
Figura 5.2 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA40:SI.	138
Figura 5.3 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA40:SI.	138
Figura 5.4 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA40:CI.....	139
Figura 5.5 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA40:CI.	139
Figura 5.6 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado de EVA do concreto EVA100:SI.	141
Figura 5.7 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA100:SI.....	141
Figura 5.8 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA100:CI.....	142
Figura 5.9 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA100:CI.	142
Figura 5.10 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA0.....	145
Figura 5.11 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA40:SI.....	145
Figura 5.12 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA40:CI.....	145
Figura 5.13 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA100:SI.....	146
Figura 5.14 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA100:CI.....	146
Figura 5.15 – Comparação entre a intensidade do pico CH (18,1°) das pastas com uso de EVA sem e com imersão prévia em água e da pasta sem EVA.	147
Figura 5.16 – Imagens MEV da pasta de cimento EVA:SI, obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).....	149
Figura 5.17 – Imagens MEV da pasta EVA:CI obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).	150
Figura 5.18 – Imagens da região circunvizinha aos grãos de EVA no interior do concreto, obtidas através de lupa.....	151
Figura 5.19 – Densidades no estado fresco para as misturas EVA:SI e EVA:CI.	152
Figura 5.20 – Teor de EVA e ar incorporado naturalmente para as misturas EVA:SI e EVA:CI.	153
Figura 5.21 – Relação entre os teores de EVA e a absorção de água por imersão dos concretos EVA:SI e EVA:CI.....	153
Figura 5.22 – Relação entre os teores de EVA e a massa específica seca dos concretos EVA:SI e EVA:CI.	154
Figura 5.23 – Resistência à compressão axial ao longo do tempo nos concretos com uso de EVA sem e com imersão prévia em água.....	154
Figura 5.24 – Relação entre os teores de EVA e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos nas condições EVA:SI e EVA:CI.	155
Figura 5.25 – Relação entre os teores de EVA e o módulo de elasticidade à compressão aos 210 dias dos concretos EVA:SI e EVA:CI.....	156
Figura 6.1 – Ensaio de titulação potenciométrica.	161

Figura 6.2 – Corpos-de-prova imersos em solução de sulfato, apoiados em filetes de vidro.	162
Figura 6.3 – Aparelho comparador de comprimento (extensômetro) para leitura das dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.	163
Figura 6.4 – Ensaio de resistência à compressão corpos-de-prova expostos à solução de sulfato.....	165
Figura 6.5 – Ensaio resistência à tração na flexão corpos-de-prova expostos à solução de sulfato....	165
Figura 6.6 – Perfis de cloretos totais no TOPO dos corpos-de-prova para os concretos aos 28 dias de ensaio (ciclo 4).....	175
Figura 6.7 – Perfis de cloretos totais na BASE dos corpos-de-prova para os concretos aos 28 dias de ensaio (ciclo 4).....	175
Figura 6.8 – Perfis de cloretos totais no TOPO dos corpos-de-prova para os concretos aos 112 dias de ensaio (ciclo 16).....	176
Figura 6.9 – Perfis de cloretos totais na BASE dos corpos-de-prova para os concretos aos 112 dias de ensaio (ciclo 16).....	177
Figura 6.10 – Correlação do Teor de Cloretos Totais para cada profundidade analisada.....	178
Figura 6.11 – Variação dimensional percentual dos concretos avaliados, das amostras imersas em solução de sulfato e das amostras sem submeter ao sulfato (amostras brancas) pelo período de 154 dias de ensaio.	179
Figura 6.12 – Exemplos de corpos-de-prova que foram expostos à solução de sulfato de sódio.	180
Figura 6.13 – Variação de massa em gramas dos concretos avaliados, das amostras imersas em solução de sulfato de sódio e das amostras sem submeter ao sulfato (amostras brancas) pelo período de 154 dias de ensaio.	181
Figura 6.14 – Difratoograma de Raios-X das amostras imersas em solução com sulfatos de sódio, para o ciclo 22.....	190
Figura 6.15 – Relação entre as resistências à compressão axial das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, para os ciclos 4, 9 e 22.	193
Figura 6.16 – Relação entre as resistências à tração na flexão das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, para os ciclos 4, 9 e 22.	194

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atribuições das bandas mais representativas do EVA e do resíduo EVA.....	32
Tabela 2.2 – Resistência à compressão e fator de eficiência para os concretos com resíduo de EVA..	44
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos concretos com EVA, em amostras com corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm.....	49
Tabela 3.1 – Características físicas do cimento utilizado.....	62
Tabela 3.2 – Composição química do cimento obtida pelo ensaio de fluorescência de raios-X.....	63
Tabela 3.3 – Propriedades físicas dos agregados naturais utilizados.	65
Tabela 3.4 – Propriedades físicas do agregado de EVA utilizado.....	69
Tabela 3.5 – Valores médios da absorção de água do agregado de EVA, realizado a partir da adaptação da norma para Poliestireno.....	69
Tabela 3.6 – Análise química elementar do agregado de EVA.....	72
Tabela 3.7 – Resultados obtidos da análise termogravimétrica para amostras de EVA Etapas I e II ..	76
Tabela 4.1 – Apresentação das misturas executadas na Etapa I.....	88
Tabela 4.2 – Classificação das proporções entre a areia grossa e a brita “0” conforme coeficiente de uniformidade pela NBR 6502 (ABNT, 1995).....	93
Tabela 4.3 – Classificação das misturas anidras obtidas pela adição da areia fina de Fingir (para teor de argamassa 50%) na composição entre areia grossa de rio e brita “0”, conforme coeficiente de uniformidade pela NBR 6502 (ABNT, 1995).....	95
Tabela 4.4 – Massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados (MU) e porcentagem de EVA em relação ao volume total dos agregados (VT(%)) ..	98
Tabela 4.5 – Valores das massas específicas dos concretos avaliados nos estudos Etapa I.....	100
Tabela 4.6 – Resistência à compressão axial, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos avaliados nos estudos Etapa I.	102
Tabela 4.7 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 70+(30) – Etapa I.....	103
Tabela 4.8 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 60+(40) – Etapa I.....	103
Tabela 4.9 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 50+(50) – Etapa I.....	103
Tabela 4.10 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 40+(60) – Etapa I.....	103
Tabela 4.11 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 30+(70) – Etapa I.....	103
Tabela 4.12 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 20+(80) – Etapa I.....	103
Tabela 4.13 – Fator de eficiência para as idades de 7 e 28 dias para os concretos estudos Etapa I. ...	108
Tabela 4.14 – Apresentação das misturas com melhores desempenhos (maiores resistência com maiores incorporação de agregado EVA) para os concretos avaliados nos estudos - Etapa I (traço 1:3, em massa) definidas conforme Resistência NBR 8953 (ABNT, 2009) e classificação.....	110
Tabela 5.1 – Apresentação das misturas executadas na Etapa II, separadas por SEM ou COM imersão prévia do EVA em água.	113
Tabela 5.2 – Apresentação dos traços da pasta de cimento com EVA para as misturas executadas na Etapa II, separadas por SEM ou COM imersão prévia do EVA em água.....	115
Tabela 5.3 – Propriedades físicas das misturas no estado fresco com relação água/cimento constante= 0,49 - Etapa II.	118

Tabela 5.4 – Análise de variância para densidade do concreto no estado fresco aplicando as variáveis : Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	119
Tabela 5.5 – Teste de Tukey para as médias de interação da densidade do concreto no estado fresco entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	119
Tabela 5.6 – Análise de variância para o ar incorporado naturalmente no concreto aplicando as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	120
Tabela 5.7 – Teste de Tukey para as médias de interação do ar incorporado naturalmente no concreto entre variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores EVA (18% e 44%).	120
Tabela 5.8 – Valores da absorção de água, do índice de vazios e massa específica com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação, para os concretos EVA:SI e EVA:CI.	122
Tabela 5.9 – Análise de variância para a absorção de água por imersão no concreto aplicando as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	122
Tabela 5.10 – Teste de Tukey para médias de interação da absorção de água por imersão no concreto entre variáveis: Tratamento imersão prévia água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	122
Tabela 5.11 – Análise de variância para índice de vazios no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	123
Tabela 5.12 – Teste de Tukey para as médias de interação do índice de vazios no concreto entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	123
Tabela 5.13 – Análise de variância para massa específica seca no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	124
Tabela 5.14 – Teste de Tukey para as médias da massa específica seca no concreto entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	124
Tabela 5.15 – Resistência à compressão axial, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.	125
Tabela 5.16 – Análise de variância para a resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias).	126
Tabela 5.17 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	126
Tabela 5.18 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias).	127
Tabela 5.19 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias).	127
Tabela 5.20 – Fator de eficiência para resistência à compressão, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.	128
Tabela 5.21 – Análise de variância para o Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias).	129
Tabela 5.22 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	129
Tabela 5.23 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis: Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias).	129
Tabela 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.	130
Tabela 5.25 – Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando variáveis: Tratamento imersão prévia água (sem e com) Teores EVA (18% e 44%).	130

Tabela 5.26 – Teste de Tukey para as médias da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias nos concretos, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	131
Tabela 5.27 – Fator de Eficiência para resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos .	131
Tabela 5.28 – Análise de variância do Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	132
Tabela 5.29 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias nos concretos, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	132
Tabela 5.30 – Módulo estático de elasticidade à tração compressão aos 210 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.	133
Tabela 5.31 – Análise de variância do Módulo de Elasticidade aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	134
Tabela 5.32 – Teste de Tukey para as médias Módulo de Elasticidade dos concretos, entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	134
Tabela 5.33 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA40:SI	136
Tabela 5.34 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA40:CI	136
Tabela 5.35 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA100:SI	137
Tabela 5.36 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA100:CI	137
Tabela 6.1 – Resultados das profundidades de transporte de cloretos, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação para os concretos nas datas 28 e 112 dias imersão.	167
Tabela 6.2 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	167
Tabela 6.3 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	168
Tabela 6.4 – Análise de variância para profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	168
Tabela 6.5 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	168
Tabela 6.6 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	169
Tabela 6.7 – Teste de Tukey para as médias das profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	169
Tabela 6.8 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).	170

Tabela 6.9 – Teste de Tukey para a profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).....	170
Tabela 6.10 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA40:SI, variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova e Idade do ensaio (28 e 112 dias). 171	171
Tabela 6.11 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA40:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	171
Tabela 6.12 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	172
Tabela 6.13 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	172
Tabela 6.14 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	172
Tabela 6.15 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	172
Tabela 6.16 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	172
Tabela 6.17 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).	173
Tabela 6.18 – Resultados dos percentuais de cloretos totais (Cl ⁻ em relação à massa de cimento) para os concretos nas datas 28 e 112 dias de imersão.....	174
Tabela 6.19 – Resultados da resistência à compressão axial das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa III.	183
Tabela 6.20 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).	183
Tabela 6.21 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA-0, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...183	183
Tabela 6.22 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 40:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...184	184
Tabela 6.23 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 40:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22)..184	184
Tabela 6.24 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 40:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...184	184
Tabela 6.25 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 40:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22)..184	184
Tabela 6.26 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 100:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...184	184
Tabela 6.27 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 100:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22).....	184

Tabela 6.28 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 100:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	185
Tabela 6.29 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 100:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22). ...	185
Tabela 6.30 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).....	186
Tabela 6.31 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).....	186
Tabela 6.32 – Resultados da tração na flexão das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos	187
Tabela 6.33 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).	187
Tabela 6.34 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA-0, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	187
Tabela 6.35 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 40:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	188
Tabela 6.36 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 40:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22)..	188
Tabela 6.37 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 40:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	188
Tabela 6.38 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 40:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22)..	188
Tabela 6.39 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 100:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	188
Tabela 6.40 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 100:SI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22).....	188
Tabela 6.41 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 100:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22)...	189
Tabela 6.42 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 100:CI, aplicando variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade ensaio (ciclos 4, 9, 22). ...	189
Tabela 6.43 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).....	190
Tabela 6.44 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).....	190

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Efeitos do uso do agregado de EVA nas propriedades do concreto em relação ao concreto convencional (elaborado pelo autor).....	59
Quadro 2.2 – Principais pesquisas realizadas sobre a reciclagem do resíduo de EVA na construção civil (elaborado pelo autor).....	60
Quadro 3.1 – Ensaio de caracterização física do agregado de EVA e as suas respectivas normas.	66
Quadro 3.2 – Etapas da pesquisa.	81
Quadro 4.1 – Traços dos concretos por intervalos de: percentuais de volume de EVA sobre o volume de agregados e resistências à compressão.....	106

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	23
1.1 APRESENTAÇÃO.....	23
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	24
1.3 FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES DO TRABALHO	27
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1 Objetivo Geral	27
1.4.2 Objetivos Específicos	27
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
2.1 INTRODUÇÃO.....	28
2.2 O EVA (ETILENO ACETATO DE VINILA).....	29
2.2.1 Obtenção e aplicação do EVA.....	29
2.2.2 A geração do resíduo de EVA da indústria calçadista.....	31
2.3 O AGREGADO DE EVA	33
2.3.1 Principais Propriedades	34
2.3.2 A absorção de água pelo agregado	37
2.3.3 Principais pesquisas com agregados de EVA.....	40
2.4 MISTURAS CIMENTÍCIAS COM USO DE AGREGADO LEVE	41
2.4.1 No estado fresco	41
2.4.2 No estado endurecido	43
2.4.3 Zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento	51
2.4.4 Durabilidade	54
2.4.4.1 Ataque por cloretos	54
2.4.4.2 Ataque por sulfatos.....	55
2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	58
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
3.1 INTRODUÇÃO.....	61
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	62
3.2.1 Aglomerante	62
3.2.1.1 Análises físicas	62
3.2.1.2 Análises químicas	63
3.2.2 Agregados naturais	64
3.2.2.1 Análises físicas	64
3.2.3 Agregado artificial - EVA	66
3.2.3.1 Análises físicas	66
3.2.3.2 Análises químicas	71
3.2.3.3 Análises da microestrutura.....	72
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	81
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA	82

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO EVA -Etapa I.....	84
4.1 INTRODUÇÃO.....	84
4.2 EXPERIMENTAL	84
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.3.1 Análise das propriedades das misturas anidras.....	91
4.3.1.1 <i>Proporções entre os agregados graúdos naturais</i>	91
4.3.1.2 <i>Proporções ao inserir a areia fina</i>	93
4.3.1.3 <i>Proporções ao inserir o agregado EVA</i>	95
4.3.2 Análise das propriedades dos concretos no estado fresco	99
4.3.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido	100
4.3.3.1 <i>Massa Específica</i>	100
4.3.3.2 <i>Resistência à compressão axial</i>	101
4.3.3.3 <i>Relação resistência à compressão e massa específica</i>	107
4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	109

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ABSORÇÃO PRÉVIA DO EVA EM ÁGUA: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS Etapa II . 111

5.1 INTRODUÇÃO.....	111
5.2 EXPERIMENTAL	111
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
5.3.1 Propriedades dos concretos no estado fresco	118
5.3.2 Propriedades dos concretos no estado endurecido	121
5.3.2.1 <i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i>	121
5.3.2.2 <i>Resistência à compressão</i>	125
5.3.2.3 <i>Fator de Eficiência para a resistência à compressão</i>	128
5.3.2.4 <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	130
5.3.2.5 <i>Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral</i>	131
5.3.2.6 <i>Módulo estático de elasticidade à compressão (E_c)</i>	133
5.3.3 Análises da microestrutura da pasta de cimento com o EVA.....	135
5.3.3.1 <i>Estudo semiquantitativo da zona de transição por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)</i>	135
5.3.3.2 <i>Estudo da pasta por meio das fases identificadas nos difratogramas (DRX)</i>	144
5.3.3.3 <i>Observação por Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	148
5.3.3.4 <i>Observação por Imagens por lupa</i>	151
5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	151

CAPÍTULO 6 – ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE DURABILIDADE DO CONCRETO EVA – ETAPA III 158

6.1 INTRODUÇÃO.....	158
6.2 EXPERIMENTAL	158
6.2.1 Ação acelerada dos cloretos (cloreto de sódio, NaCl).....	159
6.2.2 Ação acelerada dos sulfatos (sulfato de sódio, Na ₂ SO ₄)	162
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	166
6.3.1 Ação dos cloretos	166

6.3.1.1	<i>Medição da profundidade de transporte de cloreto</i>	166
6.3.1.2	<i>Análise do teor de cloretos totais</i>	173
6.3.2	<i>Ação dos sulfatos.....</i>	178
6.3.2.1	<i>Análise da variação dimensional</i>	178
6.3.2.2	<i>Análise da variação de massa</i>	181
6.3.2.3	<i>Análise da variação da resistência à compressão.....</i>	182
6.3.2.4	<i>Análise da variação da resistência à tração na flexão</i>	186
6.3.2.5	<i>Estudo do ataque sulfato por meio das fases identificadas nos difratogramas</i>	190
6.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	192
 CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..		196
7.1	CONCLUSÕES	196
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	200
 REFERÊNCIAS		201
 APÊNDICE.....		210

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Os temas que envolvem as questões ambientais estão cada vez mais presentes no dia a dia da sociedade, dada a necessidade urgente de encontrar soluções que possam reduzir o uso de matérias-primas extraídas da natureza de forma indiscriminada e, ao mesmo tempo, restringir o volume de resíduos que são gerados e simplesmente descartados no meio ambiente. Existem várias pesquisas que abordam esse assunto, inclusive envolvendo especificamente a construção civil, que é um dos setores industriais que mais geram resíduos e um dos maiores consumidores dos materiais naturais. São pesquisas que apontam a construção civil como um setor com grande potencial de aproveitamento de certos tipos de resíduos, haja vista a variedade de materiais que ela utiliza, com características distintas, que podem ser beneficiadas com a incorporação de resíduos.

Dentre os resíduos, o composto de EVA (Etileno Acetato de Vinila), gerado pela indústria calçadista, vem sendo tema de estudo em alguns trabalhos científicos na área da engenharia civil (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005; LYRA, 2007; ROCHA, 2008; LIMA FILHO, 2008, entre outras). São pesquisas que abordam, por meio de estudos de dosagens de concreto de cimento Portland, a possibilidade do uso de agregados leves, obtidos a partir de um simples processo de trituração dos resíduos de EVA. Essas pesquisas estudaram as condições dos novos compostos no estado fresco e no estado endurecido, no que se refere à análise de resistência mecânica e as propriedades afins.

Levando em consideração a variedade de materiais utilizados na construção civil e a perspectiva de incorporação dos resíduos de EVA neste processo, este trabalho aborda o estudo sobre o resíduo de EVA proveniente da indústria calçadista como material alternativo em forma de agregado leve, substituindo parcialmente os agregados naturais na produção de concretos de cimento Portland. Porém, a investigação não é somente sobre as propriedades mecânicas, mas também, principalmente, sobre a situação da durabilidade deste concreto de cimento Portland, contemplando, ainda, uma análise microscópica da interface entre o agregado artificial (EVA) e a pasta de cimento.

Na substituição do agregado natural por agregado de EVA, são avaliadas, por meio das curvas granulométricas, as condições de combinação otimizada das partículas dos agregados que garantam um esqueleto de agregados bem proporcionado.

O trabalho está apresentado da seguinte forma:

I – abordagem da revisão da literatura a partir da sistematização dos compostos de cimento com uso do agregado de EVA (suas propriedades), destacando os indicadores dessas propriedades, como resistência mecânica, porosidade, densidade e outros;

II - realização de um estudo de dosagem, justificado por se tratar de um trabalho experimental que faz uso de um material alternativo, com poucas pesquisas até então realizadas e pelo fato de que a grande maioria das pesquisas existentes tratam de aplicações em concretos secos para uso em blocos de pré-moldados, diferente do que se propõe aqui, que é o uso em concretos de consistência plástica;

III – discussão da interferência na durabilidade dos concretos, no que se refere a ataques por sulfatos e cloretos, tendo como parâmetro o concreto convencional e os indicadores do concreto com EVA.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Segundo dados da ABIPLAST (2012), a produção de produtos transformados plásticos no Brasil, em 2012, foi de 6,66 milhões de toneladas, sendo que 1,0% dessa produção foi destinada à indústria de calçados. Dos cerca de 820 milhões de pares de calçados que foram produzidos anualmente (com consumo per capita de 4,3 pares), a maior parte, ou seja, 433,9 milhões (53%) se destinou principalmente à fabricação de calçados de plástico/borracha (ABICALÇADOS, 2012).

A indústria calçadista utiliza o EVA na produção de chapas reticuladas e expandidas para obtenção dos mais diversos tipos de calçados, como tênis (palmilhas e entressolas), sandálias termoformadas (palmilhas, solados e entressolas), sapatos diversos (solados e enchimento), dentre outros. Esse processo industrial na fabricação dos calçados gera, inevitavelmente, resíduos que são oriundos desde a etapa de fabricação das placas expandidas no momento dos cortes das mantas (placas expandidas) de EVA para a obtenção dos formatos das palmilhas e solados até a etapa de acabamento (BEZERRA, 2002). São gerados resíduos tanto na forma de aparas como na forma de pó.

Estima-se que a fabricação de cada par de sapatos gera 220g de resíduo (MONTAGNOLI, PRESTES e MANCINI, 2010). A maior parte dessas sobras não serve para ser reutilizada na própria indústria, e sua geração cresce proporcionalmente ao crescimento econômico do setor calçadista.

Grande parte do resíduo em forma de pó é reaproveitada pelas indústrias e pode, em alguns casos, servir como carga, voltando ao processo de fabricação das placas. Porém, os do tipo aparas são os de maior volume, e o mecanismo de reaproveitamento no processo industrial não é muito simples, além de necessitar de muito tempo para ser reprocessado.

No final do processo produtivo, a indústria de calçados descarta em torno de 8.000 toneladas/ano de resíduos, considerando somente o resíduo do tipo EVA (ZATTERA *et al.*, 2005). A maior problemática desse tipo de resíduo é que, devido à sua baixa densidade, o volume ocupado é muito grande e, por demorar muito tempo para ser decomposto (às vezes mais de cem anos), fica sempre se acumulando no meio ambiente, quando não é encaminhado para alimentar os fornos de indústria de cimento. Além disso, tais resíduos, quando são incinerados, geram gases tóxicos que podem contaminar o meio ambiente. Assim sendo, as indústrias calçadistas têm enfrentado muitas dificuldades para dar um destino final adequado para seus resíduos (GARLET, 1998).

Para que essa quantidade de resíduo fosse acomodada em aterros de forma correta, seria necessário existir aproximadamente células de aterros com volume entre 37,4 a 65,4 mil m³ por ano (SANTIAGO, 2008), e com o agravante de não poder ser realizada a ciclagem natural de materiais, devido ao longo tempo de degradação. Consequentemente, existe cada vez mais, uma crescente necessidade de áreas ainda maiores e mais distantes de depósitos para acomodar os resíduos (GARLET, 1998).

Por tudo isso, é algo muito complicado ou, até mesmo, pode-se tornar inviável a disposição dos resíduos de EVA em aterros sanitários nas microrregiões que localizam os grandes polos produtores calçadistas, que são, segundo a ABICALÇADOS (2012), o estado do Rio Grande do Sul (Vale do Rio dos Sinos, Vale do Paranhana, Vale do Taquari e Serra Gaúcha), algumas localidades das regiões Sudeste e Nordeste do país, por exemplo, no estado de São Paulo (cidades de Jaú, Franca e Birigui), na Paraíba (Campina Grande, Patos, João Pessoa, Santa Rita, Bayex, Guarabira, Catolé do Rocha e Sousa), no Ceará (Juazeiro do Norte, Crato, Barbalha, Sobral e Fortaleza) e na Bahia (Feira de Santana, Alagoinhas, Cruz das Almas, Itabuna, Vitória da Conquista e Ilhéus), além do estado de Santa Catarina (região de São João Batista) e em Minas Gerais (região de Nova Serrana e Belo Horizonte). Atualmente, o estado brasileiro que mais produz chapas expandidas de EVA é o Ceará, o Cariri cearense (Juazeiro do Norte, Crato, Barbalha) é o terceiro maior polo calçadistas do país.

Garlet (1998) afirma que muitas indústrias calçadistas depositam seus resíduos em áreas a céu aberto e, às vezes, em depósitos clandestinos. Essa ação pode trazer muitos

prejuízos ambientais, como poluição visual, proliferação de insetos e de pequenos animais, além do risco permanente de combustão do material.

Diante disso, ações de reciclagem desse material como um novo material, agregado leve para construção civil, por exemplo, pode apresentar-se como uma das soluções para diminuir o impacto negativo de sua deposição na natureza, provocado principalmente pelo grande volume de resíduos, que é inevitavelmente gerado e descartado.

A aplicação do resíduo de EVA, como agregado leve, é uma prática relativamente recente. A primeira pesquisa acadêmica brasileira que propõe o aproveitamento do resíduo de EVA da indústria calçadista como agregado leve para uso em concretos de cimento Portland foi um estudo no qual foram realizadas dosagens de concreto com análise da resistência mecânica do compósito (GARLET, 1998).

As abordagens da maioria das pesquisas existentes sobre o uso do agregado de EVA em compósitos cimentícios tiveram como objetivo principal o estudo do comportamento mecânico desses produtos, e grande parte desses trabalhos propõe que a aplicação seja para confecção de blocos de vedação. Apesar dos avanços dessas pesquisas, os estudos ainda são incipientes e, por se tratar de um produto alternativo ainda em fase de desenvolvimento, carecem de novas pesquisas que possam avaliar, não somente as propriedades mecânicas, mas também outras características desse elemento.

A presente pesquisa proporciona uma verificação das condições da incorporação do agregado de resíduo de EVA em concretos de cimento Portland de consistência plástica e quais as consequências provocadas nas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade desses compósitos. Assim, esta pesquisa busca responder à seguinte questão:

Qual a influência da incorporação do agregado de resíduo de EVA proveniente da indústria de calçados nos concretos de cimento Portland de consistência plástica nas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade?

Nesse sentido, esta pesquisa busca avançar nos estudos sobre EVA, proporcionando maiores aplicações para o uso do agregado de EVA e com estudos que abranjam outras propriedades do concreto, em especial às condições de sua durabilidade frente a algumas situações de ação dos cloretos e sulfatos.

1.3 FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES DO TRABALHO

As hipóteses a serem verificadas neste trabalho são:

- 1) é viável a dosagem com uso do agregado de resíduo de EVA, substituindo parcialmente os agregados naturais nos concretos de cimento Portland para obtenção de concreto de consistência plástica;
- 2) a utilização do agregado de resíduo de EVA altera propriedades intrínsecas do concreto. Entretanto, até certos limites, não deverá comprometer negativamente a durabilidade desses concretos frente aos ataques por sulfatos e cloretos;
- 3) com a aplicação de um estudo granulométrico, aliando as variações dos teores de EVA aos outros agregados naturais, pode se obter melhores arranjos entre os componentes da mistura que sejam significativos nos resultados das propriedades dos concretos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre a utilização do agregado de resíduo de EVA da indústria de calçados nos concretos de cimento Portland de consistência plástica, sendo avaliadas, além das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, as possíveis influências na degradação desses novos concretos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar as melhores proporções entre o agregado de EVA (teores) e demais materiais da mistura para aplicações estruturais e não estruturais;
- avaliar o efeito da imersão prévia do agregado de EVA em água nas características do concreto produzido, com destaque para a análise microestrutural na interface pasta-agregado de EVA;
- avaliar a durabilidade do concreto de cimento Portland, frente a ataques por agentes químicos, ambientes com a presença de cloretos e sulfatos, em função do teor de agregado de EVA presente na dosagem;
- contribuir nos estudos para uma maior aplicação dos agregados de EVA nos concretos e, conseqüentemente, para uma redução no consumo dos recursos naturais na construção civil.

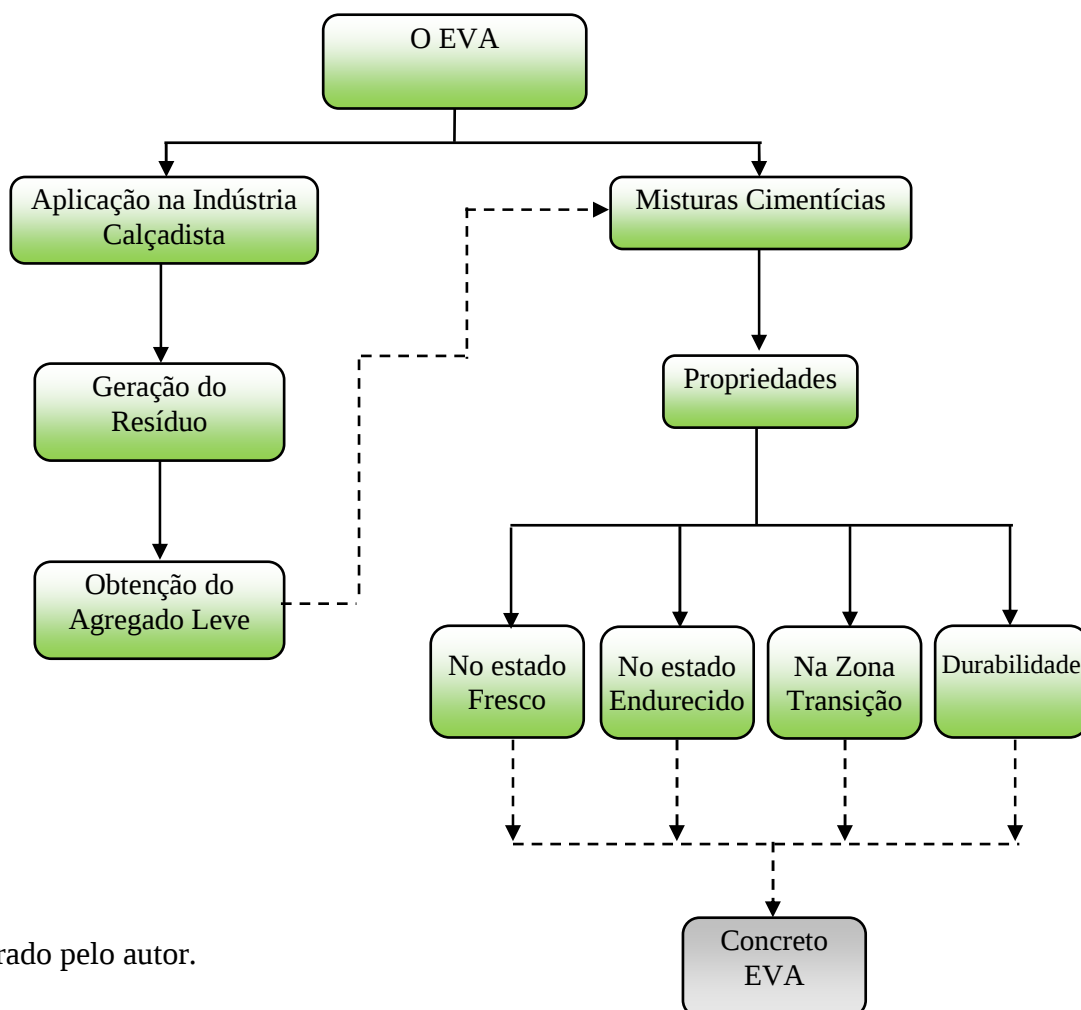
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

O agregado de EVA é um material alternativo, obtido a partir da reciclagem do resíduo da indústria de calçados, que surge pelas sobras das mantas no momento do corte, e refugos dos solados e aparas. A reciclagem apresenta-se como alternativa para as indústrias de calçados, contribuindo para benefícios econômicos e ambientais, ao evitar gastos com deposição e riscos de contaminação ao meio ambiente. Ao mesmo tempo, torna-se algo interessante para a indústria da construção civil, que poderá aproveitar certas características deste polímero e obter um material com propriedades específicas.

Neste capítulo, faz-se um estudo sobre o EVA e como são gerados os resíduos. Com base nas pesquisas existentes, são identificadas as interferências ocorridas nas propriedades dos concretos ao usar esse agregado leve. A estruturação do capítulo está mostrada no Diagrama 2.1.

Diagrama 2.1 - Estrutura do capítulo 2.

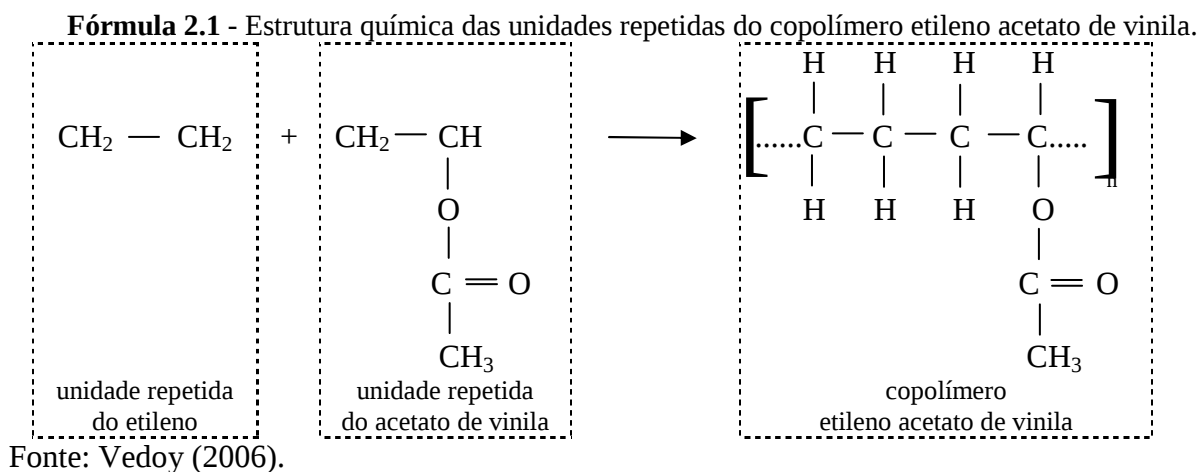


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 O EVA (ETILENO ACETATO DE VINILA)

2.2.1 Obtenção e aplicação do EVA

Os copolímeros¹ poli [(etileno-co-(acetato de vinila)] são termoplásticos obtidos a partir do encadeamento de sequências aleatórias de unidades repetidas derivadas da polimerização² do monômero³ de etileno com o monômero de acetato de vinila, variando desde 18 até 70%, em sistemas de média e alta pressão ou de emulsões. A fórmula química do EVA possui uma cadeia carbônica ligada com o acetato de vinila (Fórmula 2.1), o copolímero tem como unidade estrutural – CH₂ CH (OCOCH₃) – (VEDOY, 2006).



A utilização dos compostos de EVA está crescendo cada vez mais, dada à diversificação e à facilidade na processabilidade do produto, que pode apresentar na forma microcelular flexível ou rígido, dependendo da formulação do composto (HSU *et al.*, 2004).

Sua ampla utilização está relacionada às suas excelentes características, como boa resistência à ação de intempéries, boa tenacidade a baixas temperaturas, flexibilidade e relativo baixo custo.

Dentre as variações que a matriz polimérica de EVA pode apresentar, destacam-se as do tipo resina de EVA, que é intensamente aplicada na indústria calçadista, utilizada na fabricação das placas expandidas, que são cortadas para produzir as palmilhas e solados. Para esse tipo de aplicação industrial, o procedimento de obtenção da manta de EVA ocorre por

¹ Polímero cuja cadeia principal é formada a partir de mais de um tipo de monômero.

² Polimerização é a reação química que dá origem aos polímeros.

³ Monômero é a molécula simples que dá origem ao polímero.

meio da solidificação por uma reação química não reversível por calor. Portanto, são artefatos termofixos (CARDELLO, 2012).

A preparação das placas expandidas de EVA é baseada na tecnologia de fabricação de espumas de borrachas, em que se prepara a massa polimérica junto com os aditivos químicos, processando-os em misturador tipo Banbury e moinhos e, por fim, faz a expansão em prensas (CHÁVEZ, 2007). Os principais componentes utilizados nesse procedimento são:

- a matriz polimérica (resina de EVA): é o principal elemento do composto. Exemplo: copolímero de EVA, com teor de acetato de vinila entre 18% e 28% em massa e produzido a altas pressões (ZATTERA *et al.*, 2005);
- agente de expansão: usam-se substâncias orgânicas ou inorgânicas, que são inseridas ao processo de fabricação das placas, com o objetivo de gerar um produto gasoso com sua decomposição e provocar a expansão do material. Exemplo: azodicarbonamida (fórmula molecular $(H_2N-CO-N=CO-NH_2)$) é o agente mais utilizado; sua atuação ocorre por meio da liberação de gases (nitrogênio e/ou dióxido de carbono) quando submetido à temperatura de 200°C (KLEMPNER e FRISCH, 1997).
- agente de reticulação: é o agente que realiza o processo de interligação química entre as moléculas dos polímeros. O processo ocorre por meio da técnica de cura peroxídica (D'ANGELO, 2003). Exemplo: os peróxidos orgânicos, como o bis-terc-butil isopropil benzeno.
- cargas: podem ser do tipo reforço, destinadas a melhorar propriedades, como tração, deformação e resistência à abrasão ou cargas do tipo enchimento, que servem basicamente para redução de custos. Exemplos: carbonatos de cálcio ($CaCO_3$), a sílica (SiO_2) e vários outros (CTCCA, 2002).
- auxiliares de processo: são adições que auxiliam no processo de produção, por exemplo, para realizar a desmoldagem da placa do molde. Exemplo: estearato de zinco ($C_{36}H_{70}O_4Zn$), um tipo de sal de metal, que possui efeito hidrofóbico, repelente a água (HAISUN, 2012);
- pigmentos: são os que dão cores ao material. Podem ser dos tipos orgânicos ou inorgânicos. Exemplos: óxido de ferro, óxido de titânio e outros (CTCCA, 2002);
- ativadores: utilizados para reduzir o ponto de decomposição do agente expensor para deixar compatível com a temperatura de reticulação do processo, em torno de 170°C. Exemplos: óxido de zinco (ZnO) e estearato de zinco (CTCCA, 2002);

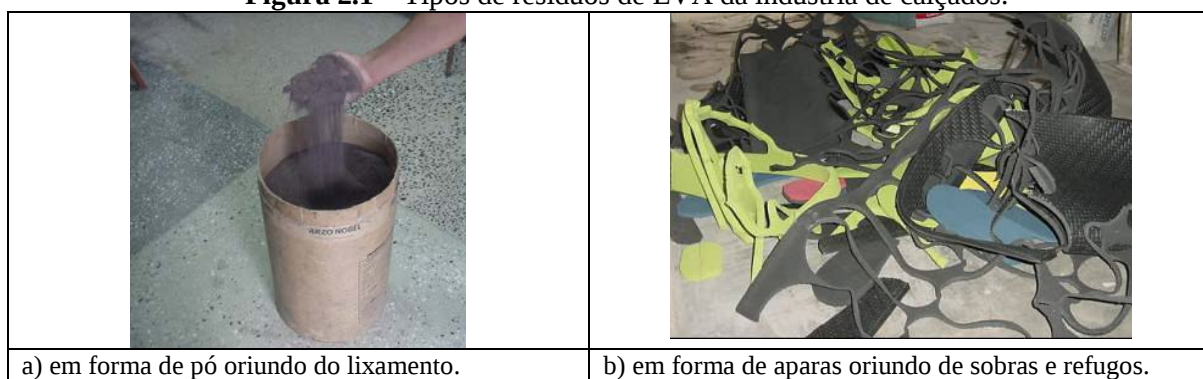
- outros polímeros: são adições que podem ser utilizadas para melhorar algumas propriedades do expandido de EVA. Por exemplo: alguns elastômeros, como a borracha natural, o EPDM (borracha de etileno-propileno-dieno), a borracha nitrílica NBR (copolímero de butadieno e acrilonitrilo), o SBR (borracha de butadieno estireno) e outros.

Pode haver uma variação dos componentes conforme os tipos de produtos e processos produtivos (segredos industriais). Mas, de uma forma geral, os produtos calçadistas que utilizam o EVA como resina principal têm basicamente em sua formulação: o EVA, o carbonato de cálcio, o óxido de zinco, o estearato de zinco, o expensor (o mais usado o azodicarbonamida) e os peróxidos (VEDOY, 2006).

2.2.2 A geração do resíduo de EVA da indústria calçadista

Os resíduos da indústria calçadista são formados basicamente em dois momentos: o primeiro, durante o processo de fabricação das placas expandidas, do qual, após sua expansão, ocorre o surgimento de resíduos em formas de aparas, e, após seu lixamento, há o resíduo em forma de pó; e o segundo acontece durante o processo de fabricação do calçado, no qual os resíduos surgem pelas sobras dos cortes das placas expandidas para a obtenção dos formatos dos calçados ou devido a possíveis refugos de solado, entressola ou palmilha dos calçados, e também em forma de pó, devido ao lixamento nas peças dos formatos dos calçados, na fase de acabamento (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Tipos de resíduos de EVA da indústria de calçados.



Fonte: Bezerra (2002).

A indústria calçadista consegue reaproveitar parte de seus resíduos, principalmente aqueles em forma de pó, que realimentam o processo industrial, (GARLET, 1998). Porém, a maior dificuldade é a presença dos elementos utilizados como carga pelas mantas originais, que limitam seu volume de reciclagem.

Ao comparar os elementos de um EVA virgem com os de uma amostra de composto de resíduo EVA, por meio de uma análise de espectroscopia de infravermelho, pode-se perceber o surgimento de algumas bandas a mais no resíduo, devido à presença do carbonato de cálcio, que é utilizado como carga na sua composição (Tabela 2.1) (ALENCAR, 2009).

Tabela 2.1 – Atribuições das bandas mais representativas do EVA e do resíduo EVA.

Nº de onda (cm ⁻¹) do EVA	Nº de onda (cm ⁻¹) do resíduo EVA	Grupos correspondentes	
		do EVA	do resíduo EVA
-	3200	-	O-H (H ₂ O)
2941	2914	C-H (CH ₂)	C-H (CH ₂)
2854	2845	C-H (CH ₂)	C-H (CH ₂)
1737	1735	C=O	C=O
1438	1438	CH ₂	CH ₂
1465	1415	-	CH ₂
1371	1369	CH ₃	CH ₃
1240	1234	C-O-C	C-O-C
1020	1014	C-O-C	C-O-C
-	871	-	CO ₃ ²⁻
723	723	C-H	-
-	713	-	CO ₃ ²⁻

Fonte: Alencar, 2009.

Na Tabela 2.1, nos grupos correspondentes ao resíduo, apareceram as bandas de calcita, que é um dos polimorfos de carbonato de cálcio (871cm⁻¹ e 713 cm⁻¹ da deformação de CO₃²⁻) e ainda bandas da água (3200 cm⁻¹ do estiramento O-H).

As alterações que ocorrem podem deixar o EVA reciclado com uma formação de reticulação diferente, se comparado ao EVA comercial virgem (STAEL *et al.*, 2005).

Outra dificuldade da reciclagem na indústria calçadista é o volume de resíduo gerado, principalmente pelos resíduos das sobras das placas expandidas que, somado à lentidão do mecanismo de reaproveitamento, gera limites técnicos de reciclagem, comprometedores à qualidade do produto final. O que se consegue reciclar não ultrapassa o valor de 40% do volume gerado (BEZERRA, 2002).

Para o adequado armazenamento, estima-se que seria necessário disponibilizar um volume entre 37,4 a 65,4 mil m³ por ano para construção de células de aterro específicas para resíduos de EVA, de forma permanente, pois, devido ao longo período de degradação, fica impossibilitado se fazer a reciclagem desse material (SANTIAGO, 2008).

Todo esse resíduo tem se tornado um problema para as indústrias geradoras cumprir com a legislação ambiental no momento do descarte, sendo que, na maioria das vezes, os resíduos são dispostos em locais inadequados (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Resíduos de EVA dispostos de forma inadequada, próximo de Porto Alegre.



Fonte: Garlet e Greven (1997).

Na Figura 2.3 é mostrada uma célula apropriada para receber resíduos de EVA.

Figura 2.3 – Célula de aterro para resíduos da indústria calçadista no Rio Grande do Sul.



Fonte: Soares (2007) apud Santiago (2008).

A reciclagem pode ser uma alternativa mais viável. Assim, várias pesquisas surgiram no intuito de transformar esse obstáculo em oportunidade, propondo que este resíduo seja reciclado como “matéria-prima” para a construção civil, aproveitando suas especificidades para obtenção de um agregado leve (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; LEAL, 2004; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005; LYRA, 2007; ROCHA, 2008; LIMA FILHO, 2008; SANTIAGO, 2008; OLIVEIRA, 2009; SAOULA *et al.*, 2009, entre outras).

2.3 O AGREGADO DE EVA

A transformação do resíduo de EVA em agregado trata-se de um processo simples, sendo necessária somente a trituração das sobras das aparas utilizadas pela indústria calçadista para a obtenção do formato e granulometria de um agregado. Para isso, utiliza-se moinho

granulador e controla-se a dimensão do agregado conforme valor da abertura da malha da peneira colocada na saída do equipamento.

A utilização do agregado de EVA nas misturas cimentícias tem seguido os mesmos procedimentos dos agregados tradicionais, sendo adotado por alguns estudos o procedimento de imersão do EVA em água antes de ser utilizado na mistura justificado pela sua elevada absorção (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005).

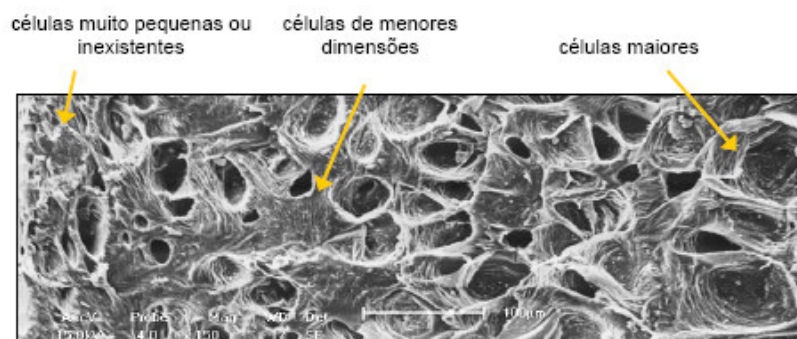
2.3.1 Principais Propriedades

A principal propriedade do agregado de EVA é a baixa densidade, classificada como agregado leve. Há uma variação no valor da massa unitária dos agregados de EVA obtidos nas pesquisas, devido à própria variação das densidades das mantas utilizadas nas indústrias, mas, em média, os agregados possuem massa unitária em torno de 150 kg/m^3 . O agregado de EVA se enquadra na faixa das massas unitárias obtidas pelos agregados mais leves conhecidos, como a perlita ($40\text{--}200 \text{ kg/m}^3$) e a vermiculita ($60\text{--}200 \text{ kg/m}^3$) (NEVILLE, 1997).

O valor da massa unitária do agregado está relacionado com a densidade do composto de EVA que o originou, e essa, por sua vez, vai depender de qual parte do calçado ao qual se destina sua aplicação (se solado, entressola, palmilha), da posição que se encontra (se “pele” externa ou do interior) (CHÁVEZ, 2007), além das variações próprias do processo industrial, conforme a fábrica que originou o resíduo (BEZERRA, 2002).

Com a imagem da Figura 2.4, percebe-se que as células são predominantemente do tipo fechadas e que aumentam de tamanho à medida que se afasta da parte externa (pele).

Figura 2.4 – Microscopia do composto de EVA, com ampliação 150x. Variação do tamanho celular entre a pele e o interior da amostra.



Fonte: Chávez (2007).

A posição do compósito interfere na massa unitária do agregado, sendo maior conforme a quantidade de grãos da amostra que possuam área de “pele” em sua composição, por ser a parte mais densa do compósito.

A pele é a parte do composto de EVA formada junto ao molde, que, durante o processo de expansão por compressão, fica submetida a uma temperatura mais elevada e por mais tempo que o restante do material, e isso faz aumentar o grau de reticulação, inibindo a expansão e, conseqüentemente, deixando-a mais densa (CHÁVEZ, 2007).

Quanto às partes do calçado, as indústrias utilizam densidades variáveis, sendo o material mais denso para o solado (350 kg/m^3), intermediário para a entressola (250 kg/m^3) e densidade baixa para a palmilha (100 kg/m^3) (CHÁVEZ, 2007).

Essa estrutura fechada do polímero, aliada a sua elevada massa molecular relativa e as suas propriedades hidrofóbicas, dificultam a ação enzimática dos micro-organismos na superfície do polímero e deixam os polímeros, de uma forma geral, muito resistentes à degradação no meio ambiente, sendo necessários muitos anos para que ocorra a degradação total do material. Às vezes, mais de cem anos, como é o caso dos plásticos.

O polímero pode sofrer alguma alteração em suas propriedades físicas e químicas, conforme as condições de fabricação e o meio a que está exposto. São mecanismos de degradação que ainda não são totalmente compreendidos, devido à complexidade química desses materiais (CALLISTER, 2007).

O tempo de deterioração está relacionado com o nível de ação por meio das interações ambientais de agressividade, envolvendo principalmente a temperatura, a umidade e absorção, o oxigênio, além de toda a radiação UV da luz solar (JIN *et al.*, 2010).

Ao observar as degradações em copolímero puro de EVA, com base a uma análise combinada dos ensaios de termogravimetria (TG) e a espectrometria por infravermelho (FT-IR), detectou-se a existência de quatro etapas de decomposição: a primeira etapa sucedeu-se devido à perda de grupos acetato, com a formação de ácido acético, CO, CO₂, H₂O e compostos carbonílicos; a segunda e terceira etapas ocorreram bem próximas uma da outra, provocadas pela degradação da cadeia polimérica e envolvem pelo menos dois tipos de processos: reações sem consumo de O₂ e processo com oxidação produzindo CO, CO₂ e H₂O; a quarta etapa foi provocada pelos resíduos carbonosos formadas nas fases anteriores anteriores (MARCILLA *et al.*, 2005).

Quanto à degradação térmica no resíduo das indústrias de calçados com EVA, as análises termogravimétricas numa atmosfera de N₂ demonstram a existência de três etapas,

sendo: a primeira faixa de degradação registrada em torno de 330 a 450°C, a segunda entre 450 a 520°C, e a terceira etapa registrada entre 680 e 750°C. (ZATTERA *et al.*, 2005). Na pesquisa de MONTAGNOLI *et al.* (2010), a primeira faixa de degradação está entre 230 a 400°C, a segunda entre 400 a 500°C, e a terceira etapa ocorre entre 510 e 700°C. Ambas as pesquisas relatam que a primeira perda foi provocada pela degradação do acetato de vinila, e, com isso, forma-se o ácido acético, a segunda degradação é proveniente da parte olefínica do copolímero, e a terceira etapa está relacionada à degradação da carga inorgânica.

Por meio da obtenção das curvas termogravimétricas, pode-se calcular o valor do teor de acetato de vinila (VA_c) que ficou no resíduo após o processo de trituração (Equação 2.1), considerando que a perda percentual de massa na primeira etapa de degradação seja exclusivamente devido à degradação do VA_c com formação de ácido acético (HULL *et al.*, 2003 apud ZATTERA *et al.*, 2005). Com isso, as indústrias calçadistas podem avaliar o nível de qualidade desses resíduos para possível reaproveitamento no processo industrial.

$$\text{Teor de VA}_c = \frac{\text{MMAcP}(\%) \times \text{MMAV}}{\text{MMAAC}} \quad (\text{equação 2.1})$$

Onde:

MMAcP(%) = teor de massa de ácido acético fornecida na primeira degradação do TG;

MMAV = massa molecular de acetato de vinila (86,1g/mol);

MMAAC = massa molecular de ácido acético (60,1g/mol).

As degradações provocadas pela presença da umidade nos polímeros são o inchamento e a dissolução que ocorrem devido às moléculas do líquido penetrar no interior do polímero, posicionando-se entre suas moléculas, fazendo com que haja uma separação das macromoléculas, causando a expansão e o inchamento do material, redução das forças de ligação intermolecular, tornando-o mais mole e mais dúctil (CALLISTER, 2007).

Ao avaliar as condições de deterioração de blendas poliméricas de EVA, com VA_c de 14% e 18%, em câmaras de envelhecimento UV com fonte de xenon, simulando a luz solar contínua, foi observado o surgimento de fissuras na superfície do material, devido a um rearranjo na região cristalina, sendo que as unidades com maior teor de VA_c sofrem maior enfraquecimento de sua estrutura quanto a sua resistência à radiação da luz UV, além de possuir maior penetração de oxigênio e consequentemente intensificam as reações de degradação (JIN *et al.*, 2010). Esse mesmo autor explica que isso ocorre porque, quanto maior o teor de VAc, maiores são as quantidades de pontos mais fracos existentes ao longo da cadeia molecular do polímero.

A durabilidade dos polímeros em exposição às condições do meio externo demonstra ser satisfatória. Os polímeros possuem boa resistência ao ataque por soluções ácidas e alcalinas, sendo bem melhor do que a resistência dos metais (CALLISTER, 2007).

Acredita-se, assim, que o agregado de EVA não sofrerá deteriorações quando submetidos ao interior do concreto, situação em meio alcalino ($\text{pH} \cong 12$), podendo, em algumas vezes, ter uma redução da alcalinidade ($\text{pH} < 12$) e ainda sujeito a sofrer ataques por agentes agressivos, como sulfatos e cloretos. Além disso, o agregado de EVA estará no interior do concreto protegido pela barreira física do recobrimento.

Deve-se averiguar o comportamento do agregado de EVA na matriz de cimento, bem como a sua interação com todos os elementos da mistura e como isso pode influenciar nas condições de degradação desses concretos, frente a agentes agressivos, dentre esses, cloreto e sulfato.

2.3.2 A absorção de água pelo agregado

Os agregados de EVA absorvem água devido a sua estrutura porosa. Mas entre as pesquisas, existe uma enorme discrepância desse valor, por exemplo, em agregados com $D_{\text{máx}} = 12,5\text{mm}$ e $6,3\text{mm}$, obtiveram absorção de água de 62,2% e 88,2%, respectivamente (GARLET, 1998); agregados com $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$ apresentaram absorção de 74,21% (POLARI FILHO, 2005); com essa mesma granulometria, a absorção foi de 44,3% (SANTIAGO, 2008).

Um fator determinante na absorção dos agregados de EVA está relacionado à densidade das mantas, e, além de existirem mantas de densidades distintas, as pesquisas utilizam procedimentos de ensaios diferentes, e isso também interfere nos resultados.

Segundo Santiago (2008), pode-se aplicar a mesma metodologia de ensaio utilizada na determinação da absorção dos agregados naturais, conforme a norma NBR NM53 (ABNT, 2003). Porém, esse método não é o mais indicado, devido à estrutura esponjosa do agregado, e pode-se aplicar uma metodologia adaptada do procedimento de ensaio para poliestireno expandido para fins de isolamento térmica da NBR 7973 (ABNT, 1983) (BEZERRA, 2003; POLARI FILHO, 2005).

Garlet (1998), seguindo recomendações sugeridas por Spratt (1960) e também do CEB/FIP (1977) em relação à necessidade do procedimento da pré-molhagem em água dos agregados leves, utilizou em sua pesquisa agregados de EVA previamente imersos em água. Com base nessas duas referências, Garlet (1998) justifica que, com esse procedimento, evita-

se que o EVA seco, ao entrar em contato com a água de amassamento da mistura, absorva certa quantidade dessa água, pois a absorção da água da mistura pelo agregado iria prejudicar a trabalhabilidade, até mesmo, provocar uma provável redução da água disponível e necessária às reações de hidratação do cimento Portland.

As demais pesquisas que sucederam a pesquisa de Garlet (1998) também adotaram seu mesmo procedimento metodológico, seguindo a orientação da pré-molhagem do agregado de EVA, por um período de 60 minutos (BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005).

A absorção de água pelos agregados leves, provocada pela sua alta porosidade, é uma marcante diferença entre os agregados leves e os tradicionais. Assim sendo, os agregados leves, quando utilizados nos concretos, podem absorver certa quantidade da água da mistura necessária para a hidratação do cimento (NEVILLE, 1997).

São vários os autores que concordam com o procedimento de imersão prévia dos agregados leves e acrescentam ainda que a presença da água absorvida pelo agregado possa contribuir com o fortalecimento da aderência agregado leve-pasta, pois ela proporcionará a hidratação do cimento anidro remanescente com a posterior saída da água do interior do agregado (SPRATT, 1960; NEVILLE, 1997; ROSSIGNOLO E AGNESINI, 2001). A essa propriedade dá-se o nome de “cura úmida interna”.

Porém, não é consenso na literatura essa afirmação, havendo uma linha de pesquisa que avalia a pré-molhagem do agregado leve como algo que pode prejudicar a resistência do concreto (VIEIRA, 2000).

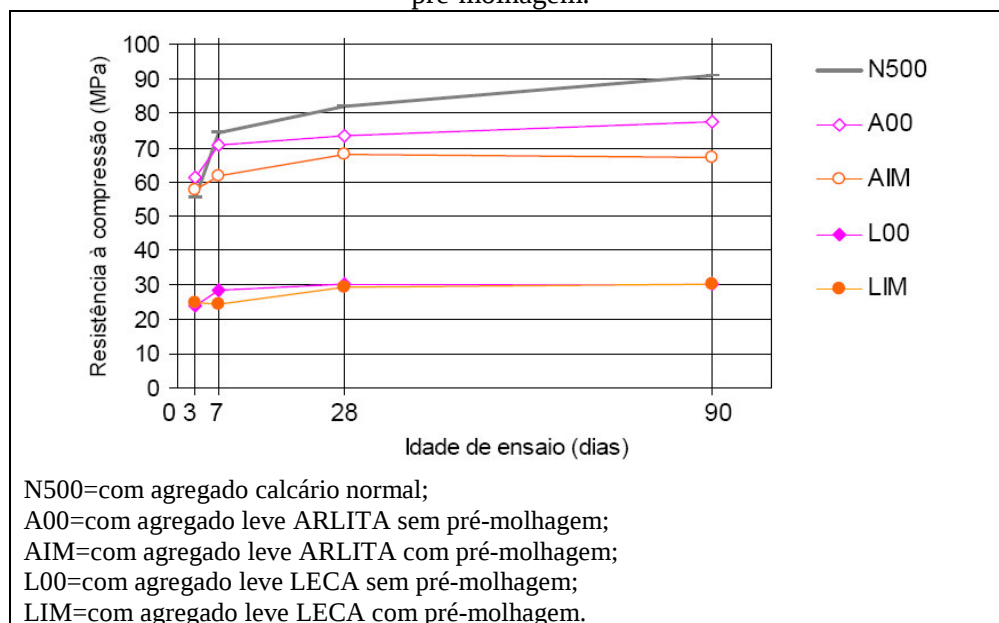
Vieira (2000) avaliou o uso de agregados leves com dois tipos de argilas expandidas, sendo um agregado mais denso (ARLITA) e outro menos denso (LECA). Foram moldados corpos-de-prova de concreto, sendo as amostras desmoldadas somente após 24 horas e então conduzidas para a câmara úmida.

Foi constatado que, antes do sétimo dia de moldagem, não há influência da pré-molhagem do agregado nos concretos com agregado ARLITA. Porém, a partir dessa idade, o concreto com agregado imerso em água tem resistências mais baixas, se comparado com concreto do mesmo agregado em condição seca, ou seja, existe um efeito negativo na resistência do concreto com o procedimento da pré-molhagem do agregado (Figura 2.5).

O referido autor explica que isso acontece porque o agregado previamente molhado não absorverá tanta água quanto o agregado seco quando estiver no interior da mistura, elevando a concentração de água na sua superfície. Com isso, tem-se uma maior relação

água/cimento e maior porosidade na zona de transição entre o agregado e a matriz do que nos concretos com agregado seco e, conseqüentemente, causa a redução da resistência do concreto.

Figura 2.5 – Evolução da resistência à compressão dos concretos com uso de agregados sem e com a pré-molhagem.



Fonte: VIEIRA (2000).

Com o agregado LECA, a pré-molhagem é não significativa, pois o procedimento de pré-molhagem para esse agregado de menor densidade não provocou efeitos na resistência, devido à elevada porosidade e capacidade de absorção do agregado que evitaram a acumulação de água na zona de transição agregado e matriz em ambas as situações de uso do agregado, assim, o comportamento foi o mesmo no concreto (VIEIRA, 2000).

A existência de estudos em que se analisam a pré-absorção dos agregados de EVA em água ainda é muito incipiente. Como já comentando, as pesquisas com EVA que fizeram o procedimento de imersão prévia, simplesmente, adotaram o processo com base no que normalmente se faz com os agregados leves tradicionais.

Existe uma corrente que relata que tal procedimento pouco ou nada influencia nas propriedades do concreto com EVA, que apenas acarreta um custo adicional ao processo, além de ser uma prática de difícil execução (MELO *et al.*, 2006). Usando agregados de duas densidades distintas, ao comparar a resistência à compressão de blocos com agregado de EVA com e sem a pré-molhagem, verificou-se que as resistências para ambos os tipos de blocos foram praticamente iguais, demonstrando que a pré-molhagem do agregado de EVA é dispensável para aplicação em blocos (MELO *et al.*, 2006).

2.3.3 Principais pesquisas com agregados de EVA

O Rio Grande do Sul é o maior centro calçadista do Brasil, tratando-se também de um centro de desenvolvimento de pesquisas na busca de encontrar alternativas adequadas para a destinação dos resíduos oriundos desse processo fabril. Naquele estado, uma empresa (MAISON Indústria e Comércio de Artefatos de Cimento: www.britaleve.com.br) patenteou um agregado obtido do beneficiamento do EVA e produz agregados leves comercializados em sacos para uso em concretos sem função estrutural e para isolamento acústica.

Outras patentes também já foram registradas, por exemplo, para a produção de blocos de vedação com o uso de agregados de resíduos de EVA. Além do Rio Grande do Sul, outro grande centro de estudo sobre esse tema é o estado da Paraíba, onde já foram desenvolvidas algumas pesquisas de mestrado e doutorado na Universidade Federal da Paraíba, todas com o propósito de averiguar a viabilidade do aproveitamento desse resíduo na engenharia civil.

Os objetivos principais das pesquisas existentes estão voltados para a busca de uma dosagem ideal que proporcione o uso do agregado leve de EVA em substituição parcial aos agregados naturais, em concretos para confecção de blocos de vedação (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005; LYRA, 2007; ROCHA, 2008; LIMA FILHO, 2008). As avaliações de resistência à compressão foram realizadas, tanto em corpos-de-prova cilíndricos, em blocos individuais, como em alvenarias construídas com os referidos blocos. O desempenho estrutural das alvenarias construídas com blocos de EVA, aplicados em um protótipo em escala real, foi comprovado por meio de ensaios de impactos horizontais nas faces das paredes (LIMA FILHO, 2008). Essas pesquisas têm demonstrado que se pode utilizar até 80% em volume de agregado de EVA em substituição ao agregado natural (areia e pedrisco) na confecção dos blocos que atingiram resistências à compressão de 1,30MPa, e que, com base nos estudos desenvolvidos no protótipo, concluiu ser esse valor suficientemente aceitável para aplicação dos blocos de EVA projetados para alvenaria sem função estrutural.

O uso do agregado de EVA proporciona melhorias nas condicionantes relativas ao conforto térmico e acústico. Ao analisar o uso de placas de resíduos de EVA, simulando um forro em um modelo reduzido de galpão para fins agropecuários, foram constatadas reduções nos índices de temperatura do globo negro e umidade relativa e nos valores da carga térmica de radiação no interior do protótipo (CAMERINI, 2008).

Compósitos à base de gesso, utilizando resíduos de EVA obtêm elementos de revestimento com boas propriedades termomecânicas, proporcionando uma redução na carga térmica incidente em alvenarias (LEAL, 2004; OLIVEIRA, 2009). Também já foi comprovado o aumento da capacidade de absorção acústica dos compósitos com o uso do agregado de EVA, devido sua estrutura celular (SILVA JÚNIOR, 2007).

Outro trabalho estudou uma mistura binária com uso do agregado de resíduo de EVA e agregado de RCD (resíduo de construção e demolição) para obtenção em concretos de consistência plástica (SANTIAGO, 2008). A referida pesquisa demonstrou ser possível a produção de concreto leve estrutural com teores de 25% de RCD e 25% de EVA.

O uso do resíduo de EVA também foi investigado em concreto betuminoso, por meio de estudo em que se analisou a influência da adição de EVA e de resíduo de EVA da indústria calçadista no comportamento mecânico nesse tipo de concreto (SAOULA *et al.*, 2009).

Várias pesquisas demonstram o grande potencial do resíduo de EVA para uso como agente de modificação de betumes (YOUSEFI *et al.*, 2000; MURPHY *et al.*, 2000; GONZÁLEZ *et al.*, 2004; GARCÍA-MORALES, 2005).

Todas as pesquisas são favoráveis à incorporação do EVA aos concretos, ressaltando a necessidade de ampliação dos estudos, haja vista ter sido abordado somente o comportamento mecânico do produto. Não foram encontrados na literatura trabalhos que avaliem a interação da incorporação do EVA, combinando a variação entre os teores do agregado leve e dos agregados naturais, que possa considerar o comportamento granulométrico formado pelos componentes das misturas. A presente pesquisa se diferencia das demais por buscar verificar tais condições de incorporação do agregado de resíduo de EVA em concretos de cimento Portland de consistência plástica e identificar as consequências nas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade desses concretos.

2.4 MISTURAS CIMENTÍCIAS COM USO DE AGREGADO LEVE

2.4.1 No estado fresco

Dada a alta porosidade dos agregados leves, a sua utilização provoca aos concretos uma grande absorção de água. NEVILLE (1997) afirma que o agregado leve absorve certa quantidade da água da mistura necessária para a hidratação do cimento.

A quantidade dessa água absorvida pelo agregado varia bastante, conforme o tipo de agregado e seu grau de saturação. Quando se coloca o agregado leve imerso em água antes da sua utilização, a água da mistura é praticamente a água de dosagem, porém, se o agregado for utilizado seco, será necessário um consumo maior de água durante a mistura.

Essa situação de maior consumo de água provoca a necessidade de maior quantidade de cimento à mistura, comparado aos concretos normais, representando um custo maior no valor do concreto (SOBRAL, 1996).

Por outro lado, geralmente, os concretos leves possuem maior produtividade, se comparados aos demais concretos, pois, segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), o uso dos concretos com agregados leves exige menos esforço no transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto.

Pode-se perceber, por meio do ensaio de abatimento, que, mesmo com valores baixos, o concreto leve já apresenta boa trabalhabilidade. Isso acontece graças à baixa massa específica que se torna menos influenciada pelo efeito da gravidade, se comparado aos concretos normais. Corre o risco, porém, de haver uma segregação com bastante facilidade, provocada por um abatimento elevado ou excesso de vibração, prejudicando assim a trabalhabilidade do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Portanto, a trabalhabilidade dos concretos leves é algo bem sensível e que merece um cuidado mais especial, pois irá refletir diretamente nas propriedades do concreto endurecido.

Misturas cimentícias, com uso de agregados leves, podem sofrer influências na sua trabalhabilidade e diminuir o efeito da força da gravidade durante o adensamento, conforme intensidade da absorção de água e da massa específica desses agregados. Ocorre que, quando se utiliza um agregado leve, o concreto perde abatimento devido à absorção contínua da água pelos poros do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Esse comportamento faz com que, ao se aplicar o ensaio de abatimento do tronco de cone, a mistura ceda de forma menos significativa que com os concretos tradicionais, para as mesmas condições de dosagem (MEHTA e MONTEIRO, 2008; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011). Assim, esse ensaio não é o mais indicado para concretos leves. O ideal é a realização de ensaios que não dependam da ação da gravidade, como por exemplo, o ensaio de penetração de Kelly (NEVILLE, 1997). Tal comportamento foi observado por Santiago (2008), quando, em sua pesquisa com misturas com EVA, ao realizar ensaio de tronco de cone nas amostras com uso de EVA, que apresentavam facilidade de trabalhabilidade mesmo com baixo valor de abatimento.

As pesquisas demonstram que a incorporação de EVA aos concretos manteve a trabalhabilidade em condições satisfatórias quanto ao lançamento, ao adensamento e ao acabamento das misturas. Os cuidados são os mesmos com os demais agregados leves. Por exemplo, em misturas muito plásticas, deve-se evitar possível degradação.

As partículas grandes do agregado leve tendem a ficar flutuando sobre a água, o que pode ser agravado devido ao adensamento demorado (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Portanto, o controle do abatimento nesses concretos deve ser realizado com bastante atenção.

2.4.2 No estado endurecido

Ao substituir os agregados convencionais por agregados leves, dependendo da quantidade incorporada, podem-se obter os chamados concretos leves, que, como o nome diz, apresentam-se com menor massa unitária em relação aos concretos normais, sendo, portanto, menor peso próprio.

Segundo a norma brasileira NBR 8953 (ABNT, 2009), os concretos leves devem possuir massa específica seca inferior a 2000Kg/m³. Para o ACI213R-87, classifica-se como estrutural, o concreto com uso de agregado leve que possuir resistência à compressão aos 28 dias superior a 17MPa e massa específica seca ao ar aos 28 dias inferior a 1850Kg/m³ (ZHANG e GJORV, 1991a).

Há uma forte relação entre a resistência dos concretos leves e sua massa específica que regem as principais propriedades nesses tipos de concretos. Essa relação, se define como “Fator de Eficiência” (F_{ef}), expresso pela Equação 2.2.

$$F_{ef} = \frac{f_k}{\gamma} \quad (\text{equação 2.2})$$

F_{ef} = Fator de Eficiência (MPa.dm³/Kg); f_k = resistência mecânica (MPa); γ = massa específica (Kg/dm³).

O Fator de Eficiência é um parâmetro bastante utilizado para avaliar e caracterizar os concretos leves.

Ao se fazerem os cálculos do Fator de Eficiência dos resultados alcançados nas pesquisas em concretos com uso de resíduo de EVA, em amostras em corpos-de-prova cilíndricos (Tabela 2.2), têm-se valores bem abaixo do 25MPa.dm³/Kg, que é o parâmetro considerado como concreto leve de alto desempenho (SPITZNER, 1994).

Tabela 2.2 – Resistência à compressão e fator de eficiência para os concretos com resíduo de EVA

Autor Ano	Mistura	CP (cm)	EVA D _{máx}	Traço cim:agreg	Teor de EVA (%)	Resistência (MPa)	Massa Específica (Kg/dm ³)	Fator de Eficiência MPa.dm ³ /Kg					
Garlet (1998)	Consistência seca	(10x20)	9,5mm	1:3	60	3,40	1,352	2,5					
					70	2,86	1,246	2,3					
					80	1,80	1,121	1,6					
					100	0,70	0,667	1,1					
				1:5	60	1,92	1,276	1,5					
					70	1,60	1,143	1,4					
					80	1,10	0,957	1,1					
					100	0,40	0,539	0,7					
				1:7	60	0,60	1,187	0,5					
					70	0,45	1,019	0,4					
					80	0,15	0,618	0,2					
					100	0,10	0,288	0,3					
Bezerra (2002)	Consistência seca	(5x10)	9,5mm	1:3	40	2,43	1,362	1,8					
					50	2,47	1,269	1,9					
					60	2,57	1,153	2,2					
					70	2,07	1,065	1,9					
					80	1,48	0,820	1,8					
					90	1,35	0,701	1,9					
					100	1,28	0,666	1,9					
			4,8mm		40	4,25	1,358	3,1					
					50	2,73	1,290	2,1					
					60	1,98	1,169	1,7					
					70	2,32	1,104	2,1					
					80	1,26	0,925	1,4					
					90	1,25	0,831	1,5					
					100	1,39	0,682	2,0					
		(5x10) com TT*	9,5mm		40	2,26	1,407	1,6					
					50	2,31	1,342	1,7					
					60	2,43	1,268	1,9					
					70	2,54	1,228	2,1					
					80	2	1,034	1,9					
					90	1,9	0,970	2,0					
					100	1,64	0,838	2,0					
					6,3mm	40	2,47	1,383	1,8				
						50	2,5	1,219	2,1				
			60			2,57	1,142	2,3					
			70			2,79	1,126	2,5					
			80			2,88	1,081	2,7					
			90			1,73	0,957	1,8					
			100			1,32	0,792	1,7					
			Polari Filho			Consist. seca	(5x10)	9,5mm	1:3	60	5,38	1,400	3,8
										70	3,31	1,390	2,4
					80					2,67	1,146	2,3	
					1:5			60	2,39	1,351	1,8		
Santiago (2008)	Consistência plástica	(10x20)		9,5mm				1:4 com a/c0,49	50	11,08	1,767	6,3	
									25-25RCD	17,75	1,969	9,0	
			50-50RCD		9,68	1,640	5,9						
			1:4 com a/c0,63		50	8,56	1,742	4,9					
					25-25RCD	13,72	1,963	7,0					
					50-50RCD	7,72	1,624	4,8					
			1:4 com a/c0,82		50	5,40	1,649	3,3					
					25-25RCD	8,02	1,900	4,2					
					50-50RCD	4,68	1,585	3,0					

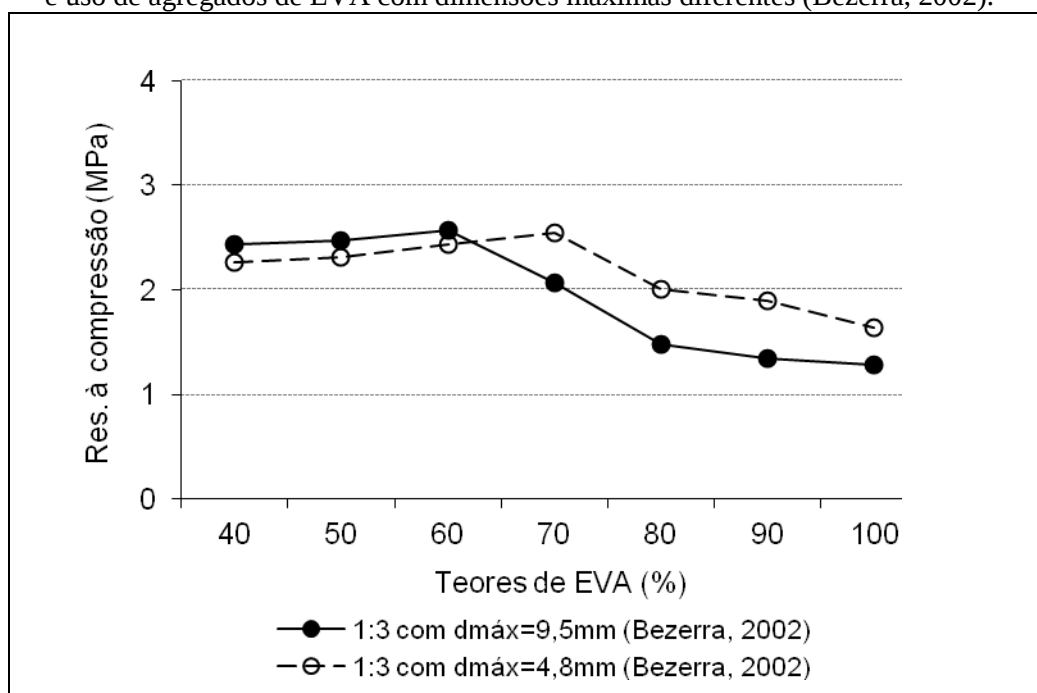
Obs: TT- Tratamento térmico.

Acentuadamente, há uma redução na resistência à compressão do compósito, sendo esse um fator característico nesses tipos de concretos. Por isso, Garlet (1998) afirma que o uso do EVA torna o concreto limitado para fins não estruturais, com resistências máximas de 3,5MPa. Já Santiago (2008) conseguiu obter concretos com resistência à compressão média de 17,75MPa, com teores de 25% de EVA e 25% de RCD (em volume) e ao utilizar 50% de EVA (em volume), sem RCD a resistência foi de 11,07MPa para concretos no traço 1:4 (em massa), com relação $a/c=0,49$ e consumo de cimento de 424Kg/m^3 . Os resultados foram considerados muito positivos, sendo o concreto com resistência de 17,75MPa classificado como concreto leve estrutural (NEWMAN e CHOO, 2003).

Dada a baixa densidade do polímero, a presença do agregado leve de EVA nos concretos provoca redução na massa específica do concreto, por meio de uma relação inversa entre o teor de EVA e a massa específica do compósito que influencia diretamente nas demais propriedades.

Com base dos dados da Tabela 2.2, apresenta-se a Figura 2.6, na qual se compararam misturas de traços iguais com uso de agregado de EVA de dimensões máximas diferentes.

Figura 2.6 – Relação Resistência à Compressão e Teores de EVA para concretos com mesmos traços e uso de agregados de EVA com dimensões máximas diferentes (Bezerra, 2002).

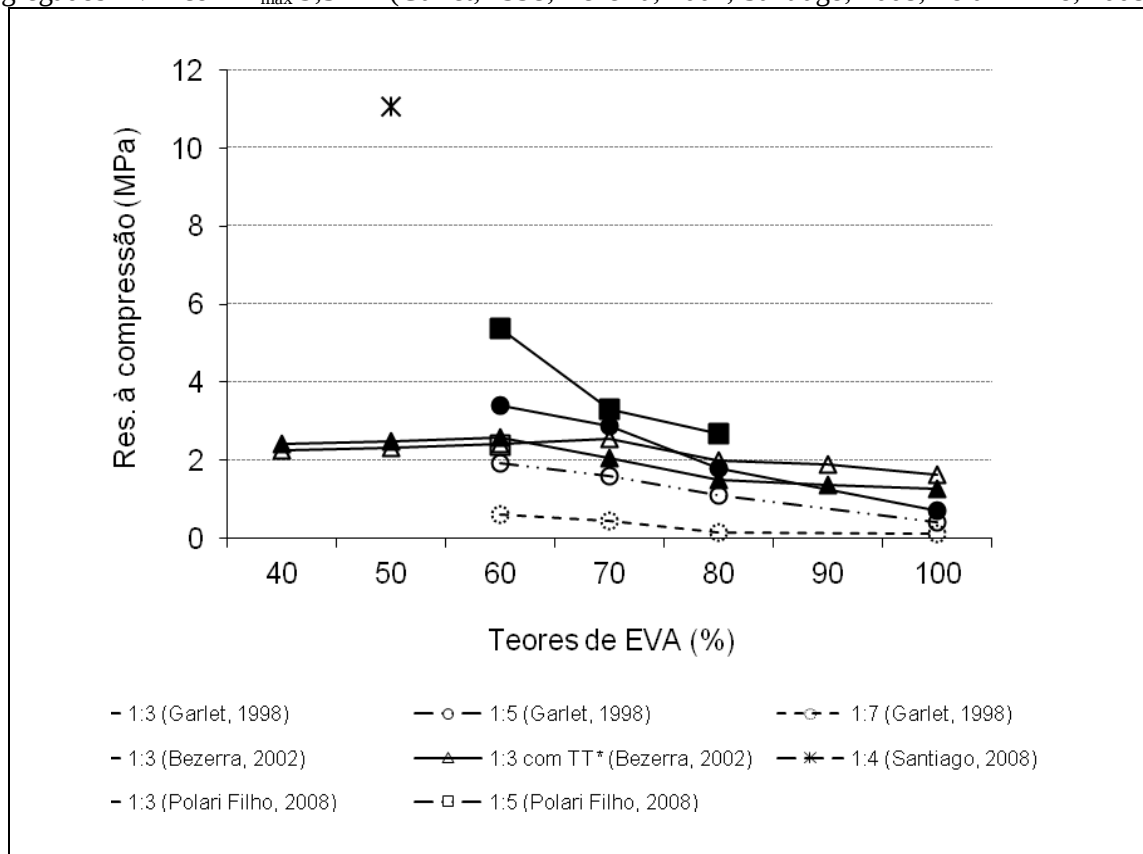


Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Bezerra (2002).

Constata-se que, quanto menor a granulometria do agregado, maior é a resistência do concreto. Essa diferença ocorre nos teores mais elevados de incorporação, em que existe maior influência da presença do agregado leve no comportamento do concreto.

Ainda com base dos dados da Tabela 2.2, apresenta-se a Figura 2.7, que se faz a relação entre a resistência à compressão e teores de EVA para concretos diferentes, usando agregados EVA de dimensões máximas iguais.

Figura 2.7 – Relação Resistência à Compressão e Teores de EVA para concretos diferentes e uso de agregados EVA com $D_{máx}$ 9,5mm (Garlet, 1998; Bezerra, 2002; Santiago, 2008; Polari Filho, 2008).



Fonte: Elaborado pelo autor com dados da literatura.

Verifica-se que, apesar da influência do teor de EVA na redução da resistência à compressão, existem situações em que, para o mesmo valor de incorporação de EVA, têm-se resultados diferentes nas resistências. Isso demonstra que, além do teor de EVA incorporado e da dimensão dos grãos, outros fatores estão influenciando nos resultados, como relação cimento/agregados, fator água/cimento; condições de adensamento; granulometria dos demais agregados.

Essas intervenções podem proporcionar condições de empacotamentos diferenciados e conseqüentemente melhores resultados nas resistências dos compósitos.

Portanto, caso o objetivo da produção do concreto com EVA seja atingir níveis de resistências estruturais, com bons resultados de eficiências, deve-se diminuir a quantidade do resíduo incorporado, adotar proporções entre os componentes que garantam bons empacotamentos e aumente a densidade do compósito, usar traços mais ricos em cimento, ou ainda, utilizar aditivos. Ou seja, novas pesquisas precisam ser realizadas no intuito de avançar na melhoria da capacidade de resistência desses concretos, estudando dosagens com teores de EVA em diferentes proporções dos agregados entre si, isto é, com análise no comportamento granulométrico dos componentes da mistura, sendo esse um dos objetivos deste trabalho.

Uma propriedade bastante positiva dos concretos com agregados leves é sua capacidade de gerar uma boa aderência entre os agregados e a matriz da pasta de cimento, que ocorre devido à superfície áspera de certos agregados leves e sua capacidade de absorção fazerem com que exista um melhor intertravamento mecânico entre as partículas dos agregados e a pasta (NEVILLE, 1997).

A absorção de água aumenta conforme se eleva a incorporação de EVA (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; PIMENTEL, 2005, SANTIAGO, 2008).

Ao avaliar a absorção de água dos corpos-de-prova de concretos no estado endurecido, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005) em concretos com incorporação de 50% em volume de EVA em relação aos agregados, a maior absorção obtida antes da fervura foi de 4,3%, e, quando as amostras são submetidas ao mesmo ensaio por 5 horas de fervura (conforme um dos procedimentos da norma), os resultados sofreram variações de 138% (SANTIAGO, 2008). Essa variação é devido à ocorrência de pequenas transformações exotérmicas sofridas pelo EVA, quando aquecidas a aproximadamente 50°C, e assim a fervura pode prejudicar a análise real do ensaio. Segundo essa mesma autora, pode-se adotar o procedimento da norma sem fervura, pois o efeito da fervura sobre o concreto de referência e outros concretos convencionais é muito pouco, e, portanto, considerar como análise o procedimento da norma sem fervura não provocará equívocos nas análises dos resultados (SANTIAGO, 2008).

Uma avaliação da absorção de água em blocos inteiros, fabricados com traço 1:5 (cimento: agregados, em volume), com 40% de agregados de EVA obtiveram valores de 12,4% (GARLET, 1998), portanto acima dos valores estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2007), que deve ser menor ou igual a 10%.

Bezerra (2002) realizou o ensaio também em blocos inteiros e encontrou valores médios na ordem de 9% de absorção de água para blocos com 60% de EVA. Pimentel (2005)

adotou esse mesmo procedimento e encontrou valores de 10%, 11% e 14% para blocos com 60%, 70% e 80% de EVA, respectivamente.

Portanto, apesar da dificuldade de fazer comparações entre os resultados das pesquisas, pois os valores encontrados para a absorção de água de um componente podem variar conforme o método aplicado, é consenso afirmar que a absorção aumenta à medida que se eleva o teor de EVA na mistura, devido à porosidade do polímero.

Apesar da alta porosidade, o que pode garantir que a presença do agregado leve não afetará na durabilidade do concreto é a falta de interligações entre os poros, para que não haja o fluxo de líquido e gases e, assim, dificulte a penetração de agentes agressivos. A maioria dos agregados leves artificiais apresentam porosidade fechada, e isso bloqueia a movimentação de fluídos no interior dos grãos (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011). As células do polímero de EVA possuem sua formação primária do tipo fechada (CHÁVEZ, 2007) e, caso assim permaneça após o processo de trituração para obtenção do agregado, poderá não influenciar na permeabilidade do compósito.

De uma forma geral, a literatura tem demonstrado que, ao comparar concretos de resistências semelhantes, percebe-se que os concretos com agregados leves são iguais ou menos permeáveis a líquidos e a gases do que os concretos convencionais, devido também à melhoria da qualidade da zona de transição entre o agregado leve e a pasta (HOLM e BREMNER, 2000).

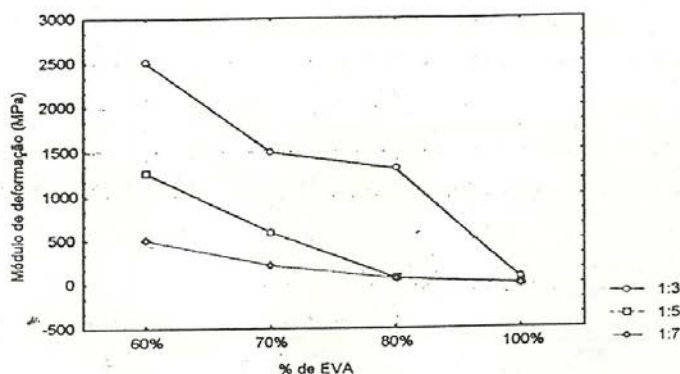
Entretanto, pode acontecer maior movimentação de umidade nas pastas com agregados leves, se comparados aos concretos comuns. Esse fenômeno causa fissuras por retração e, conseqüentemente, torna-se caminhos de permeabilidade para agentes agressivos à durabilidade do concreto (KARL, 1989 apud NEVILLE, 1997).

A porosidade dos agregados leves interfere no módulo de deformação dos concretos. A presença do EVA diminui o módulo de deformação do concreto, que pode chegar à ordem de 2,5GPa em um concreto com 60% de EVA, em corpos-de-prova cilíndricos com traço 1:3, em volume, em consequência das propriedades elásticas do polímero (GARLET, 1998).

Em sua pesquisa, Garlet (1998) analisou o valor do módulo em concretos com EVA, em função do traço, e demonstrou a diminuição do valor do módulo conforme cresce o teor de EVA incorporado (Figura 2.8). Segundo esse autor, tal comportamento é algo desfavorável ao se utilizar esse concreto em função estrutural. Por outro lado, concretos com baixos valores do módulo de deformação podem ser benéficos nas resistências ao impacto e em movimentações

acidentais da estrutura, evitando-se, com isso, patologias normalmente encontradas nos edifícios de vários pavimentos (SHORT e KINNIBURG, 1978; PIMENTEL, 2005).

Figura 2.8 – Módulo de deformação e teor EVA na mistura, em função do traço de concreto.



Fonte: Garlet, 1998.

No estudo de Santiago (2008), também foi constatada a redução nos valores do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de EVA, conforme apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos concretos com EVA, em amostras com corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm.

TRAÇO (cim:agreg, em massa)	Relação água/cimento	MISTURA (volume substituição ao agregado graúdo)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1:4	0,49	100% natural	30,733	32,7
		50% EVA	10,623	15,4
		25%RCD+25%EVA	17,853	20,5
		50%RCD+50%EVA	6,733	9,5
1:7,3	0,82	100% natural	17,877	26,8
		50% EVA	4,123	10,7
		25%RCD+25%EVA	7,443	15,4
		50%RCD+50%EVA	3,590	8,0

Fonte: Santiago, 2008.

Os concretos com a/c menor apresentam módulos de elasticidade maiores, pois o aumento desta relação provoca uma maior porosidade na matriz e, conseqüentemente, diminuem a compressão e o módulo de deformação. E, ao comparar concretos com a mesma relação a/c, tem-se que a queda do valor do módulo está relacionada com a maior presença de EVA, devido também, nesses casos, ao agregado de EVA colaborar para uma maior presença de vazios no compósito por causa da sua fragilidade e da característica porosa.

Quanto às condições de desempenho estrutural do concreto com EVA, Lima Filho (2008) realizou ensaios de impacto na alvenaria em um protótipo (simulação de um ambiente) feito com blocos de EVA.

Os testes realizados na alvenaria foram do tipo ensaios de impactos de corpo mole e corpo duro, ensaios de cargas provenientes de peças suspensas e ensaios de fechamento brusco de porta, sendo as alvenarias executadas com blocos produzidos a partir do compósito com traço 1:5 (cimento Portland: agregados, em volume) com 60% de substituição do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado artificial de EVA ($D_{\text{máx}}=9,5\text{mm}$), os quais obtiveram resistência à compressão média de 1,32 MPa (LIMA FILHO, 2008). A referida pesquisa concluiu que, em todos os testes avaliados, os resultados foram considerados satisfatórios, segundo os critérios mínimos prescritos pelas normas brasileiras vigentes.

O isolamento acústico foi outra propriedade pesquisada nos concretos com EVA. Normalmente os elementos de vedação de baixa densidade não apresentam bons desempenhos, devido à porosidade que facilita a passagem do som. Ao avaliar, uma parede composta com blocos de EVA (espessura da parede sem revestimento de 14cm, espessura do revestimento de 1cm em cada lado com argamassa composta de cimento, cal e areia de 1:1:6), assentada com argamassa de cimento, cal e areia de 1:2:8, verificou-se que a parede sem estar revestida não tem bom isolamento (15 dB(A)) e, ao ser revestida, apresentou bom desempenho (41,5 dB(A)), sendo nesse caso, comparada aos padrões das alvenarias convencionais de blocos de concreto ou cerâmicos (GARLET, 1998).

Quanto ao desempenho térmico, um estudo sobre o aproveitamento do agregado de EVA, substituindo a areia para desenvolvimento de compósitos cimentícios leves, do tipo placas, demonstrou que a presença do EVA garante melhor comportamento térmico, se comparado com as matrizes de referência (LEAL, 2004). O referido autor sugere a utilização dos compósitos com EVA em painéis, forros, testeiras e beirais.

Uma propriedade ainda pouco estudada é a condição de resistência ao fogo desses concretos, e esta propriedade é algo relevante, haja vista a presença do polímero que pode trazer alterações nas propriedades intrínsecas dos concretos, quando submetidos a uma condição de incêndio. Garlet (1998) fez um simples procedimento experimental, aplicando chamas com um maçarico a uma temperatura de 700°C em blocos com EVA, e verificou que não houve o colapso da peça, nem a propagação da chama, havendo apenas o aparecimento de manchas escuras e a sublimação de grãos de EVA que estavam na superfície exposta ao fogo.

Apesar da simplicidade do procedimento adotado nesta pesquisa, o referido autor conclui que os concretos com EVA não representam riscos às construções, no que se refere ao fogo.

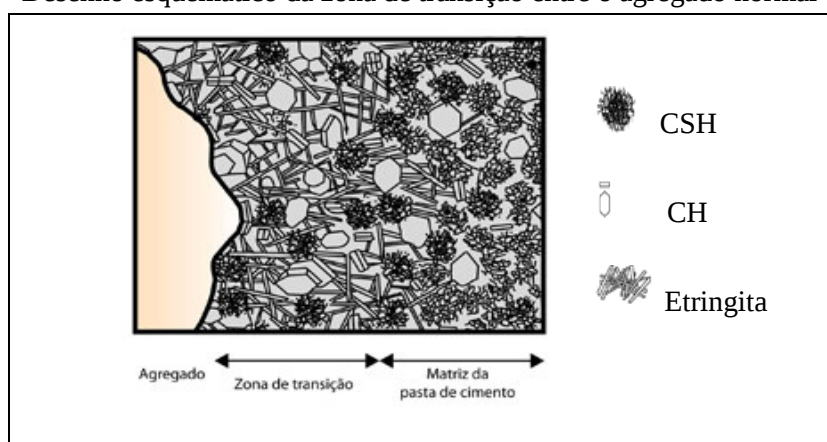
Em relação às condições de resistência do concreto submetido à elevação de temperatura, corpos-de-prova de concretos com EVA submetidos às temperaturas de 50°C, 70°C e 100°C em estufa, durante 24h, não foram danificados, mantendo a resistência do concreto (SANTIAGO, 2008). Observou-se que, conforme o aumento da temperatura, havia uma redução do módulo de deformação do concreto, ocasionada pela evaporação de parte da água presente nos poros.

2.4.3 Zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento

Na zona de transição, o tipo de agregado é um fator altamente determinante nas propriedades desta fase. Ocorre que nos concretos que se utilizam de agregados comuns, quando no estado fresco, formam-se “filmes de água” em torno dos grãos grandes dos agregados, deixando assim essa região com uma maior relação água/cimento, se comparados às demais áreas da matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Assim, tem-se na região da interface, entre o agregado e a matriz de cimento, uma estrutura porosa, dado ao acúmulo de água que tende a se estabelecer naquela região com o aumento da relação água/cimento. A existência desses poros cria um meio propício à formação de cristais de grandes dimensões, como do sulfoaluminato de cálcio e do hidróxido de cálcio.

Mehta e Monteiro (2008) apresentaram um desenho esquemático que retrata a zona de transição na interface do agregado comum e matriz de cimento (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Desenho esquemático da zona de transição entre o agregado normal e a matriz.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008).

Nessa imagem da Figura 2.9, pode-se verificar que a zona de transição é uma região menos densa se comparada à região da matriz da pasta de cimento. Há, nessa região, poucos núcleos de cristalização, o que a torna uma região menos coesa e mais fraca, se comparada a uma região de matriz. Progressivamente, com a evolução da hidratação, formam-se silicatos de cálcio hidratado pouco cristalinos e moléculas menores de etringita e portlandita, que passam a ocupar os interstícios.

Na zona de transição, também pode ocorrer exsudação, devido ao acúmulo de água na parte inferior dos agregados e ainda ao surgimento do efeito parede, que provoca vazios entre as partículas de cimento e a superfície do agregado.

No caso de se utilizar agregados leves, muitos trabalhos têm verificado que, quando se faz a imersão prévia em água desses agregados, tem-se o comportamento da zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento semelhante a dos concretos convencionais. Sendo que surgem efeitos diferentes na zona de transição com uso de agregados leves secos (SWAMY e LAMBERT, 1981; WASSERMAN e BENTUR, 1996; KJELLSSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; LO e CUI, 2004). Acontece que, quando se faz a pré-molhagem dos agregados leves, com a ocupação dos poros do agregado pela água da pré-molhagem surge um acúmulo da água de amassamento na interface agregado leve-pasta, e, com isso, são criados vazios na pasta depois de endurecida com a saída dessa água, reduzindo a qualidade da interface e ainda fazendo surgir o efeito parede, pois a superfície do agregado encontra-se com água, que diminui o aspecto poroso, característico da maioria dos agregados leves. Portanto, tem-se um comportamento semelhante ao que ocorre com os concretos tradicionais. E, ao utilizar agregados leves sem a pré-molhagem, esses podem, ao absorverem parte da água de amassamento que fica na interface, contribuir para diminuir o surgimento de vazios nos concretos endurecidos, reduzindo a zona de interface (ZHANG e GJORV, 1991; SARKAR *et al.*, 1992; KJELLSSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; ROSSIGNOLO, 2003; LO e CUI, 2004 e outros).

Uma metodologia adotada na literatura para fazer os estudos da zona de transição de agregados leves e pasta de cimento baseia-se na determinação dos teores dos elementos químicos, obtidos por meio dos perfis de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), e calculam-se os valores dos óxidos presentes. Esses, por sua vez, podem ser relacionados aos valores aproximados das composições dos principais produtos oriundos da hidratação do cimento (LACHOWSKI *et al.*, 1980; TAYLOR e NEWBURY, 1984; SARKAR *et al.*, 1992; KJELLSSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; ROSSIGNOLO, 2003).

Utilizam-se os valores percentuais das massas dos elementos de silício, cálcio, ferro, alumínio e enxofre identificados no EDS em pontos nesta região, e assim determinam-se a massa molecular dos principais óxidos presentes da hidratação do cimento: SiO_2 ; CaO ; Fe_2O_3 ; Al_2O_3 e SO_3 . Para isso, aplicam-se as expressões mostradas a seguir, que permitem indicar a presença dos produtos silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH), monossulfoaluminato de cálcio (AFm), associando os valores numéricos em função da quantidade de óxidos que os compõem (LACHOWSKI *et al.*, 1980; TAYLOR e NEWBURY, 1984; KJELSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; ROSSIGNOLO, 2003).

$$\begin{array}{lll} \text{CSH :} & 0,8 \leq \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \leq 2,5 & \frac{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)}{\text{CaO}} \leq 0,2 \\ \\ \text{CH:} & \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \geq 10 & \frac{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)}{\text{CaO}} \leq 0,04 \quad \frac{\text{SO}_3}{\text{CaO}} \leq 0,04 \\ \\ \text{AFm:} & \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \geq 4 & \frac{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)}{\text{CaO}} > 0,04 \quad \frac{\text{SO}_3}{\text{CaO}} > 0,15 \end{array}$$

Com base nas relações dadas nessas expressões, pode-se ter informações aproximadas de como os compostos da hidratação do cimento estão distribuídos dentro da matriz. Por exemplo, pode-se interpretar que, quando se tem o quociente entre os pesos atômicos dos óxidos de cálcio e de silício (CaO/SiO_2) entre 0,8 e 2,5, admite uma grande presença de CSH; quando esse quociente fica acima do valor de 4, tem-se AFm, e, quando ultrapassa o valor de 10, essa zona é rica em fases como CH, AFm e ainda etringita, havendo provavelmente baixos índices de CSH (TAYLOR e NEWBURY, 1984).

A presença da etringita (AFt) pode ser determinada de forma indireta e apenas qualitativamente, tomando como referência a presença do AFm que resulta da transformação da etringita, quando se esgota o gesso, e, portanto, a presença da etringita é indicada quando a relação SO_3/CaO está acima de 0,15 (VIEIRA, 2000; ROSSIGNOLO, 2003).

Existem certas restrições nos resultados obtidos, pois os espectros obtidos pelo EDS abrangem uma análise pontual de um volume de alguns micrômetros ($\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$), e os produtos das reações de hidratação do cimento variam numa grandeza de alguns nanômetros ($\text{nm}=10^{-9}\text{m}$), ou seja, tem-se naquele ponto da análise uma mistura de vários produtos de hidratação com diferentes tipos de composições (ROSSIGNOLO, 2003).

Mesmo assim, é um procedimento aceito pela literatura, usado para mensurar o comprimento da zona de transição pasta-agregado e conhecer as alterações ocorridas nessa

região. Essa mesma metodologia foi aplicada na presente tese para avaliar o comportamento da zona de transição entre o agregado de EVA e a matriz de cimento (subitem 5.3.1, letra c.).

2.4.4 Durabilidade

2.4.4.1 Ataque por cloretos

Esse tipo de ataque ocorre pelo transporte dos íons cloretos nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio, provocando rupturas localizadas da camada passivadora, desencadeando assim a corrosão da armadura (FIGUEIREDO e MEIRA, 2011). A ação de ataque dos cloretos é de alta agressividade, pois consegue fazer a despassivação da armadura mesmo com o pH elevado (HELENE, 1993).

Existem vários métodos de ensaios para analisar o transporte dos íons cloretos em concretos. Esses ensaios procuram, por exemplo, determinar a concentração do teor de cloretos totais ou livres, o seu coeficiente de difusão, a profundidade em que os íons cloretos transportam no interior do concreto, em qual intensidade e velocidade. Essa medida é definida por alguns pesquisadores por “frente de alcance dos íons cloretos” em analogia à “frente de carbonatação”.

Como o ataque por cloreto demanda prolongado tempo, muitas pesquisas têm optado por realizar ensaios acelerados, que adotam meios de migração no transporte de cloretos (MEDEIROS, 2008). Os ensaios podem ter um caráter quantitativo ou qualitativo.

Um exemplo de ensaio que permite determinar a concentração de cloretos é por meio da técnica de titulação potenciométrica. Nesse método, faz-se a medição da diferença de potencial com uso de um eletrodo. O procedimento consiste em fazer a titulação da solução analisada, ao mesmo tempo em que se faz a leitura dos valores dos potenciais. Quando o titulado for totalmente consumido, haverá uma alteração brusca da leitura do potenciômetro, o que indica o término da reação. Dessa forma, esse é considerado o ponto de equivalência. Conhecendo o consumo de cimento do concreto, esta técnica permite determinar a concentração de cloretos livres, através da norma ASTM C 114 (1994), e os cloretos totais pela norma ASTM C 1152 (1994), expressa em massa ou em volume de concreto.

São os cloretos livres na água que irão participar das reações de corrosão, entretanto, é de suma importância que os ensaios determinem os cloretos totais, pois aqueles cloretos que estão combinados poderão em outro momento tornarem-se livres e assim disponíveis para participar do processo de corrosão (PEREIRA e CINCOTTO, 2001).

Vários outros métodos são aplicados para realização do ensaio, além da técnica de titulação potenciométrica. Outro tipo de análise experimental, dessa vez de caráter qualitativo, é por meio da aspersão de nitrato de prata (AgNO_3) na superfície fraturada da amostra (FIGUEIREDO, 2011). Quando há íons cloretos na forma livre, a superfície será incolor, devido à precipitação do cloreto de prata (AgCl); quando não existem cloretos ou esses estão combinados, a cor da superfície será marrom, proveniente da presença do óxido de prata, que é formado da reação do AgNO_3 com as hidroxilas (OH^-) e degradação por causa da luz.

2.4.4.2 Ataque por sulfatos

Os mecanismos de ataques dos sulfatos podem atuar de forma física, química ou com a combinação de ambos (NEVILLE, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Neville (2004) cita duas linhas de pensamentos existentes na literatura, uma em que se define ataque por sulfatos, algo em que os sulfatos estejam envolvidos, independente que ocorra de forma física ou química; a outra teoria afirma que somente é considerado ataque por sulfato se ocorrerem reações químicas entre os íons sulfatos e a pasta de cimento hidratada, de modo que provoque alterações químicas. Esta tese concorda com o primeiro pensamento, ou seja, define-se o termo “ataque por sulfato” algo em que o sulfato esteja presente e provoque ações químicas ou físicas no concreto.

No ataque físico por sulfato, ocorre a cristalização do sal na estrutura do concreto que irá provocar variação volumétrica, devido à pressão dessa cristalização nos poros (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para Neville (2004), a forma predominante de ataque físico é por meio da transformação reversível do sulfato de sódio anidro (tenardita) em sulfato de sódio decaidratado (mirabilita), e, quando a cristalização dos sais ocorrer nos poros ou próximo à superfície do concreto, podem surgir pressões que provocam ações deletérias na estrutura.

No ataque químico, há o envolvimento do íon sulfato que irá reagir com os componentes das pastas de cimento endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As partes mais vulneráveis ao ataque por sulfato de sódio são o CH (que reage com o sulfato) e as fases do cimento que contêm alumina (C_3A). E, assim, parte da literatura afirma que as matrizes cimentícias com baixo teor de hidróxido de cálcio são menos vulneráveis ao ataque por sulfato, pois reduzem os íons hidroxila disponíveis para reação (AL- AL-

AMOUDI, MASLEHUDDIN e ABDUL-AL, 1995; NEVILLE, 1997; VEIGA e GASTALDINI, 2012).

Entre os vários efeitos que o ataque por sulfatos provocam no concreto estão a variação da resistência mecânica, a variação das dimensões e da massa, a variação no módulo de elasticidade dinâmica, a modificação na estrutura porosa e a alteração visual, sendo a variação da resistência mecânica o efeito mais agravante para os concretos, quando esta perda de resistência atinge às condições reais de aplicação da estrutura (TAYLOR, 1997). Porém, algumas pesquisas têm demonstrando que a resistência do concreto aumenta no início do processo de formação dos componentes expansivos derivados da reação por sulfatos de sódio, pois, nessa etapa, existem vazios suficientes para serem ocupados pelos cristais formados, e assim não surgem tensões internas danosas ao concreto, deixando-o mais denso, podendo assim proporcionar aumento na resistência (GONZÁLEZ e IRASSAR, 1998; MOUKWA, 1990; SAHMARAN *et al.*, 2007). A literatura tem demonstrado que tal comportamento ocorre tanto com a resistência à compressão como com a resistência à tração, em que as amostras submetidas a soluções de sulfatos possuem um aumento em sua resistência no primeiro momento do ensaio, devido à cura dos poros serem preenchidos e, em seguida, podem sofrer uma queda em suas resistências provocada pelo efeito da expansão.

Em sua pesquisa, Sahmaran *et al.* (2007) avaliaram vários tipos de misturas nos cimentos, por meio de corpos-de-prova de argamassas submetidos à solução de sulfatos. Verificou-se que, nas 26 semanas iniciais, os sulfatos não afetaram as amostras. Dessa forma, a hidratação do cimento continuou, gerando ganhos de resistência em todas as amostras, mesmo na presença do sulfato. Porém, depois dessa data, as amostras com cimento comum começaram a perder resistência, com a formação de etringita, que ocasionou expansão nos concretos. Entretanto, as amostras que utilizaram cimentos resistentes a sulfatos continuam ganhando resistência até o final do experimento.

A variação dimensional pode acontecer em forma de expansão, associada principalmente à formação da etringita no concreto endurecido (COLLEPARDI, 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2008). A expansão volumétrica pode surgir também por meio de um processo físico, devido à cristalização dos sais nos poros do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A expansão ocorre em dois estágios: o primeiro estágio é o período de indução e acontece lentamente; o segundo estágio é caracterizado pelo crescimento mais rápido da expansão, no momento em que o volume dos elementos expansivos formados não cabem mais

nos poros dos concretos e argamassas, gerando assim pressões em suas paredes (SANTHANAM, COHEN e OLECK, 2002; SCHMIDT *et al.*, 2009). Com o passar do tempo, a expansão irá gerar fissuras, que, por sua vez, poderão, em um determinado instante, comprometer a resistência.

Para a realização dos processos de ensaios, têm-se adotado os procedimentos dos ensaios acelerados que se utilizam de vários meios de ações, como reagir o cimento anidro com o sulfato; aumentar a superfície de reação dos corpos-de-prova; forçar a cristalização dos sais por evaporação, com ciclos de umidade e secagem; aumentar a concentração da solução agressiva; e aumentar a temperatura da solução agressiva (SOUZA, 2006).

Entre as várias normas de ensaios acelerados existentes, as mais utilizadas são: ASTM C1012 (2004) - *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution* e o ASTM C452 (2006) - *Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate*. No Brasil, existe a NBR 13583 (ABNT, 1996) - *Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio*.

O motivo pelo qual essas normas prescrevem que as amostras sejam em corpos-de-prova de argamassa é porque o objetivo principal de suas metodologias é analisar a resistência química do cimento. Porém os ensaios também se aplicam para corpos-de-prova em concreto, argamassa ou pasta, contanto que a agressão nas amostras de pasta ou argamassa não deve ser tão elevada quanto à existente nas amostras de concreto, devido à ausência das interfases pasta-agregado miúdo e graúdo, onde se localiza a parte mais suscetível à degradação (KAYYALI, 1989).

Uma crítica às normas de ensaio acelerado trata sobre a falta de controle do pH durante o ensaio. O ideal seria manter o pH da solução de ataque constantemente baixo, em condição de acidez, para colaborar com o mecanismo de ataque na realização do ensaio (BROWN, 1981; FERRARIS *et al.*, 1997). Há críticas em relação ao ensaio do ASTM C1012 (2004) e outras normas, pois, apesar de estipular o pH baixo na preparação da solução, não há nenhum critério para manter o pH da solução durante o período da realização do ensaio. Como se sabe, logo após o contato das amostras com a solução, há um aumento do pH para aproximadamente 12, devido à lixiviação de álcalis do concreto para a solução.

Em sua pesquisa, Brown (1981), ao analisar três situações com soluções mantendo o pH em 6,5, 10,0 e 11,5 e outra solução com pH livre, as amostras que obtiveram menores resistências ao ataque por sulfatos foram as submetidas a soluções de menor pH. Uma

alternativa para manter as amostras em soluções de pH baixo é ficar sempre renovando a solução a cada leitura (FERRARIS et al., 1997). Pode-se também fazer titulação contínua de H_2SO_4 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A maioria das pesquisas analisam os efeitos do ataque por sulfatos quanto à perda de resistência e ao surgimento de expansão linear (BONAKDAR e MOBASHER, 2010). São ensaios realizados, principalmente, em corpos-de-prova de argamassa, e muitos adotam ensaios de resistência à tração como indicador de degradação, por demonstrar ser mais sensível do que resistência à compressão (IRASSAR, 1990). Porém, alguns pesquisadores preferem avaliar diretamente suas amostras em corpos-de-prova de concreto (OSBORNE, 1990; SILVEIRA, 1996; BRETANHA, 2000; MOURA, 2000; COSTA, 2004). Quando se aplica o ataque em amostras feitas de pasta ou argamassa, não se tem o mesmo comportamento para amostras de concreto, devido ao efeito da zona de transição pasta-agregado (COHEN e MATHER, 1991).

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

O agregado de EVA pode ser classificado como um produto alternativo de propriedade com duplo benefício ao meio ambiente, pois sua incorporação no concreto irá evitar que o resíduo de EVA seja eliminado na natureza e também diminuirá o uso e extração de agregados naturais na composição dos concretos.

Assim, como a maioria dos polímeros, o resíduo de EVA tem longa durabilidade, e consequentemente o agregado de EVA é um material de boa resistência à degradação, sendo o polietileno a parte inerte do composto, e a fase acetato de vinila é que tem possibilidade de sofrer algum desgaste. Entretanto, o teor de acetato de vinila presente no agregado é de, no máximo, 28% em massa, o que minimiza os efeitos prejudiciais de degradação no agregado.

A incorporação desse agregado no concreto fornece propriedades diferentes do concreto convencional, e, com base nas conclusões obtidas pela literatura, são concretos mais leves, mais porosos e consequentemente têm sua resistência reduzida, na medida em que se elevam os teores de resíduos em sua composição. Os principais efeitos ocasionados pela presença do agregado de EVA nos concretos, comparados aos concretos convencionais, estão apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Efeitos do uso do agregado de EVA nas propriedades do concreto em relação ao concreto convencional (elaborado pelo autor)

Propriedades	Efeitos
Condições de trabalhabilidade (plasticidade)	Aumenta
Massa específica	Diminui
Fator de eficiência	Diminui
Resistência à compressão	Diminui
Resistência à tração	Diminui
Absorção de água	Aumenta
Módulo de deformação	Diminui
Desempenho acústico	Equivalente
Desempenho térmico	Aumenta
Desempenho estrutural	Diminui
Desempenho estrutural em situação de incêndio	Indefinido

Os estudos que abordam a reciclagem do resíduo de EVA na construção civil, apesar do número ainda incipiente de pesquisas, sugerem existir boa viabilidade técnica do uso desse “novo material de construção”. As principais aplicações que as pesquisas existentes apresentam para o uso do agregado de EVA em concretos são para fins de obtenção de blocos de vedação, blocos de piso, concreto betuminoso e concreto leve. A maioria das pesquisas tem estudado, principalmente, as propriedades de resistência mecânica dos concretos obtidos (Quadro 2.2).

Por se tratar de material alternativo (agregado de EVA) que será incorporado ao concreto que faz parte do sistema construtivo, torna-se indispensável conhecer os efeitos que a presença deste agregado possa causar nas propriedades de durabilidade do concreto.

Alguns conhecimentos a respeito desses possíveis efeitos causados ao concreto com a presença do EVA ainda estão em aberto, e seu entendimento precisa ser mais ampliado, como pesquisar sobre as propriedades desses compósitos para dosagens em diferentes proporções para os traços apresentados na literatura, variando as combinações dos agregados entre si, para que se obtenham misturas com melhores fatores de eficiência. Precisam, ainda, ser desenvolvidos estudos sobre a durabilidade desses concretos, para que se possam ter conclusões mais completas das condições de uso desse material.

O programa experimental que será apresentado a seguir busca colaborar no avanço desses estudos.

Quadro 2.2 – Principais pesquisas realizadas sobre a reciclagem do resíduo de EVA na construção civil (elaborado pelo autor)

Pesquisador	Ano	Tipo material	Tipo/dimensão amostra	Traços de destaques / Resistência	Principais propriedades avaliadas
Garlet,	1998	Concreto leve não estrutural	CP (5x10)cm Bloco (14x19x39)cm	1:5 (cim:agregados, em volume) 40% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ com TT. F_c (CP) = 1,92MPa F_c (bloco) = 0,81MPa	- Resistência à compressão; - Isolamento acústico(d.B.(A)):sem revest.=15 / com=41,5; - absorção: material poroso; - colonização por fungos: não suscetível.
Bezerra	2002	Concreto leve não estrutural para blocos de vedação	CP (5x10)cm Bloco(9x19x39)cm	1:3 (cim:agregados, em volume) - com 70% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ com TT tem-se F_c (bloco) = 2,41 MPa; - com 60% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ sem TT tem-se F_c (bloco) = 1,60 MPa.	- Resistência à compressão; - Absorção de água dos blocos: média de 10% (atende à norma para bloco de concreto).
Pimentel	2005	Concreto leve não estrutural para blocos de vedação	Bloco (11,5x26,5x59)cm Painéis (1,20x2, 60)m	1:3 (cim:agregados, em volume) com 80% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ F_c (bloco) = 0,92MPa F_c (painel) = 0,92MPa	- Resistência à compressão; - Absorção de água dos blocos: média de 14,52% (não atende à norma para bloco de concreto); - Medição dos deslocamentos verticais painéis: grandes deformações no sentido da aplicação da carga.
Polari Filho	2005	Concreto leve não estrutural para blocos de vedação	CP (5x10)cm Bloco (9x19x39)cm Painéis (1,20x2, 60)m	1:5 (cim:agregados, em volume) com 60% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ F_c (CP) = 2,39MPa F_c (bloco) = 1,32MPa	- Resistência à compressão dos blocos isolados e dos painéis.
Lyra	2007	Concreto para blocos de pavimento	Bloco intertravado p/ pavimentos em passeios públicos (10x9x24,5)cm	1:4 (cim:agregados, em volume) com 27% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ F_c (bloco) = 25,3MPa	- Resistência à compressão dos blocos.
Rocha	2008	Concreto leve não estrutural para blocos intertravados de vedação	Bloco (12,5x25x25)cm Prismas Paredes (1,20x2,60)m	1:5 (cim:agregados, em volume) com 80% de EVA, $D_{máx}=9,5\text{mm}$ F_c (bloco) = 1,19 MPa F_c (prisma) = 0,84MPa F_c (painel) = 0,48MPa	- Resistência à compressão dos blocos e paredes; - Medição dos deslocamentos verticais e de flambagem das paredes: grandes deformações no sentido da aplicação da carga; - Custo: consumo cimento do traço de destaque 315kg/m ³ .
Lima Filho	2008	Blocos EVA proposto por Polari Filho (2005)	Protótipo	Utiliza o traço proposto por Polari Filho (2005) para execução do protótipo.	- desempenho estrutural, quanto às deformações devido à: cargas provenientes de peças suspensas: satisfatório; fechamento brusco de portas: positiva; impacto por corpo duro e por corpo mole: positiva.
Santiago Lima, Leite e Santiago	2008	Concreto leve Estrutural com e sem RCD	CP's cilindro(10x20)cm prismático(15x15x50)cm	1:4 (cim:agregados, em massa), $\alpha:53\%$ - com 25% de EVA ($D_{máx}=9,5\text{mm}$) e 25% de RCD (em volume em relação aos agregados graúdos), $F_c = 17,7\text{MPa}$	- Resistência à compressão; - resistência à tração na flexão e por compressão diametral; - módulo de deformação.
Saoula et al.	2009	Concreto betuminoso	CP cilindro (10,16x6,35)cm	5% em EVA virgem mais 2% resíduo de EVA em relação ao peso do betume.	- avaliação do desempenho e do comportamento mecânico do concreto betuminoso = satisfatório.

Obs: TT = tratamento térmico

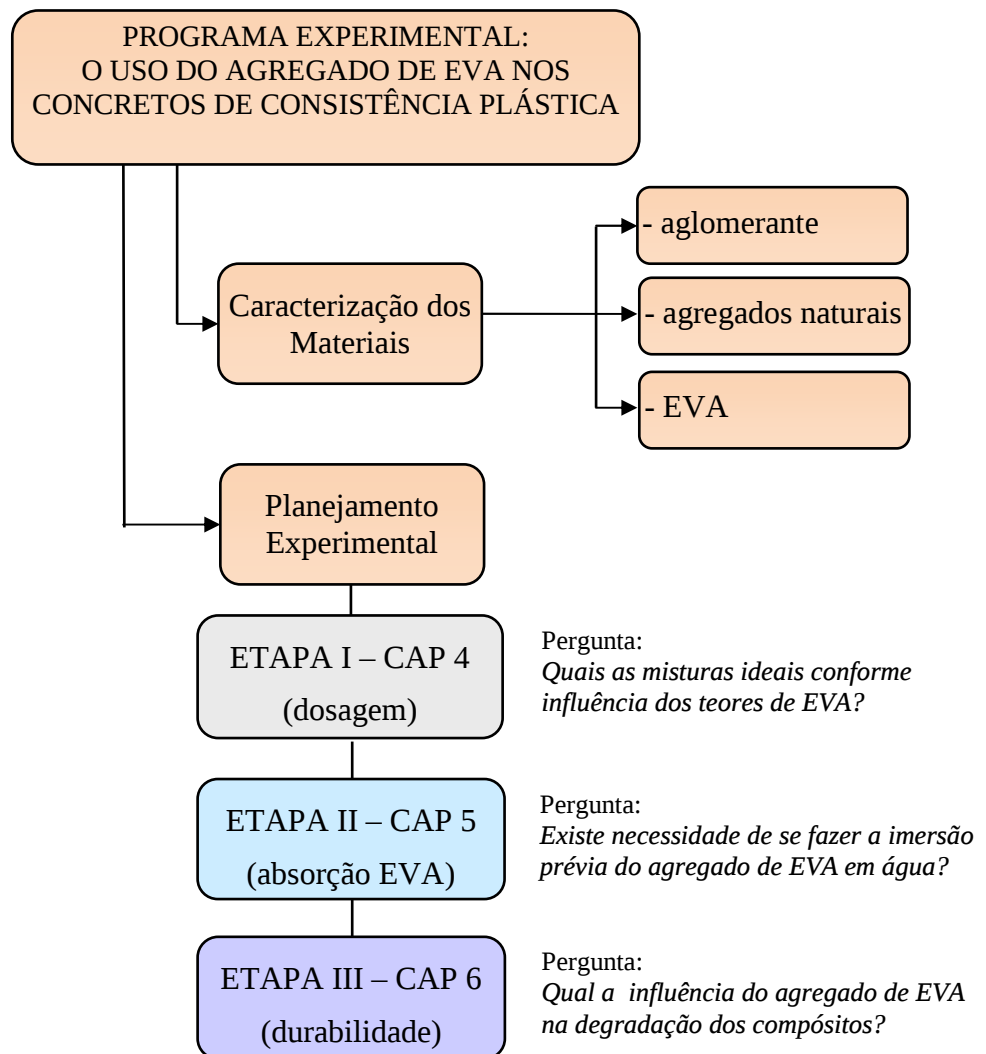
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

O programa experimental desta pesquisa tem a finalidade de atender aos objetivos por ela propostos, ou seja, analisar quais as influências da incorporação de resíduo de EVA da indústria de calçados nas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e na durabilidade dos concretos de cimento Portland de consistência plástica.

O resumo esquemático da estruturação do programa experimental está mostrado no Diagrama 3.1.

Diagrama 3.1 – Estruturação do Programa Experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nas misturas estudadas foram:

- aglomerante de cimento Portland;
- areia grossa (de rio), retirada da região conhecida como Nossa Senhora do Ó, nas proximidades da cidade do Recife-PE;
- areia muito fina, retirada das proximidades da cidade de João Pessoa-PB;
- brita $D_{máx}$ (dimensão máxima característica) de 9,5mm (brita nº0) origem granítica, obtida nas proximidades de Jaboatão dos Guararapes-PE;
- agregado de EVA com $D_{máx}$ igual a 9,5mm, obtido a partir da trituração de resíduo coletado de uma indústria de calçados da cidade de João Pessoa-PB;
- água potável fornecida pela companhia de abastecimento de Recife-PE.

3.2.1 Aglomerante

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP V- ARI. Sua escolha se deu por ser o cimento comercializado na região que possui o menor teor de adições, maior teor de clínquer em sua composição, segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991). Portanto, possui menor interveniência nos resultados, se comparado aos demais tipos de cimentos Portland.

3.2.1.1 Análises físicas

Na Tabela 3.1, são apresentadas suas principais características físicas do cimento.

Tabela 3.1 – Características físicas do cimento utilizado.

Ensaio Físico	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Massa específica	3,10 g/cm ³	-
Finura Malha nº 200	0,13%	≤ 6,0%
Finura Malha nº 325	2,21%	-
Área Específica (Blaine)	4.197 cm ² /g	≥ 3.000 cm ² /g
Tempo de início de Pega	146 min	≥ 60 min
Tempo de fim de Pega	209 min	≤ 600 min
Expansibilidade a quente	1,24 mm	≤ 5,00mm

FONTE: Fabricante do cimento MIZU.

Os resultados estão dentro dos limites especificados pela NBR 5733 (ABNT, 1991), que trata exclusivamente dos parâmetros do cimento Portland de alta resistência inicial.

3.2.1.2 Análises químicas

A composição química do cimento foi determinada por meio da fluorescência de raios X, expressos em porcentagem de peso, determinados de forma semi-quantitativamente. No ensaio, foi usado um espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo RIX 3000.

A amostra foi seca em estufa a 110°C. Parte dela foi retirada para determinação de perda ao fogo. Para isso, ficou em uma mufla, a 1000°C, por um período de 2 horas. Outra porção da amostra seca foi colocada em cápsula apropriada e submetida a uma carga de 25.000Kgf, formando partilhas para análise semi-quantitativa dos seus elementos. O ensaio não consegue detectar os elementos com número atômico abaixo de 8 (nitrogênio e seus antecessores da tabela periódica).

Na Tabela 3.2, são apresentados os elementos detectados por meio da análise química por fluorescência de raios-X. Como é de se esperar, o cimento é formado por muitos compostos, mas, desses detectados pelo espectrômetro de raios X, os mais comuns são óxidos de cálcio, sílica e ferro.

Tabela 3.2 – Composição química do cimento obtida pelo ensaio de fluorescência de raios-X

Composição química	Teores (%)
SiO ₂	11,2
Al ₂ O ₃	2,8
Fe ₂ O ₃	4,3
CaO	74,5
MgO	0,8
SO ₃	4,4
K ₂ O	1,0
Na ₂ O	0,1
P ₂ O ₅	0,1
TiO ₂	0,4
MnO	0,1
SrO	0,1
ZrO ₂	nd
CuO	nd
V ₂ O ₅	nd
Perda ao fogo	0,3

Esse cimento, assim como os demais tipos de cimento, apresenta a maior porcentagem composta por óxido de cálcio (74,5%). O teor de óxido de magnésio (0,8%) ficou bem abaixo dos 6,5% estabelecidos como limite máximo pela NBR 5733 (ABNT, 1991), pois o excesso poderia causar retardo na hidratação, devido a sua forma cristalina, ocasionando assim fissuras, ao expandir-se dentro do concreto já endurecido.

A perda ao fogo indica a diminuição de massa do cimento após aquecimento, registrada pela saída do dióxido de carbono (CO_2), devido principalmente à degradação do fíler calcário e ainda à saída da água do gesso. Quando a perda ao fogo é muito elevada, poderá ser devido a uma maior presença de água, sendo indícios de hidratação do cimento.

Enfim, com base na análise de fluorescência, pode-se afirmar que o cimento utilizado está de acordo com as exigências da norma para classificação como cimento de alta resistência inicial.

As discussões da bibliografia demonstram que um dos mecanismos de suscetibilidade ao ataque por sulfatos é o uso de cimentos com baixos teores de C_3A (NEVILLE, 1997). Esse cimento utilizado possui baixo teor de Al_2O_3 e uma quantidade de Fe_2O_3 relativamente elevada, e isso o garante possuir uma boa resistência ao ataque por sulfato, devido a pouca presença do C_3A e do C_4AF [pelo método de Bogue $\text{C}_3\text{A}=2,65x(\text{Al}_2\text{O}_3)-1,692x(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ e o $\text{C}_4\text{AF}=3,0432x(\text{Fe}_2\text{O}_3)$]. Com isso, diminui a possibilidade de reação e reduz a formação da etringita tardia na pasta.

Portanto, as diferenças de suscetibilidade ao ataque por sulfatos entre os concretos sem EVA (amostra de referência) e com EVA e entre os concretos com teores variados de EVA não serão função do teor de C_3A total presente na matriz de cimento. Pretende-se, com isso, quando da realização do ensaio acelerado com sulfato, que as possíveis variações diferenciadas no comportamento das amostras possam provocar expansão (variação dimensional é um dos principais efeitos do ataque por sulfato) e ainda alguma variação da resistência e da massa, sejam mais atribuídas ao ataque físico, tal como sulfato de cristalização. Sendo assim, espera-se que se possa avaliar, excepcionalmente, o que e o quanto a presença do teor de EVA interfere nas condições de ataque.

3.2.2 Agregados naturais

3.2.2.1 Análises físicas

A opção por utilizar dois tipos de areia tem como objetivo ajudar na melhoria da distribuição das curvas granulométricas, para que a mistura entre os materiais possa obter boa compacidade. O uso de agregados com várias faixas granulométricas faz com que os grãos de um material sejam preenchidos pela fração correspondente do outro, numa sequência de eventos, como segue:

- os vazios entre os grãos dos agregados com $D_{\text{máx}} = 9,5 \text{ mm}$ (brita 0 e EVA) sejam preenchidos pelos grãos do agregado da areia grossa com $D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$;
- os vazios entre os grãos dos agregados com $D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$ sejam preenchidos pelos grãos da areia fina com $D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$;
- os vazios entre os grãos da areia com $D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$ sejam preenchidos pela fração de grãos do aglomerante.

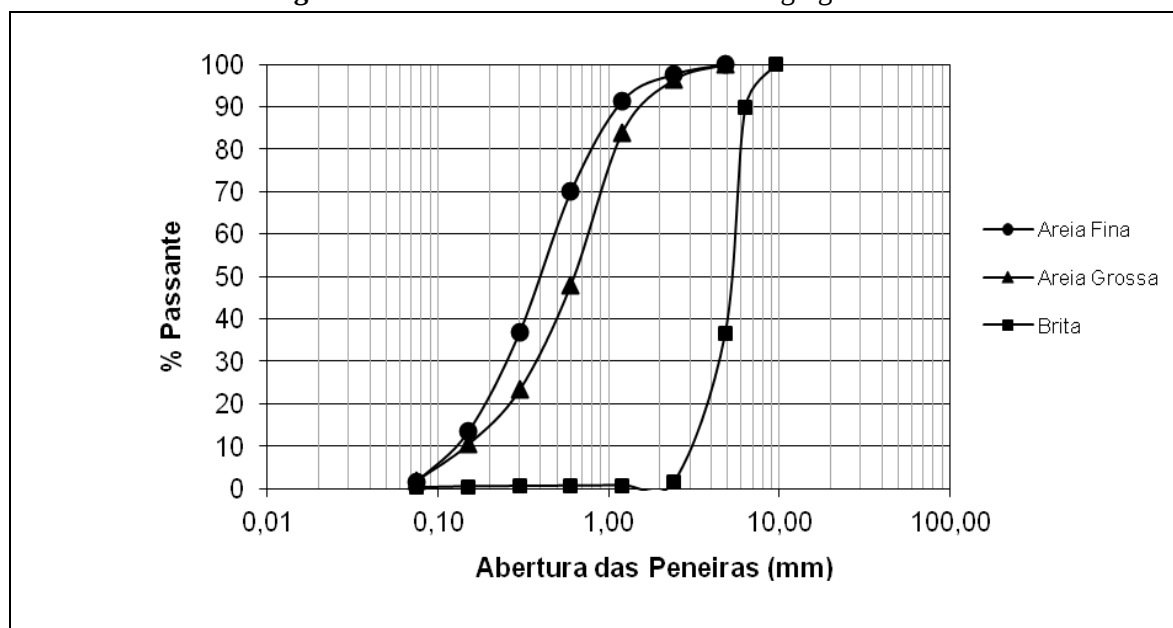
As principais propriedades físicas dos agregados naturais utilizados na pesquisa estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas dos agregados naturais utilizados.

Propriedades	Areia Fina	Areia de rio	Brita 0
Massa específica - kg/dm^3 (NBR NM 52/09 e 53/09)	2,65	2,62	2,78
Massa unitária estado solto- kg/dm^3 (NBR NM 45/06)	1,58	1,53	1,35
Dimensão máxima característica - mm	2,4	4,8	9,5
Módulo de finura	1,91	2,38	5,57
Coefficiente de Inchamento	-	1,35	-

Suas curvas granulométricas são mostradas na Figura 3.1. Os agregados naturais têm uma distribuição uniforme, presença de um mesmo diâmetro no eixo % passante. A junção dos agregados melhora essa distribuição.

Figura 3.1 – Curvas Granulométricas dos agregados naturais.



3.2.3 Agregado artificial - EVA

3.2.3.1 Análises físicas

O agregado de EVA, utilizado na pesquisa, foi obtido por meio do procedimento adotado na literatura, como segue: os resíduos de EVA foram coletados no pátio e no galpão de estocagem da indústria e levados para o laboratório, em seguida, triturados em um moinho de facas rotativas para a obtenção de agregado artificial, com granulometria pré-definida de diâmetro máximo da partícula de 9,5 mm (granulometria sugerida por meio de pesquisas anteriores, levando-se em consideração condições de trabalhabilidade, resistência mínima e fatores econômicos). O agregado de EVA foi submetido aos seguintes ensaios de caracterização física, conforme especificados no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Ensaios de caracterização física do agregado de EVA e as suas respectivas normas.

Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248/2003
Determinação da massa unitária	NBR NM 45/2006
Determinação da absorção de água	NBR 7923/2007. Adaptação do procedimento aplicado ao poliestireno expandido para fins de isolamento térmica.
Determinação da massa específica	Adaptação do procedimento adotado por Leite (2001)

Os ensaios para determinação da composição granulométrica e para determinação da massa unitária foram realizados conforme especificações das normas que regulamentam os materiais naturais, a NBR NM248/2003 e a NBR NM45/2006, respectivamente.

Por ser um material alternativo, sem normas específicas de caracterização, e devido ao produto ser mais leve que a água, realizaram-se algumas adaptações para possibilitar a realização dos ensaios de determinação da absorção de água e da massa específica.

a) Determinação da absorção de água

A determinação da absorção de água por imersão foi adaptada da norma Poliestireno expandido para isolamento térmica (ABNT, 7973/2007), como descrita a seguir (procedimento):

- deixou-se a amostra em ambiente por, no mínimo, 40h à temperatura $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa. Pesou-se 50g da amostra (M_s). Colocou-se a amostra no cesto formado por duas peneiras de malha 0,075mm e a imergiu sob uma coluna de água de $50 \pm 1\text{mm}$ pelo período de 5 minutos. Passado este período, retirou-se a amostra do recipiente,

colocando em uma tela com malha de 0,075mm ao ar livre, na posição de 30° em relação à posição vertical por um período de 15 ± 1 min, para drenagem da água excessiva da superfície. A seguir, pesou-se a amostra e anotou-se como $M_{sat}(5min)$. Retornou-se a amostra para o cesto, imergindo novamente em água, repetindo-se o mesmo procedimento para os seguintes períodos totais de imersão: 10min; 20min; 30min; 60min; 24h. Anotou-se as respectivas M_{sat} : ($M_{sat}(10min)$; $M_{sat}(20min)$; $M_{sat}(30min)$; $M_{sat}(60min)$; $M_{sat}(120min)$; $M_{sat}(24h)$; $M_{sat}(2 \text{ dias})$; $M_{sat}(3 \text{ dias})$..., continuando com o ensaio, até estabilização da massa).

Durante o ensaio, percebeu-se que ficava água entre as aberturas da malha da peneira e entre os grãos do agregado, aderida por capilaridade e que não era drenada. Esse volume pode fazer diferença no resultado, mascarando assim o verdadeiro valor da absorção. Então, para evitar que essa água entre nos cálculos, permitiu-se passar de forma suave um pano no fundo da peneira pela parte de baixo para retirada da água não absorvida e não drenada por gravidade.

Obteve-se então o resultado com a média de cinco amostras, sendo a absorção o valor registrado no momento de 24h de imersão (equação 3.1).

$$Absorção = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (\text{equação 3.1})$$

Onde: M_{sat} = massa da amostra saturada para cada período (gramas)
 M_s = massa da amostra seca (gramas).

Além do ensaio com as amostras de agregado de EVA (descrito acima), determinou-se também a absorção de amostras formadas por uma peça inteira de palmilha. Na Figura 3.2, estão apresentadas as formas com que as do tipo agregado de EVA e as do tipo peça inteira foram forçadas a ficar submersas em água para a realização do ensaio de absorção.

Figura 3.2 – Ensaios de absorção de água nas amostras de EVA, com artifícios que forcem a amostra ficar imersa em água.

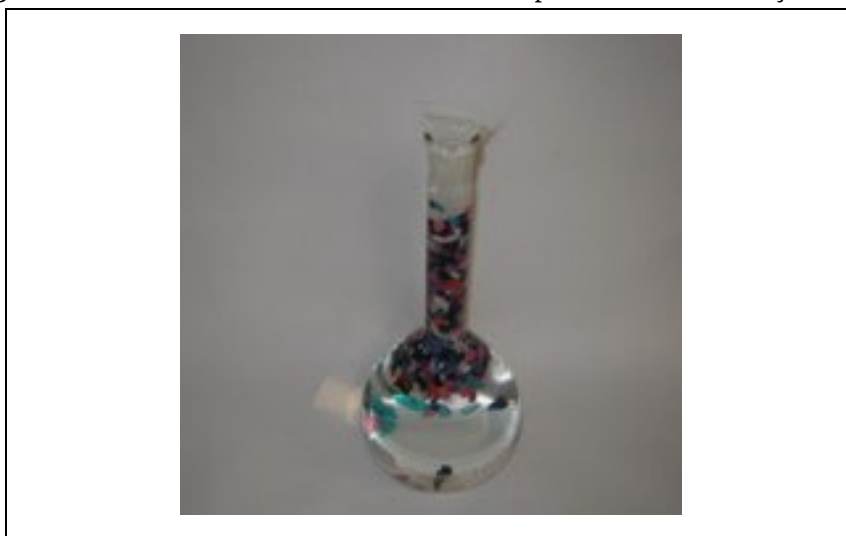


b) Determinação da massa específica

Para a realização deste ensaio, também foi necessário fazer um artifício para forçar que o material fique imerso em água. Assim, a metodologia adotada seguiu uma adaptação do método proposto por Leite (2001), que especifica um método para realizar ensaios de massa específica de agregados reciclados, obtidos por meio da adaptação do método que determina a massa específica de agregados leves proposto por Neville, conforme procedimento a seguir:

- separou-se 30g de amostra, pesada após secar em estufa por 24 horas a uma temperatura de 40°C, tem-se o M1; depositou-se o material em um recipiente tipo balão com capacidade e dimensão compatíveis com o volume e diâmetro máximo da amostra; fixou-se na abertura de entrada do frasco uma tela de malha sintética, de forma a fazer um bulbo, servindo de barreira para forçar a imersão do material em água; encheu-se por total o recipiente com água e deixou o conjunto em repouso por 24 horas, para procedimento de absorção; a cada 24 horas, fizeram-se movimentos de agitação no conjunto, de forma manual, para eliminação de bolhas de ar, e fez-se a complementação do recipiente com água, deixando sempre o material totalmente imerso (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Amostra de EVA imersa em balão para ensaio de absorção de água.



Quando a amostra preencheu os poros com água (variação de massa estabilizado, determinado pelo ensaio de absorção foi de 24 dias), aos 24 dias do início do ensaio, determinou-se a massa do conjunto (recipiente+amostra+água+tela), tem-se M2. Fez-se a pesagem do conjunto (recipiente+água+tela), determina-se M3.

Obteve-se então o resultado por meio da média de cinco amostras, sendo a massa específica determinada pela equação 3.2, expressa em Kg/dm³ ou g/cm³:

$$MassaEspecífica = \frac{M1}{M3 - (M2 + M1)} \quad (\text{equação 3.2})$$

Onde: *M1* = massa da amostra seca em estufa (gramas)

M2 = massa do recipiente+amostra+água+tela (gramas)

M3 = massa do recipiente+água+tela (gramas).

Na Tabela 3.4, estão apresentados os resultados das principais propriedades físicas do agregado de EVA. O valor apresentado demonstra a baixa densidade do agregado de EVA, sendo enquadrado como um dos agregados mais leves que existem.

Tabela 3.4 – Propriedades físicas do agregado de EVA utilizado.

Propriedades	EVA
Massa unitária em estado solto	*0,156 kg/dm ³
Massa específica	*0,686 kg/dm ³
Dimensão máxima característica	9,5 mm
Módulo de finura	5,30
Absorção de água após 24 horas da amostra agregados	48,2%
Absorção de água após 24 horas da amostra peça inteira	5,9%
Absorção de água até saturação da amostra agregados	218,62%
Absorção de água até saturação da amostra peça inteira	11,5%

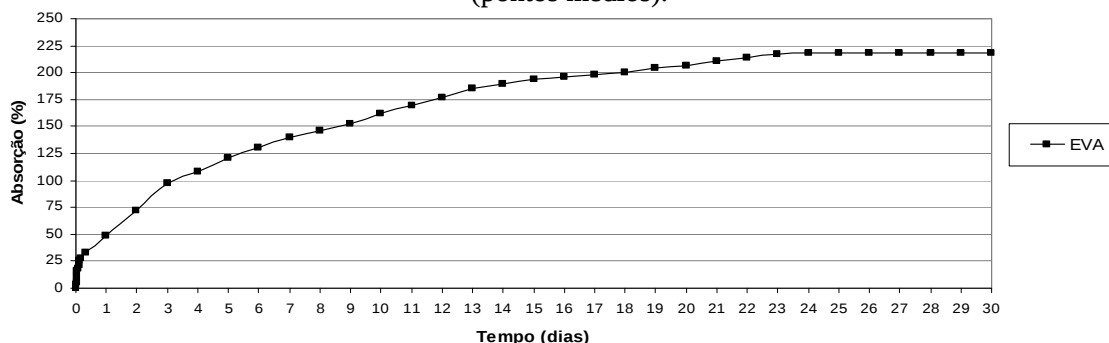
Nota: * o valor apresentado é uma média das amostras de EVA utilizadas. Esses valores sofrem variações diferenciadas, conforme a densidade das mantas de origem, que alteram de acordo com o seu processo de fabricação.

Na Tabela 3.5 e Figura 3.4, estão apresentados os valores médios da absorção das amostras do agregado de EVA até se conseguir a estabilização do processo.

Tabela 3.5 – Valores médios da absorção de água do agregado de EVA, realizado a partir da adaptação da norma para Poliestireno.

Tempo (minutos)	Absorção (%)	Tempo (dias)	Absorção (%)	Tempo (dias)	Absorção (%)	Tempo (dias)	Absorção (%)
0	0	2	72,2	13	185,0	24	218,6
5	3,4	3	97,0	14	189,8	25	218,0
10	5,2	4	108,2	15	194,2	26	218,2
15	10,4	5	120,6	16	196,0	27	218,4
20	16,2	6	130,4	17	198,6	28	218,6
30	18,2	7	139,8	18	200,0	29	218,6
40	21,2	8	146,0	19	204,2	30	218,6
50	25,4	9	152,2	20	206,8		
60	27,4	10	162,2	21	211,2		
120	33,2	11	170,0	22	214,2		
360 (24h)	48,2	12	176,4	23	216,8		

Figura 3.4 – Curva absorção de água do agregado de EVA até estabilização do processo (pontos médios).



O valor médio da absorção de água durante 24 horas nas amostras tipo agregados foi de 48,2%, sendo este o valor da absorção calculado para norma. Esse está próximo do valor encontrado por Santiago (2008), que foi de 44,3%. Em sua pesquisa, Santiago (2008) utilizou a metodologia de ensaio da absorção de água dos agregados naturais, e os resultados das duas pesquisas foram parecidos, devido ao procedimento acrescentado, no presente estudo, para retirada da água não drenada. Porém, há variação deste valor de uma amostra para outra.

O agregado de EVA continua absorvendo água e só consegue estabilizar em aproximadamente 24 dias, atingindo 218,6% de absorção.

Com a realização do ensaio para amostra sendo uma peça inteira de palmilha, ou seja, sem cortes e sem passar pelo processo de trituração para obtenção do agregado, o valor da absorção em 24 horas passou de 48,2% (amostra de agregado) para 5,9%. E a saturação dessa amostra ocorreu aos 15 dias de imersão, com a média de absorção no valor de 11,5%.

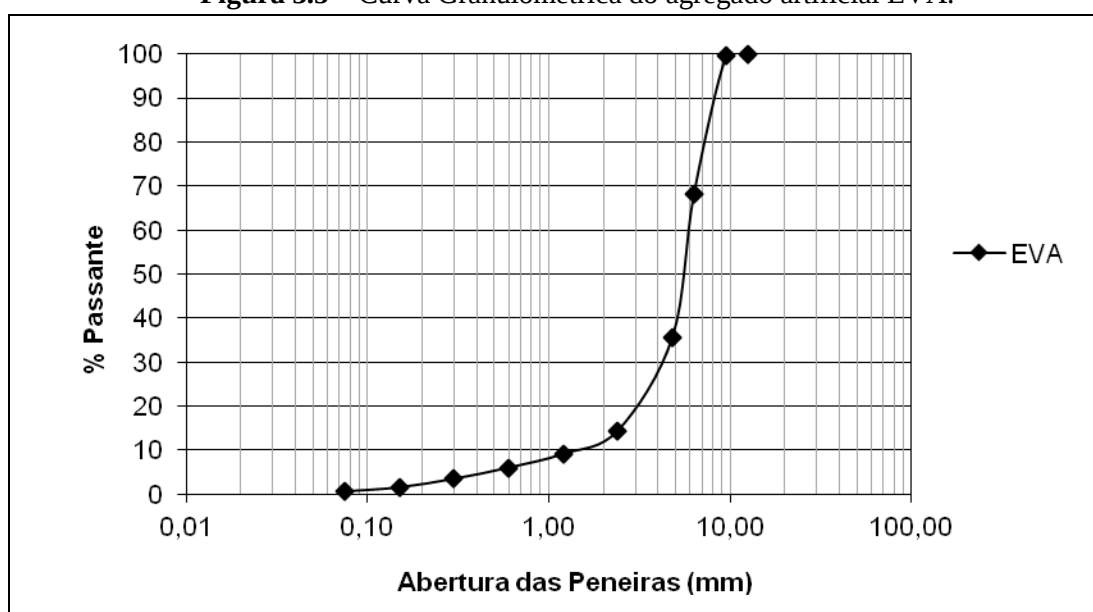
A explicação da discrepância entre os valores, quando se utiliza amostras do tipo peça inteira e amostra do tipo agregados, é devido à utilização de uma amostra com menor superfície específica, mas também por causa da maior presença de superfície de pele que existe na amostra inteira. Pelo fato de a superfície de pele ser mais densa (CHÁVEZ, 2007), há uma maior dificuldade de absorção da água.

Assim, pode-se entender que, em duas amostras de agregados de EVA de mesma granulometria, sendo a primeira formada com maior área de superfície dos grãos composta de pele (parte mais densa da manta de EVA formada junto ao molde), e a segunda formada com maior área de superfície dos grãos composta pela parte interna da manta, haverá menor absorção de água na situação da primeira amostra e, conseqüentemente, maior absorção de água na segunda. Esse fator explica a variação dos valores da absorção de água encontrados para as amostras de EVA, e torna-se praticamente inviável se fixar um valor da absorção de água de amassamento que o agregado de EVA irá sofrer quando incorporado à mistura.

Como no agregado tem-se valor muito elevado de absorção de água, deve-se, entretanto, averiguar como isso poderá influenciar quando o EVA estiver no interior do compósito. Essa análise é abordada no capítulo 5.

A curva granulométrica do agregado de EVA está mostrada na Figura 3.5. O valor da dimensão máxima foi de 9,5mm, o mesmo da classificação comercial para uma brita tipo 0, e isso foi obtido a partir da abertura da peneira de saída do moinho triturador, como já foi explicado. A posição de sua curva granulométrica quase sobrepõe à curva do agregado natural brita 0, e seus módulos de finura também são parecidos, assim ambos agregados (EVA e brita 0) possuem semelhantes composições granulométricas.

Figura 3.5 – Curva Granulométrica do agregado artificial EVA.



3.2.3.2 Análises químicas

Foi realizada uma Análise Química Elementar com o ensaio de nitrogênio total, carbono total, hidrogênio total e enxofre total, seguindo a metodologia da norma ASTM D 5291 (ASTM,2002). Para isso, utilizou-se um equipamento analisador elementar CHNS–O, modelo EA1110, da CARLO ERBA (CE Instruments).

Como forma de averiguar possíveis alterações entre os resíduos coletados na indústria, foram feitas quatro determinações, com amostras de cores diferentes (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Análise química elementar do agregado de EVA.

Amostras	Nitrogênio (%)	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Enxofre (%)
Cor rosa	0	58,74	11,17	0
Cor azul	0	61,21	10,77	0
Cor branco	0	56,77	10,64	0
Cor preto	0	59,04	11,10	0

As amostras são compostas com grande percentual de carbono e hidrogênio, o que já era esperado por se tratar de um polímero. Os valores dos elementos básicos, carbono e hidrogênio, das porcentagens entre as diferentes amostras ficaram próximos, demonstrando assim a existência da mesma matriz polimérica entre os resíduos. Um dado importante é o valor 0% de enxofre, indicando que não foi utilizado o enxofre como agente de reticulação. Quando se utiliza EVA, o processo de reticulação nunca pode ser com enxofre, pois os dois não se combinam, sendo necessária a aplicação de cura peroxídica.

3.2.3.3 Análises da microestrutura

a) Espectroscopia na região do infravermelho

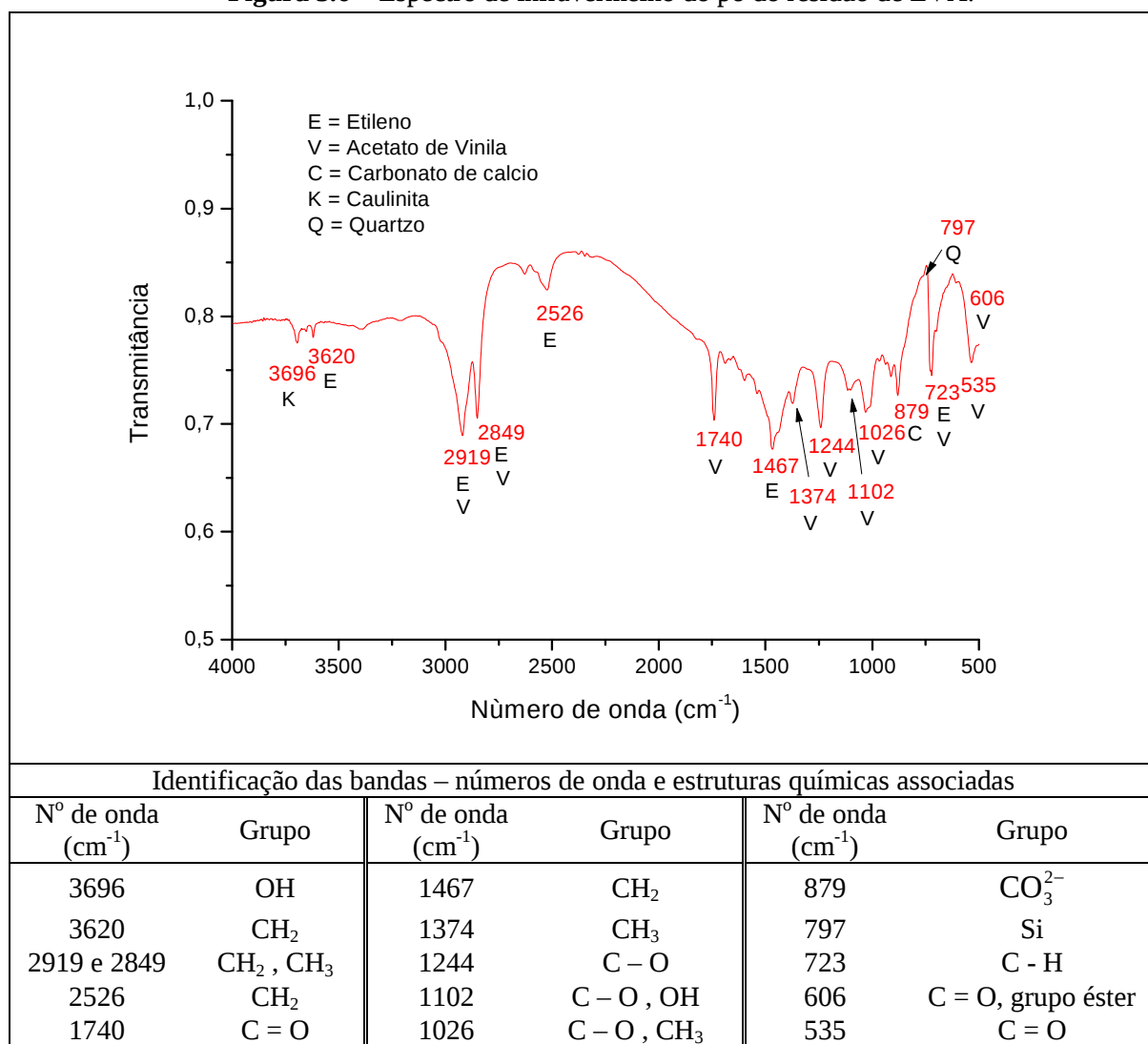
Com a espectroscopia de infravermelho, faz-se a identificação dos elementos do polímero e dos compostos da mistura. A técnica do infravermelho utiliza-se da região do infravermelho do espectro eletromagnético, em que, por meio da aplicação de um feixe monocromático de luz infravermelha, passa pela amostra ao longo de uma determinada faixa de comprimento de onda e fazem-se os registros da quantidade de energia absorvida ou transmitida pela amostra, conforme a frequência de vibração específica da energia de cada molécula, e assim tem-se a construção do espectro infravermelho, que é um gráfico de energia (absorvida ou transmitida) versus frequência.

O equipamento utilizado nesta pesquisa foi um espectrômetro Bruker, FT-IR Vertex, com módulo Raman Ram II, acoplado microscópio de infravermelho Hyperion. A varredura foi aplicada entre 4000 e 400 cm^{-1} , e a intensidade das bandas foi expressa em transmitância. As amostras foram analisadas em pastilhas de KBr (brometo de potássio), sendo o EVA obtido diretamente do resíduo tipo pó, que surge no processo de fabricação do calçado, selecionado da parte passante da peneira com abertura de 0,075mm.

Com base na literatura (STAEL *et al.*, 2005; SILVA, 2001; ALENCAR, 2009; MANSUR, 2007), podem-se identificar os espectros de FTIR (Figura 3.6) para amostra do resíduo como sendo os picos associados ao etileno (3620 cm^{-1} , 2919 cm^{-1} , 2849 cm^{-1} , 1467

cm^{-1} , 723 cm^{-1}) e ao acetato de vinila (2919 cm^{-1} , 2849 cm^{-1} , 1740 cm^{-1} , 1374 cm^{-1} , 1244 cm^{-1} , 1102 cm^{-1} , 1026 cm^{-1} , 723 cm^{-1} , 606 cm^{-1} , 535 cm^{-1}), além das vibrações associadas à fração inorgânica: caulinita (3696 cm^{-1} , 797 cm^{-1}), carbonato de cálcio (879 cm^{-1}) e quartzo (797 cm^{-1}), que são utilizados como cargas no processo industrial.

Figura 3.6 – Espectro de infravermelho do pó do resíduo de EVA.



Obs: grupo éster: $(\text{CH}_3\text{COO})^-$

O material analisado apresenta espectros de FTIR típicos encontrados nos polímeros de EVA. As bandas registradas são semelhantes às apresentadas por Alencar (2009), encontradas no polímero puro e em resíduos de EVA (Tabela 2.1) e também apareceram grupos semelhantes aos estudos por Silva (2001), que pesquisaram EVA puro usado como aditivos (Figura 2.10). Pode-se afirmar que, de forma qualitativa, há semelhança dos dois produtos e que o resíduo de EVA conserva elementos da formação do EVA puro de origem, acrescido, porém de outras bandas, formadas pelas presenças das cargas.

b) *Difratometria de Raios-X*

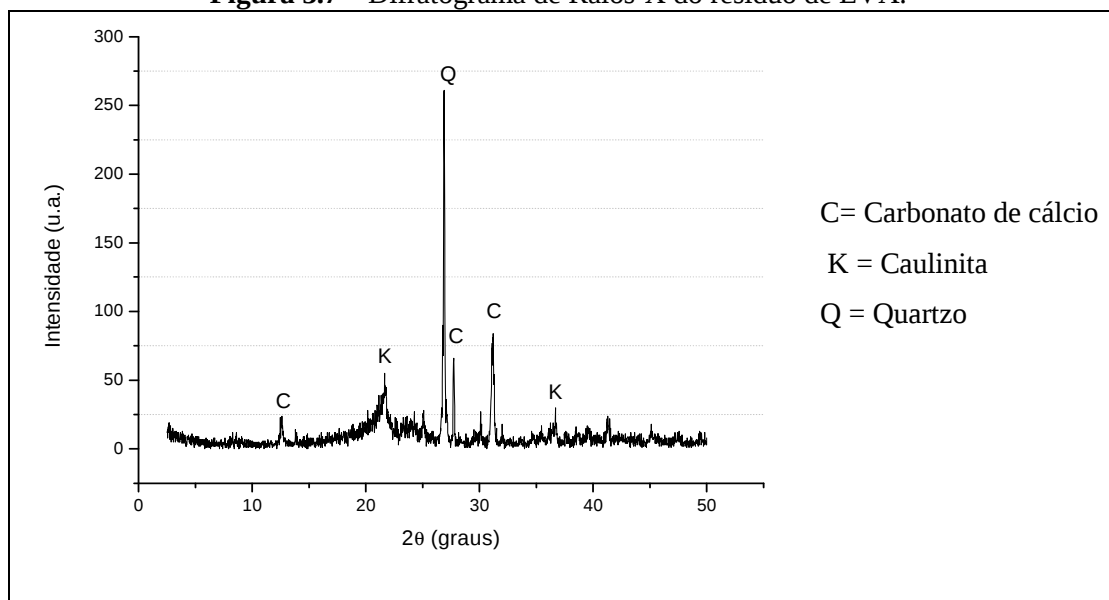
O ensaio foi realizado em amostra obtida do pó do EVA, selecionado da parte passante da peneira com abertura de 0,075mm. A amostra foi colocada em um porta-amostra apropriado para o equipamento e submetida à análise de DRX.

O equipamento utilizado no ensaio foi um Difratômetro de raios-X, da marca SIEMENS e modelo D-5000, com tubo de alvo de cobre, com filtro de níquel.

Para obtenção dos difratogramas, foi transmitindo um comprimento de ondas de 30mA, varredura com passo de $0,01^\circ 2\theta$, movendo-se a uma velocidade de 1seg/passos, com tensão de voltagem de 40 kV, e sendo os ângulos de varredura de 3° a $74^\circ (2\theta)$, com radiação $\text{Cu } K\alpha$. A identificação das substâncias foi conseguida utilizando o banco de dados do programa MDI Jade5, além da comparação com a literatura (MANSUR, 2007).

Na Figura 3.7, apresenta-se o difratograma obtido para o resíduo de EVA, e nele se identificaram o caráter amorfo do polímero e picos cristalinos dos elementos que fazem parte da composição das cargas usadas na fabricação da manta original do polímero (carbonato de cálcio, caulinita e quartzo).

Figura 3.7 – Difratograma de Raios-X do resíduo de EVA.



c) *Termogravimetria*

Foram colocados em torno de 20mg de amostra no porta-amostra de cerâmica e definido uma faixa de temperatura de 30 a 900°C , com razão de aquecimento de $20^\circ\text{C}/\text{min}$,

empregando-se atmosfera dinâmica de nitrogênio (N_2), com fluxo de 20 mL/min. A temperatura do cooler foi mantida em 15°C para refrigerar o sistema ao término das análises.

As análises termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas em um equipamento PerkinElmer, modelo STA 6000.

Foram realizadas duas determinações, em momentos distintos da pesquisa, para verificar se existem variações nas características dos resíduos coletados na indústria. Portanto, um ensaio foi realizado com uma amostra durante a realização do Estudo da dosagem dos teores de EVA (Etapa I – Figura 3.8) e a outra no decorrer dos Estudos das condições de absorção do EVA na mistura e da durabilidade (Etapas II e III – Figura 3.9).

Figura 3.8 – Curvas TG/DTG dos agregados de EVA utilizados na Etapa I.

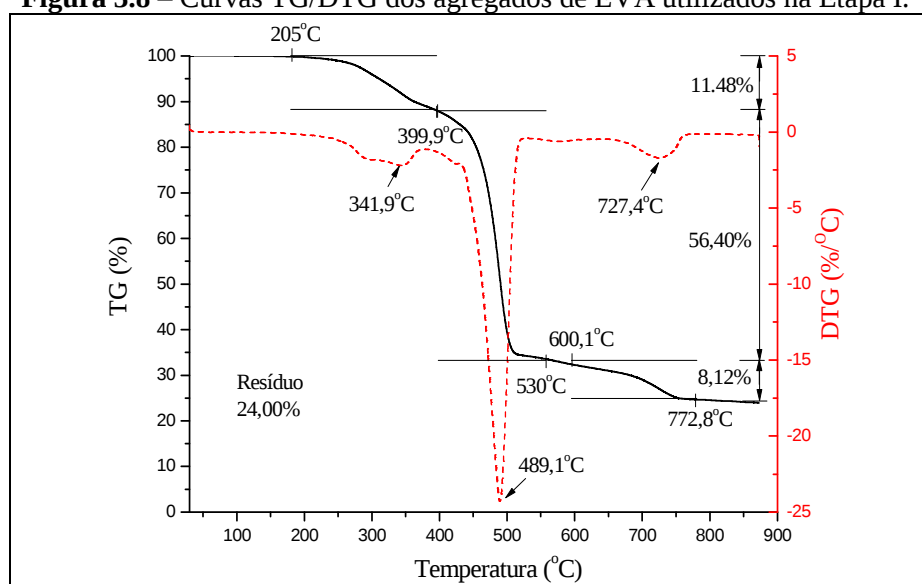
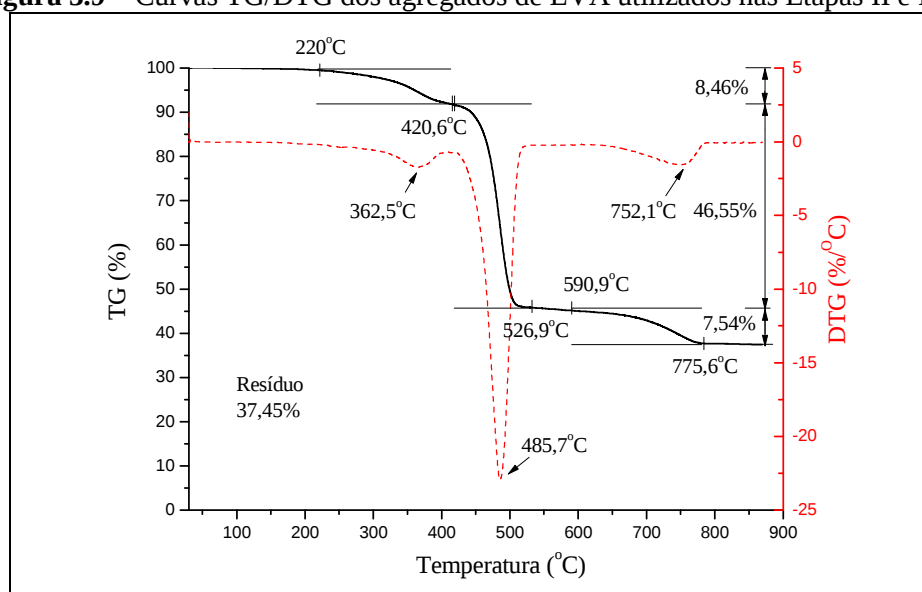


Figura 3.9 – Curvas TG/DTG dos agregados de EVA utilizados nas Etapas II e III.



As curvas da TG e DTG para as duas amostras foram similares, apresentando-se três etapas de degradação, diferenciando-se entre si nos percentuais de perda de massas. Isso demonstra que os resíduos são compostos por componentes iguais, porém em proporções diferentes, o que justifica as variações em suas densidades. As fábricas trabalham com placas de EVA com densidades variadas, conforme tipo de calçados e suas partes, como solado, entressolas e palmilhas (CHÁVEZ, 2007).

Pelas Figuras 3.8 e 3.9, observa-se que a primeira etapa ocorre em torno de 210 a 410°C e está relacionada à degradação predominantemente do acetato de vinila (VAc) e dos elastômeros. Para Zattera *et al.* (2005) e Montagnoli *et al.* (2010), o único gás desprendido nessa etapa é o ácido acético. Além do ácido acético liberado pelo VAc, ocorre ainda o desprendimento de um pouco de dióxido de carbono e monóxido de carbono, dado à decomposição dos elastômeros ocorrerem nesta faixa de temperatura, que só podem ser detectados em atmosfera com oxigênio.

A segunda etapa de degradação das curvas de TG é a de maior amplitude e ocorre aproximadamente no intervalo de 410 a 530°C, estando associada à saída dos hidrocarbonetos gasosos e principalmente à intensa perda de CO₂, devido à degradação das cargas orgânicas (substâncias que têm em sua composição o carbono e o hidrogênio).

A terceira etapa aconteceu na faixa de aproximadamente 600 a 775 °C e está associada à decomposição das cargas inorgânicas. As indústrias calçadistas fazem uso das cargas inorgânicas na obtenção da placas com o objetivo de baratear o produto final. São vários os tipos de cargas inorgânicas, por exemplo, o talco, a barita, a terra diatomácea e outros. Como o agregado aqui avaliado é composto por carga de CaCO₃, a decomposição gerou a saída do CO₂, proveniente do carbonato de cálcio.

Na Tabela 3.7, há um resumo dos valores obtidos em ambas as amostras pelas curvas termogravimétricas. Tem-se ainda o valor do teor de acetato de vinila (VAc) que ficou no resíduo após o processo de trituração com base na equação 2.1 (HULL *et al.*, 2003 apud ZATTERA *et al.*, 2005).

Tabela 3.7 – Resultados obtidos da análise termogravimétrica para amostras de EVA das Etapas I e II

Amostras	1ª faixa de degradação 210 a 410°C (%)	2ª faixa de degradação 410 a 530°C (%)	3ª faixa de degradação 600 a 775°C (%)	Valor residual (%)	VAc (%)
Da Etapa I	11,48	56,40	8,12	24,00	16,47
Da Etapa II e III	8,46	46,55	7,54	37,45	12,17

Obs: VAc = teor de Acetato de Vinila.

Os resultados obtidos, além de terem colaborado com a caracterização do material, que está sendo reciclado para uso como agregado, permitiram perceber, por meio dos valores dos teores de acetato de vinila presentes nas amostras (16,47% e 12,17%), que existiria dificuldade para as indústrias geradoras desses resíduos fazerem o seu reaproveitamento de forma “in natura” ao processo, haja vista seu valor ter ficado fora do intervalo de 18 a 28%, que é o ideal para obtenção das placas de EVA usadas pelas indústrias de calçados. Ou seja, sobre uma análise quantitativa de seus elementos, o resíduo e o EVA puros possuem diferenças que inviabilizam tecnicamente sua reciclagem pela indústria calçadista.

d) *Imagens por lupa*

Como uma primeira análise da morfologia, foram utilizadas imagens obtidas por lupa. Foi utilizada uma lupa binocular Leica S8APO.

A imagem do grão de EVA está mostrada na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Imagem do grão do agregado EVA por meio da lupa.



O agregado de EVA possui textura de aspecto esponjoso e frequentes presenças de furos, provavelmente do próprio material de refugo ou surgido durante o processo de trituração para obtenção do agregado. Foi observado também, que a superfície é formada por pequenas “conchas” que foram partidas com a trituração para obtenção do agregado, formando assim minúsculos orifícios superficiais. Esses orifícios e os furos no polímero são locais de depósito de água, sobretudo nas primeiras horas do ensaio de absorção. Quando os

grãos estão no interior das misturas, essas aberturas superficiais podem transformar-se em ancoragem física para a pasta de cimento.

e) *Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)*

O microscópio eletrônico de varredura utilizado é do fabricante FEI, modelo Quanta 200 FEG, acoplado ao EDS modelo EDAX.

Foram obtidas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e realizadas microanálises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para possibilitar a identificação e o mapeamento dos elementos químicos presentes no material. Foram capturadas imagens por medida de elétrons secundários (ES) de grãos de agregados de EVA natural, que permitem uma definição qualitativa da morfologia e da topografia da amostra, e imagens por elétrons retroespalhados (BSE), que permitem visualizar as variações de composição.

Não foi possível fazer o polimento das amostras, pois a composição do polímero não permitiu, devido a tal procedimento danificar a superfície das amostras. Sendo assim, o ensaio foi realizado diretamente em uma amostra de agregado originado do procedimento adotado por essa pesquisa, quando da trituração do resíduo para obtenção do agregado.

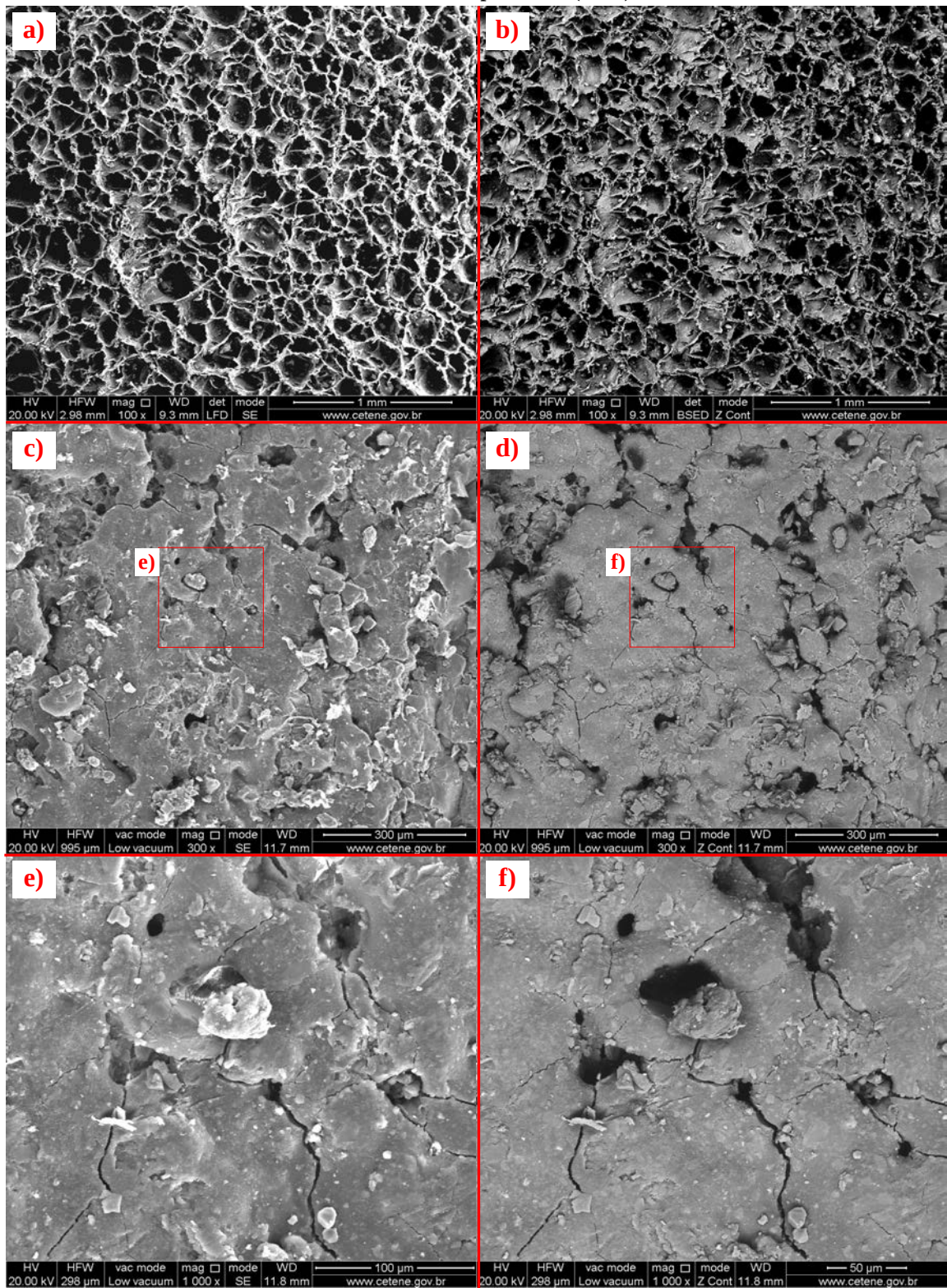
Para metalização das amostras, fez-se a deposição de íons de ouro (Au) com 20µm de espessura, com o uso de uma máquina metalizadora, modelo EM SCD 500, da marca Leica.

A seguir, são apresentadas algumas imagens do agregado de EVA, do tipo elétrons secundários (ES), elétrons retroespalhados (BSE) (Figura 3.11).

Com base nas imagens do MEV (Figura 3.11), pode-se observar que o agregado de EVA mantém a fase reticulada, característica do material polimérico original, e com células do tipo fechado (Figura 3.11-a,b). Observa-se na superfície lisa do polímero uma membrana com grande quantidade de cargas inorgânicas (Figura 3.16-c,d) e a existência de microfissura e cavidades (Figura 3.11-e,f).

No corte do resíduo para obtenção dos grãos, provoca a partida das células superficiais do polímero, deixando-as com “conchas abertas” para a parte externa que absorvem água. E, à medida que essa água entra, ocorre a absorção para dentro de algumas outras células por pequenas aberturas, porém de forma muito lenta, pois o polímero mantém predominantemente as células fechadas no seu interior. Isso explica o comportamento da absorção do agregado de EVA em contato com a água.

Figura 3.11 – Imagens em MEV do agregado de EVA, obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).

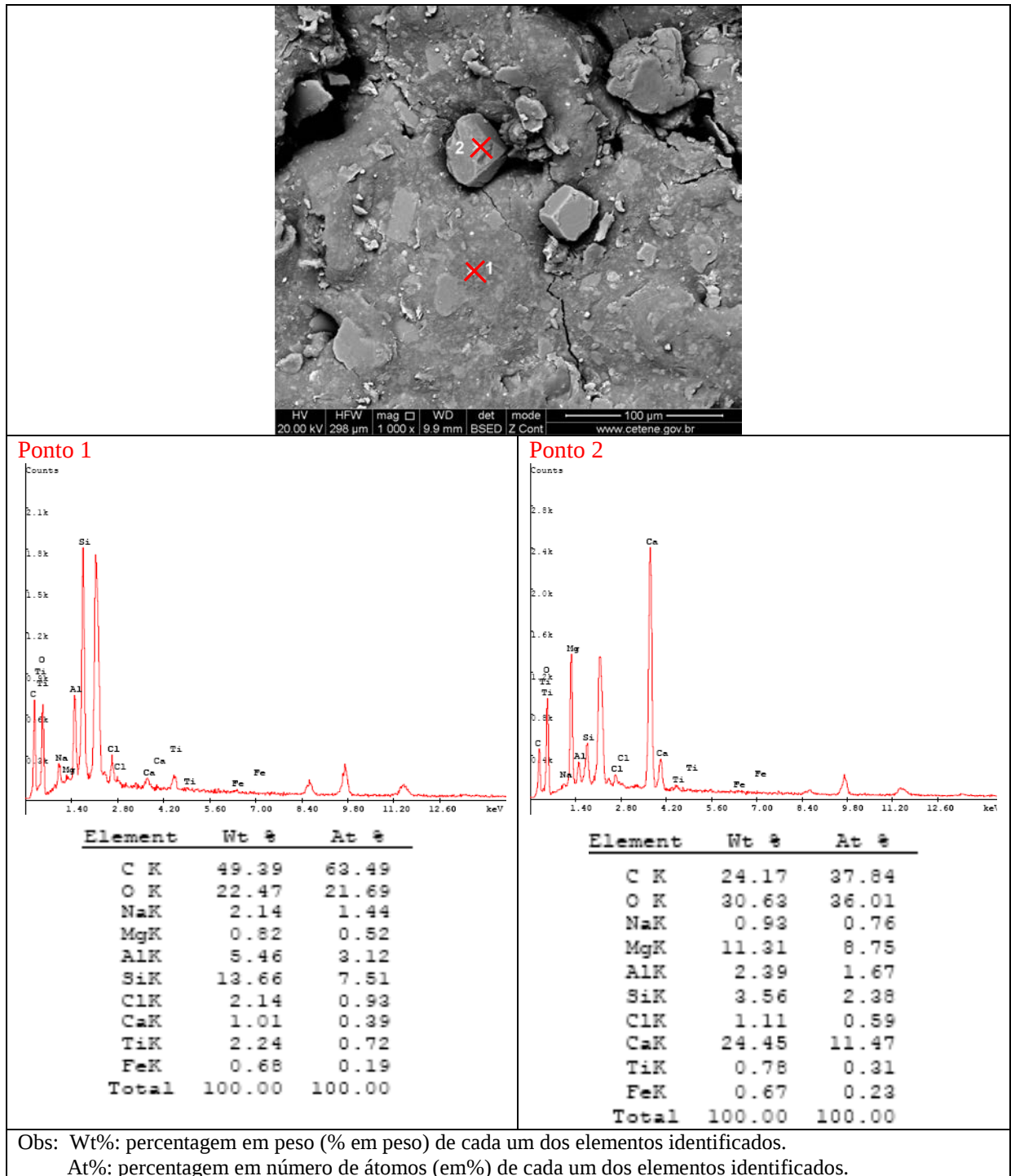


Obs: Imagens ES: a) 100x; c) 300x; e) 1000x

Obs: Imagens BSE: b) 100x; d) 300x; f) 1000x

Na Figura 3.12, estão apresentados os espectros obtidos da microanálise química por energia dispersiva (EDS) do grão de EVA.

Figura 3.12 – Espectros EDS do agregado de EVA.



Por meio dos espectros da Figura 3.12, verifica-se a presença dos elementos típicos usados na obtenção das placas poliméricas de EVA, como carbono e oxigênio, presentes em praticamente todas as substâncias do composto e formam a base do EVA; a sílica e o cálcio,

como carga; o ferro e o titânio presentes nos pigmentos e outras adições. O hidrogênio não foi detectado na análise EDS devido ao seu baixo peso atômico.

No ponto 2 do EDS, há um crescimento considerável do cálcio e magnésio em relação ao ponto 1, comprovando se tratar de cargas inorgânicas, e, pelas imagens MEV da Figura 3.12, pode-se verificar a presença dessas cargas e que algumas delas pouco ou nada interagem com a matriz polimérica.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O plano experimental foi dividido em três etapas, conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Etapas da pesquisa.

ETAPA	DESCRIÇÃO	OBJETIVO PRINCIPAL	PARÂMETRO DE ANÁLISE
I	Estudo da dosagem dos concretos EVA	Determinar quais as misturas ideais conforme influência dos teores de EVA	Resistência à compressão
II	Avaliação das condições de absorção prévia do EVA em água nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos	Definir a necessidade ou não da imersão prévia do agregado de EVA em água	Resistência à compressão; Microestrutura
III	Estudo das condições da durabilidade dos concretos EVA	Analisar as influências da incorporação do agregado de EVA e da sua imersão prévia em água na degradação do compósito	Durabilidade

Essas etapas foram montadas para entender o comportamento da matriz de cimento na presença do agregado de EVA.

A primeira etapa é a realização de um estudo de dosagem para que se obtenham concretos com EVA, de consistência plástica, para uso com ou sem fins estruturais. O agregado de EVA, nesta etapa, não passou pelo tratamento de imersão prévia, pois buscou-se fazer uma dosagem para as condições mais críticas do uso agregado leve, conforme definido pela maior parte das pesquisas até então realizadas (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005).

A segunda etapa define-se sobre os efeitos da imersão prévia do agregado de EVA em água.

Após realização dessas duas Etapas, parte-se para a Etapa III, que se trata de um estudo das condições de durabilidade dos concretos com EVA, quanto aos ataques da ação dos cloretos e sulfatos.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA

O projeto estatístico aplicado foi utilizado como ferramenta na interpretação dos resultados experimentais para se verificar a influência dos agregados de EVA nas propriedades dos concretos e as interações entre as variáveis relacionadas. Estudos com concretos, utilizando agregados leves, devem ser considerados os seguintes fatores (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011):

- a necessidade de projetar um concreto com massa específica diferenciada;
- a existência do processo de absorção dos agregados leves;
- a interferência da dimensão do agregado leve no valor da sua massa específica;
- o tipo de agregado leve.

Para o estudo desses fatores, foi aplicada a análise de variância ANOVA, associada ao teste de Tukey. A ANOVA permite a verificação da significância de um determinado grupo de variáveis independentes sobre as variáveis dependentes analisadas na pesquisa. Como por si só a ANOVA não permite verificar qual o melhor resultado quando se tem mais de dois tratamentos sendo analisados, fez-se também um teste de comparação múltipla de médias dos tratamentos para se concluir qual o melhor tratamento. Adotou-se o teste de Tukey, por apresentar critério de avaliação bastante rigoroso e confiável.

Para atingir aos objetivos que se propõem a ser analisados nessa tese, têm-se as seguintes variáveis de resposta (variáveis dependentes):

- Propriedades físicas: teor de ar incorporado naturalmente; absorção de água por imersão; índice de vazios; massa específica do concreto no estado endurecido; consumo de cimento calculado e rendimento do concreto calculado.
- Propriedades mecânicas: resistência à compressão axial e calculado o fator de eficiência; resistência à tração por compressão diametral e calculado o fator de eficiência; módulo estático de elasticidade à compressão.
- Profundidades de penetração de cloretos e teor de cloretos totais em profundidades diferentes;
- Degradação pela ação dos sulfatos: variação dimensional; resistência à compressão axial; resistência à tração na flexão; variação de massa.

Para análise comparativa dessas variáveis, foram utilizados os seguintes parâmetros como variáveis independentes:

- Misturas (teores de EVA): Traço primário 1:3 (cimento:agregados, em massa) sugerido pela literatura (BEZERRA, 2002; PIMENTEL, 2005; SANTIAGO, 2008). Com base

nesse traço, fez-se um estudo de dosagem para se obter uma mistura com maior aproveitamento de resíduos de EVA com as melhores resistências possíveis, utilizando um teor pré-determinado do teor de argamassa em 50% e variando a proporção (Areia Grossa)/(EVA+Brita) (em massa) nas seguintes relações: 70/30; 60/40; 50/50; 40/60; 30/70; 20/80 e entre as frações (EVA+Brita) foram aplicados os teores de EVA como substituto a brita (em volume): 0%; 20%; 40%; 60%; 80% e 100%. Esses percentuais foram definidos com base nos valores apresentados nos trabalhos anteriores e se extrapolou para uma abordagem numa faixa de incorporação do agregado de EVA de maiores combinações com os demais agregados da mistura, inclusive com maiores combinações dos próprios agregados naturais entre si, para que se possa conseguir uma análise mais precisa no estudo da dosagem. A explanação desse estudo está detalhada no Capítulo 4, subitem 4.4.

- Tratamento de imersão prévia do agregado de EVA em água: devido à provável influência da porosidade do agregado leve nas propriedades das misturas, foram realizadas misturas com uso do EVA sem ou com esse tratamento. A explanação desse estudo está detalhada no Capítulo 5, subitem 5.4.

As variáveis intervenientes são:

- condição anidra da mistura: massa unitária e distribuição granulométrica;
- condição fresca da mistura: densidade de massa.

As seguintes variáveis foram mantidas constantes para tornar possível a realização do estudo comparativo entre as respostas:

- Relação água/cimento: valor de 0,49. Esse valor foi obtido na literatura para mistura de plasticidade semelhante a dessa tese (SANTIAGO, 2008) e reavaliado em estudo preliminar, sendo considerado satisfatório quanto às condições de trabalhabilidade nas misturas realizadas na presente pesquisa.

- Dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) do agregado EVA: adotado o valor de $D_{m\acute{a}x} = 9,5\text{mm}$. Quanto maior a $D_{m\acute{a}x}$ do agregado leve, menor a resistência do concreto, e agregados leves com $D_{m\acute{a}x}$ superiores a 19mm comprometem a trabalhabilidade da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Portanto, o valor adotado foi escolhido por demonstrar boas condições de trabalhabilidade, bom desempenho mecânico e possuir baixo custo de produtividade no processo de trituração dos grãos, quando comparado com as demais granulometrias estudadas (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; LIMA FILHO, 2008; SANTIAGO, 2008).

A análise estatística desta tese foi realizada utilizando o software estatístico ASSISTAT, disponível pelo site <http://www.assistat.com.br>.

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO EVA -Etapa I

4.1 INTRODUÇÃO

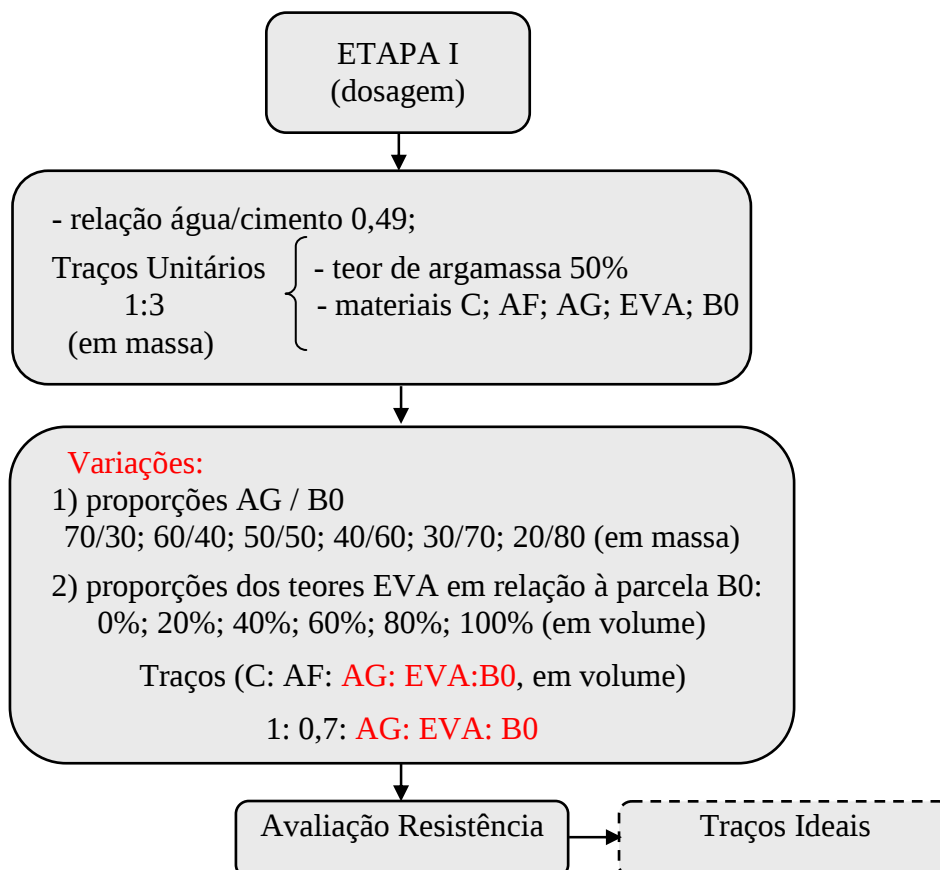
Neste capítulo, será estudado como o uso do agregado leve EVA irá interferir no concreto, sendo analisado especificamente quanto à variação na resistência mecânica. E assim, obter uma dosagem que apresente as proporções ideais entre seus elementos, para se chegar a um concreto com propriedades não estruturais e um concreto de uso estrutural.

Portanto, o objetivo dessa etapa é determinar as misturas ideais para concretos de consistência plástica, compatíveis com os melhores desempenhos que atinjam, ao mesmo tempo, maiores incorporações de EVA e potencial máximo para resistência mecânica do concreto.

4.2 EXPERIMENTAL

A estruturação experimental da Etapa I está mostrada no Diagrama 4.1.

Diagrama 4.1 – Estruturação do capítulo 4 – Etapa I.



Observação: C = cimento Portland; AF = areia fina; AG = areia grossa; EVA = EVA; B0 = brita 0.

Para a dosagem do concreto, foi adotada uma metodologia de ajustes granulométricos entre os componentes da mistura, com a junção de agregados tradicionais e o agregado artificial de EVA. Dessa forma, as misturas foram compostas com uso de duas areias com granulometrias distintas, sendo uma areia grossa (areia de rio) e a outra, uma areia muito fina, que foi considerada como o agregado componente na argamassa para fim de definição do teor de argamassa.

Na determinação do teor de argamassa ideal, fez-se um estudo preliminar com a mistura de referência (sem EVA) que foi submetida a um processo de manipulação, durante o qual eram feitas adições de proporções de areia, cimento e água a fim de encontrar um traço com boas características de coesão e trabalhabilidade, medido pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, ABNT 1998). Foi encontrado o teor de argamassa de 50%.

Quanto à trabalhabilidade da mistura e a relação água/cimento, foi adotado o seguinte procedimento: fixado o valor de $a/c=0,49$ (água total), por ser um valor considerado conveniente com base em estudos preliminares e na literatura (SANTIAGO, 2008). Foram assim verificados os abatimentos; esses obtiveram variações de 70mm a 120mm.

A areia grossa (areia de rio) teve suas porcentagens de incorporação variando com os demais agregados graúdos (EVA e brita).

Todos os concretos utilizaram traços unitários 1:3 (cimento: agregados, em massa). Ou seja, por se tratar de uso de agregados leves, foram usados traços ricos, seguindo alguns traços sugeridos por pesquisas anteriores com uso de EVA (BEZERRA, 2002; PIMENTEL, 2005), sendo assim pretendido realizar misturas com potencial para alcançar valores de resistências mecânicas com maiores resistências possíveis.

O roteiro desta Etapa obedeceu ao seguinte procedimento:

1 – Realização de misturas anidras dos agregados para avaliação das curvas granulométricas e das massas unitárias:

1.1 – nas primeiras misturas entre os agregados naturais, foram avaliadas as seguintes proporções (em massa):

- 100% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 0% Brita 0;
- 90% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 10% Brita 0;
- 80% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 20% Brita 0;
- 70% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 30% Brita 0;
- 60% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 40% Brita 0;
- 50% Areia grossa ($D_{máx} = 4,8 \text{ mm}$) + 50% Brita 0;

- 40% Areia grossa ($D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$) + 60% Brita 0;
- 30% Areia grossa ($D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$) + 70% Brita 0;
- 20% Areia grossa ($D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$) + 80% Brita 0;
- 0% Areia grossa ($D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$) + 100% Brita 0;

1.2 – na sequência, foi inserida a areia fina na proporção para se obter o teor de argamassa de 50% nas misturas; ficando o seguinte traço em massa:

1 : 1: 2 – (cimento : areia fina: areia grossa+ brita 0)

1.3 – com a incorporação do EVA, os componentes (areia grossa + EVA e brita 0, em massa) foram os que tiveram variação, nas relações especificadas a seguir:

- **70% Areia grossa + 30% EVA e Brita 0**, com os 30% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0;
- **60% Areia grossa + 40% EVA e Brita 0**, com os 40% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0;
- **50% Areia grossa + 50% EVA e Brita 0**, com os 50% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0;
- **40% Areia grossa + 60% EVA e Brita 0**, com os 60% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0;
- **30% Areia grossa + 70% EVA e Brita 0**, com os 70% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0;
- **20% Areia grossa + 80% EVA e Brita 0**, com os 80% EVA e Brita 0 variando em teores de EVA de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em volume), substituindo a Brita 0.

2 – Adição do cimento e da água às misturas anteriores (36 traços), mantendo fixa a relação água/cimento em 0,49.

Foi escolhido definir os teores de EVA em volume, por se tratar de um material que possui densidade muito menor que a brita. Ao se substituir a mesma quantidade de brita em massa por EVA em massa, ter-se-ia um volume de EVA desproporcional na mistura. Portanto,

para corrigir essa discrepância, fez-se a substituição do volume de brita pelo mesmo volume de EVA. Além disso, evitam-se possíveis erros provocados pela alteração da massa unitária do resíduo, ao garantir que o volume ocupado pelos agregados de EVA e brita sejam os mesmos em todos os demais traços ao substituir a brita pelo EVA.

Porém, após essa transformação, fez-se a conversão novamente em massa (utilizando a massa unitária para cada EVA no momento da mistura) para moldagem das misturas, garantindo assim a precisão necessária das moldagens laboratoriais.

Em resumo, segue a metodologia aqui aplicada (Etapa I):

Traço unitário – 1 : 3 (cimento:agregado, em massa). Com teor de argamassa composto por cimento e areia fina (teor determinado em 50%), portanto tem-se o traço – 1 : 1: 2 (cimento: areia fina : agregados graúdos, em massa). Sendo que os agregados graúdos são considerados: areia grossa, EVA e brita “0”. Os agregados graúdos são os que irão variar entre si, tanto na relação (%AREIA / % BRITA “0”) em massa, como nos teores de EVA em relação à parcela brita “0” em volume (metodologia detalhada no subitem 4.3). E, como a substituição da brita pelo EVA deve ser em proporções em volume, fez-se a apresentação dos traços em volume - 1 : 0,7: AG: EVA:B0 (cimento : areia fina : areia grossa : EVA : brita “0”).

Os teores de EVA foram definidos com base nos valores comumente apresentados na literatura, que garantem condições de manuseio, transporte e lançamento da mistura, e foram inseridas combinações nos agregados naturais entre si para que se possa conseguir uma análise mais precisa no estudo da dosagem. Nessa etapa da pesquisa, o agregado de EVA utilizado não passou pela imersão prévia em água, pois se buscou fazer uma dosagem para as condições mais críticas do uso agregado leve (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005).

Na Tabela 4.1, estão apresentadas as nomenclaturas adotadas para cada um dos traços, os seus respectivos traços transformados em volume, bem como as proporções dos teores de EVA para que se possa ter uma visualização melhor do valor de resíduo incorporado.

No total foram moldados 36 traços.

Tabela 4.1 – Apresentação das misturas executadas na Etapa I.

Nomenclatura da Mistura	% EVA em massa	% EVA em volume		Traço (em volume) C: AF: AG: EVA: B0
	em relação a brita 0	em relação aos agregados (areia grossa + EVA + brita)	em relação a todos os agregados	
70/(30)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 1,01: 0,0: 0,5
70/(30)-EVA20	3	7	5	1: 0,7: 1,01: 0,1: 0,4
70/(30)-EVA40	7	13	9	1: 0,7: 1,01: 0,2: 0,3
70/(30)-EVA60	15	20	14	1: 0,7: 1,01: 0,3: 0,2
70/(30)-EVA80	32	27	18	1: 0,7: 1,01: 0,4: 0,1
70/(30)-EVA100	100	34	23	1: 0,7: 1,01: 0,5: 0,0
60/(40)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 0,86: 0,0: 0,68
60/(40)-EVA20	3	9	6	1: 0,7: 0,86: 0,14: 0,54
60/(40)-EVA40	7	18	12	1: 0,7: 0,86: 0,27: 0,41
60/(40)-EVA60	15	26	18	1: 0,7: 0,86: 0,41: 0,27
60/(40)-EVA80	32	35	24	1: 0,7: 0,86: 0,54: 0,14
60/(40)-EVA100	100	44	30	1: 0,7: 0,86: 0,68: 0,0
50/(50)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 0,72: 0,0: 0,85
50/(50)-EVA20	3	11	7	1: 0,7: 0,72: 0,17: 0,68
50/(50)-EVA40	7	22	15	1: 0,7: 0,72: 0,34: 0,51
50/(50)-EVA60	15	32	22	1: 0,7: 0,72: 0,51: 0,34
50/(50)-EVA80	32	43	30	1: 0,7: 0,72: 0,68: 0,17
50/(50)-EVA100	100	54	37	1: 0,7: 0,72: 0,85: 0,0
40/(60)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 0,58: 0,0: 1,02
40/(60)-EVA20	3	13	9	1: 0,7: 0,58: 0,2: 0,81
40/(60)-EVA40	7	26	18	1: 0,7: 0,58: 0,41: 0,61
40/(60)-EVA60	15	38	27	1: 0,7: 0,58: 0,61: 0,41
40/(60)-EVA80	32	51	36	1: 0,7: 0,58: 0,81: 0,20
40/(60)-EVA100	100	64	44	1: 0,7: 0,58: 1,02: 0,0
30/(70)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 0,43: 0,0: 1,18
30/(70)-EVA20	3	15	10	1: 0,7: 0,43: 0,24: 0,95
30/(70)-EVA40	7	29	20	1: 0,7: 0,43: 0,47: 0,71
30/(70)-EVA60	15	44	31	1: 0,7: 0,43: 0,71: 0,47
30/(70)-EVA80	32	59	41	1: 0,7: 0,43: 0,95: 0,24
30/(70)-EVA100	100	73	51	1: 0,7: 0,43: 1,18: 0,0
20/(80)-EVA0	0	0	0	1: 0,7: 0,29: 0,0: 1,35
20/(80)-EVA20	3	16	12	1: 0,7: 0,29: 0,27: 1,08
20/(80)-EVA40	7	33	23	1: 0,7: 0,29: 0,54: 0,81
20/(80)-EVA60	15	49	35	1: 0,7: 0,29: 0,81: 0,54
20/(80)-EVA80	32	66	46	1: 0,7: 0,29: 1,08: 0,27
20/(80)-EVA100	100	82	58	1: 0,7: 0,29: 1,35: 0,0

Observação: C = cimento Portland; AF = areia fina; EVA = EVA; B0 = brita 0.

Nomeclatura: X/Y-EVA μ %

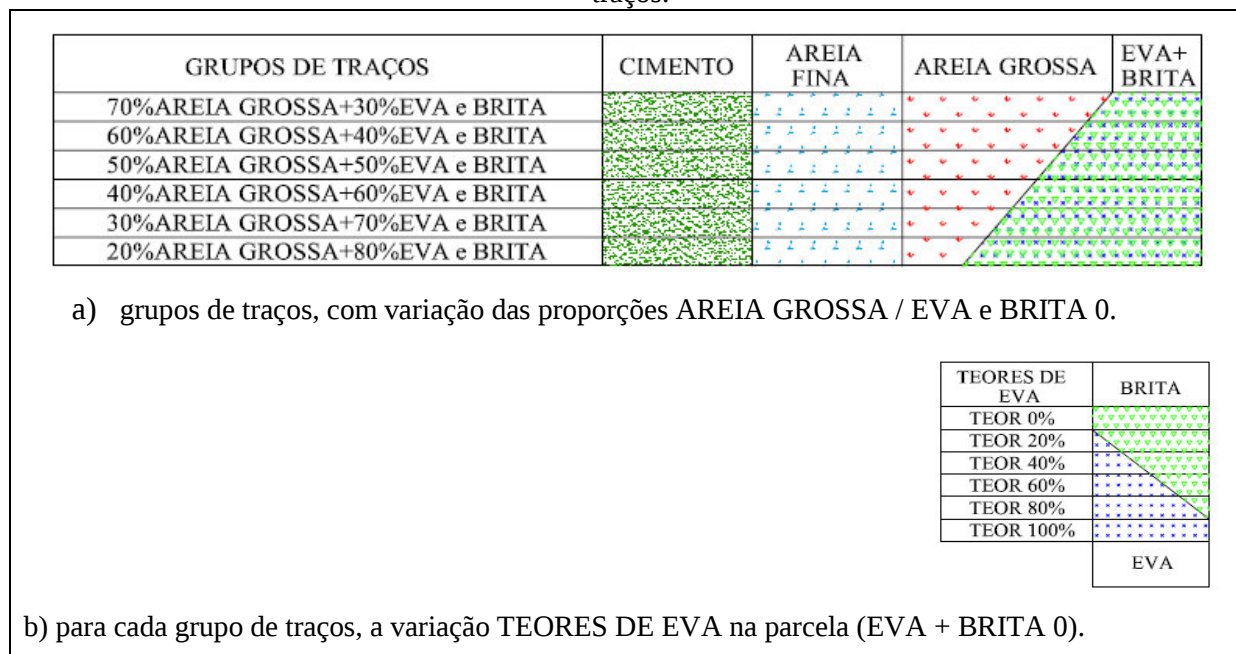
X = proporção de areia grossa (em massa) em relação aos agregados graúdos;

Y = proporção de EVA e brita 0 (em massa) em relação aos agregados graúdos;

EVA μ % = proporção de EVA (em volume) em relação ao volume de Y (volume da mistura inicial com brita e 0% de EVA).

Na Figura 4.1, está apresentado um desenho esquemático dos valores ocupados pelos componentes das misturas nos traços. Sendo mostradas: a) as divisões dos 6 grupos de traços para as proporções AREIA GROSSA / EVA e BRITA (em massa); b) variação dos TEORES DE EVA (em volume) em relação à parcela (EVA + BRITA, em volume).

Figura 4.1 – Desenho esquemático das proporções entre os componentes das misturas, totalizando 36 traços.



Para a confecção dos concretos, utilizou-se uma betoneira de laboratório de eixo inclinado, com capacidade de 140 litros. A colocação dos materiais na betoneira seguiu uma sequência praticada em trabalhos anteriores que apresentou uma boa homogeneização dos componentes (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002), como segue: 1º - o EVA; 2º - parte da água com a betoneira ligada; 3º - todo o cimento Portland; 4º - a brita; 5º - toda a areia; 6º - o restante da água. As etapas de execução das misturas e moldagem dos corpos-de-prova estão na Figura 4.2. A cura dos concretos foi em câmara úmida até a data de rompimento.

Antes do ensaio de resistência à compressão, os corpos-de-prova foram capeados com pasta de enxofre e se teve o cuidado de nivelá-los, como recomenda a norma ABNT.

As variáveis monitoradas, nesta Etapa I, nos concretos foram:

- massa unitária e distribuição granulométrica da mistura anidra;
- massa específica no estado endurecido;
- resistência à compressão e o fator de eficiência calculado.

Figura 4.2 – Detalhe da execução da mistura e da moldagem dos corpos-de-prova.



Os ensaios para a Etapa I foram de caracterização das misturas, nas condições: estado anidro, fresco e estado endurecido.

a) ***No estado anidro foram realizados:***

- massa unitária (NBR NM 45, 2006);
- distribuição granulométrica das misturas dos componentes (NBR NM 248, ABNT 2003);.

b) *No estado fresco foi realizado:*

- consistência pelo abatimento do troco de cone (NBR NM 67, ABNT 1998);

c) *No estado endurecido foram determinados:*

- massa específica, na idade de 28 dias, em corpos-de-prova cilíndricos (5cm x 10cm), sendo quatro exemplares (NBR 9778, ABNT 2005);
- resistência à compressão (NBR 5739, ABNT 2007): nas idades de 7 e 28 dias, em corpos-de-prova cilíndricos (10cm x 20cm), sendo quatro exemplares em cada idade.

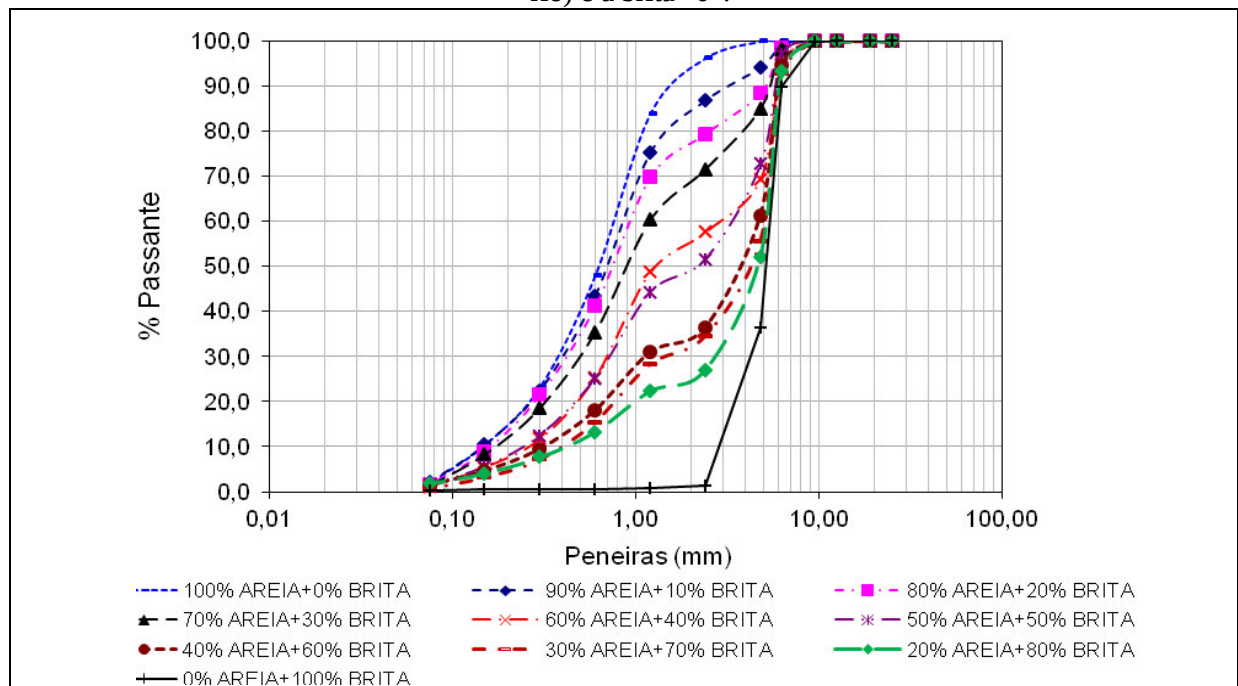
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Análise das propriedades das misturas anidras

4.3.1.1 Proporções entre os agregados graúdos naturais

Primeiramente, foram feitas misturas entre o agregado areia grossa (areia de rio, $D_{máx}=4,8$ mm) e brita “0” ($D_{máx}=9,5$ mm). As curvas granulométricas das proporções entre eles estão apresentadas na Figuras 4.3.

Figura 4.3 – Curvas Granulométricas resultantes das misturas/proporções entre a areia grossa (areia de rio) e a brita “0”.

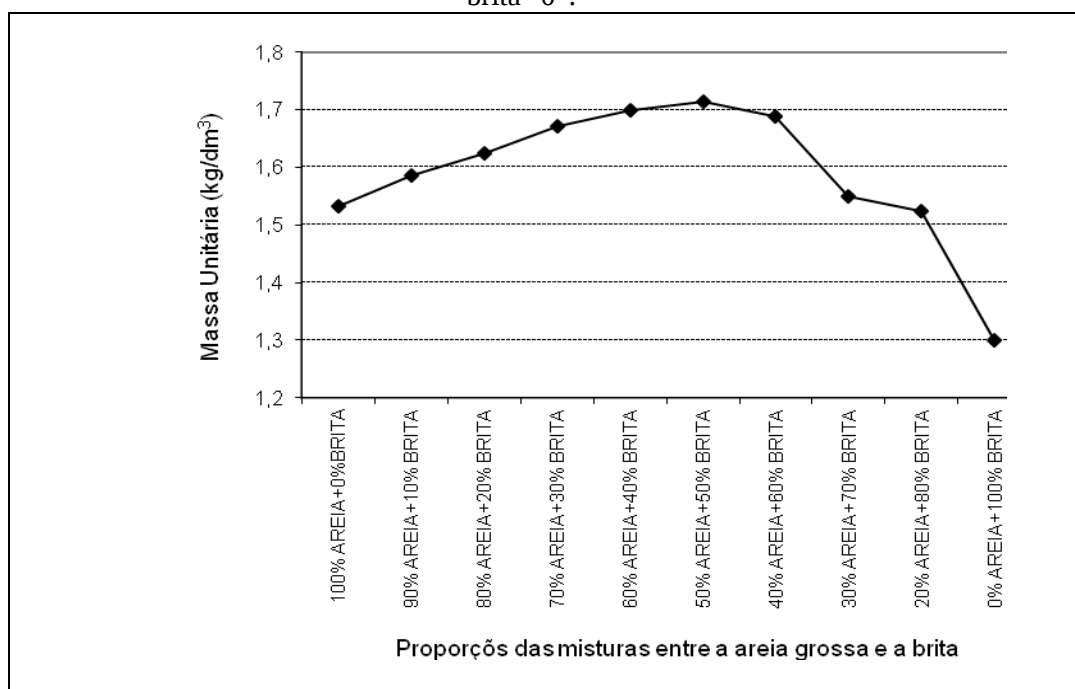


As curvas resultantes das proporções 70% AREIA + 30% BRITA, 60% AREIA + 40% BRITA, 50% AREIA + 50% BRITA e 40% AREIA + 60% BRITA demonstram ser as

mais contínuas, enquanto as curvas das extremidades, ou seja, 100% AREIA + 0% BRITA, 90% AREIA + 10% BRITA, 80% AREIA + 20% BRITA e 0% AREIA + 100% BRITA são uniformes. As outras duas curvas, 30% AREIA + 70% BRITA e 20% AREIA + 80% BRITA têm um comportamento descontínuo.

As massas unitárias das proporções entre as misturas areia grossa (areia de rio) e a brita “0” estão apresentadas na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Massas unitárias resultantes das misturas/proporções entre a areia grossa (areia de rio) e a brita “0”.



Há uma ascensão da curva até a proporção 50% AREIA + 50% BRITA nos valores das massas unitárias e depois se torna descendente, com uma queda bastante suave para a proporção 40% AREIA + 60% BRITA, e, em seguida, se torna mais acentuada para as demais proporções subsequentes. Portanto, isso demonstra que há um intervalo nas proporções em que as partículas desses dois agregados melhor se arranjam entre si, gerando assim o menor volume de vazios e deixando-os mais compactados.

Na Tabela 4.2, é apresentada a classificação conforme o coeficiente de uniformidade adotado pela NBR 6502 (ABNT, 1995), que serviu apenas como um indicativo, pois essa classificação não é muito aceita no meio técnico, dada a sua subjetividade. Mesmo assim, seu resultado mostrou-se coerente (considerando algumas das proporções) com a análise feita a partir dos dois ensaios anteriores.

Tabela 4.2 – Classificação das proporções entre a areia grossa e a brita “0” conforme coeficiente de uniformidade pela NBR 6502 (ABNT, 1995).

Areia + Brita (% em massa)	D	Classificação (NBR 6502/95)	Areia + Brita (% em massa)	D	Classificação (NBR 6502/95)
100 + 0	4,9	uniforme	50 + 50	13,6	medianamente uniforme
90 + 10	5,7	medianamente uniforme	40 + 60	15,0	medianamente uniforme
80 + 20	5,8	medianamente uniforme	30 + 70	12,6	medianamente uniforme
70 + 30	7,0	medianamente uniforme	20 + 80	12,2	medianamente uniforme
60 + 40	10,7	medianamente uniforme	00 + 100	1,7	uniforme

D = Coeficiente de Uniformidade.

Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), o coeficiente de uniformidade (D) é obtido pela relação entre os diâmetros de grãos D_{60} e D_{10} de um solo coesivo, onde D_{60} é o diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica, e D_{10} é o diâmetro de grão correspondente aos 10% nesta curva. Com esse coeficiente de uniformidade, pode-se classificar os solos em uniformes, quando $D < 5$; medianamente uniformes, quando se tem $5 < D \leq 15$; desuniformes, quando $D > 15$.

Ao analisar por essa classificação, há para todas as combinações situadas no intervalo entre as proporções 90% AREIA + 10% BRITA e 20% AREIA + 80% BRITA, definidas como “medianamente uniformes”. Porém, as proporções 90% AREIA + 10% BRITA e 80% AREIA + 20% BRITA ficaram classificadas muito próximas a “uniforme” e, de fato, pode-se perceber pelas suas curvas granulométricas. As proporções somente com areia (100% AREIA + 0% BRITA) e somente com brita (0% AREIA + 100% BRITA) ficaram uniformes.

Portanto, com base na análise anterior, decidiu-se avaliar as proporções 70% AREIA + 30% BRITA; 60% AREIA + 40% BRITA; 50% AREIA + 50% BRITA; 40% AREIA + 60% BRITA; 30% AREIA + 70% BRITA; e 20% AREIA + 80% BRITA, que são os possíveis melhores empacotamentos.

A areia mais fina ($D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm – subitem 3.2.2) é acrescentada no intuito de compor a fração granulométrica entre a areia grossa (areia de rio) e o aglomerante, no objetivo de se buscar uma melhor distribuição granulométrica dessa composição entre os agregados. Para efeitos de definição dos traços, apenas a areia fina compôs o teor de argamassa das misturas, que foi mantido constante no valor de 50%.

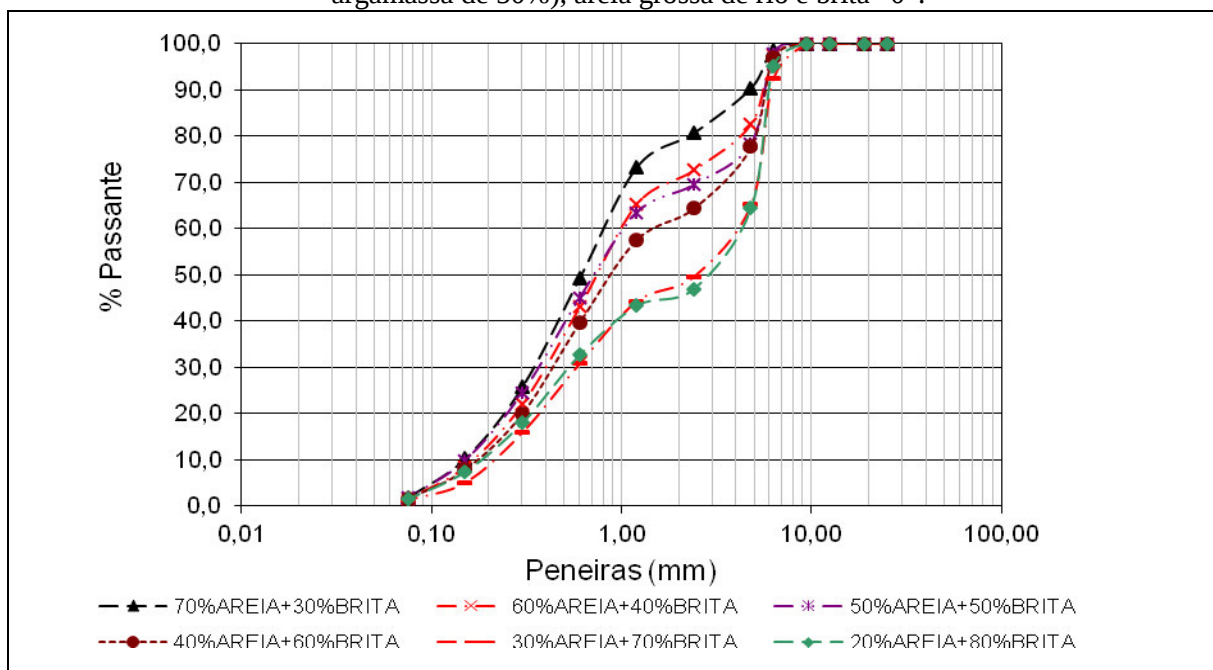
4.3.1.2 Proporções ao inserir a areia fina

O acréscimo da areia fina nos traços é calculado para manter constante um teor de argamassa de 50%, encontrado no estudo preliminar de manuseio. As nomenclaturas das

misturas continuarão sendo apresentadas % AREIA + % BRITA. Essas porcentagens se referem às proporções entre os agregados graúdos (areia grossa + brita “0” e EVA, sendo que o EVA ainda não foi inserido), mas que também tem areia fina compondo a mistura, como agregado miúdo, em proporção fixa para manter o teor de argamassa de 50%, e, por ser um valor invariável, não será exposto na nomenclatura.

Com a presença da areia fina na mistura, dada a maior finura desse material adicionado, as curvas granulométricas se alteram, demonstrando a contribuição dessa areia para tornar as curvas mais contínuas, conforme se verifica na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Curvas Granulométricas resultantes das misturas anidras entre areia fina (teor de argamassa de 50%), areia grossa de rio e brita “0”.



As curvas da Figura 4.5 apresentam uma melhora na distribuição granulométrica para as curvas cujas proporções são: 70% AREIA + 30% BRITA, 60% AREIA + 40% BRITA, 50% AREIA + 50% BRITA e 40% AREIA + 60% BRITA se comparado com as suas respectivas curvas na Figura 4.3 (sem areia fina) devido ao bom preenchimento dos grãos da areia fina nos vazios existentes, sendo essas curvas caracterizadas por curvas contínuas.

Porém, as curvas 30% AREIA + 70% BRITA e 20% AREIA + 80% BRITA não demonstraram ficar mais bem graduadas com a presença da areia fina, apresentando descontinuidade, que pode ser percebida no gráfico, dada a falta de grãos entre os diâmetros 2,4 mm e 1,2 mm. Nesses casos, essa descontinuidade é devido à pequena quantidade de areia

grossa nessas proporções (somente 30% e 20%), o que sugere que há falta de material entre os grãos da brita “0” e da areia fina.

A classificação dada NBR 6502 (ABNT, 1995) a partir do cálculo do coeficiente de uniformidade (Tabela 4.3) confirma a interpretação dos gráficos expostos acima.

Tabela 4.3 – Classificação das misturas anidras obtidas pela adição da areia fina de Fingir (para teor de argamassa 50%) na composição entre areia grossa de rio e brita “0”, conforme coeficiente de uniformidade pela NBR 6502 (ABNT, 1995).

Areia + Brita (% em massa)	D	Classificação (NBR 6502/95)	Areia + Brita (% em massa)	D	Classificação (NBR 6502/95)
70 + 30	5,3	medianamente uniforme	40 + 60	8,3	medianamente uniforme
60 + 40	5,9	medianamente uniforme	30 + 70	19,1	desuniforme
50 + 50	6,9	medianamente uniforme	20 + 80	23,2	desuniforme

D = Coeficiente de Uniformidade.

As curvas situadas entre as proporções 70% AREIA + 30% BRITA e 40% AREIA + 60% BRITA apresentam uma distribuição contínua (classificada como medianamente uniforme pela norma NBR 6502 - ABNT, 1995), e dessas pode-se perceber que a composição 40% AREIA + 60% BRITA demonstra ser a mais bem graduada.

Para que se tivesse condição de realizar uma análise mais completa das propriedades dos concretos, continuou se utilizando todas as proporções avaliadas até esse momento.

4.3.1.3 Proporções ao inserir o agregado EVA

A análise da incorporação do agregado de EVA inicia-se substituindo gradativamente a brita em todas as misturas.

Nas próximas misturas, têm-se nas nomenclaturas dos traços, na parcela referente à BRITA os seguintes materiais: EVA e brita “0”. Para ressaltar essa informação, nas próximas nomenclaturas, a parcela referente à BRITA é escrita entre parênteses (BRITA).

Nas Figuras 4.6 e 4.7, são apresentados os aspectos obtidos pelas proporções dos agregados que compuseram os concretos, nos quais se percebem as condições de ocupação dos componentes de cada mistura em relação ao todo.

Figura 4.6 – Imagens das composições dos agregados para as misturas 70/30; 60/40 e 50/50.

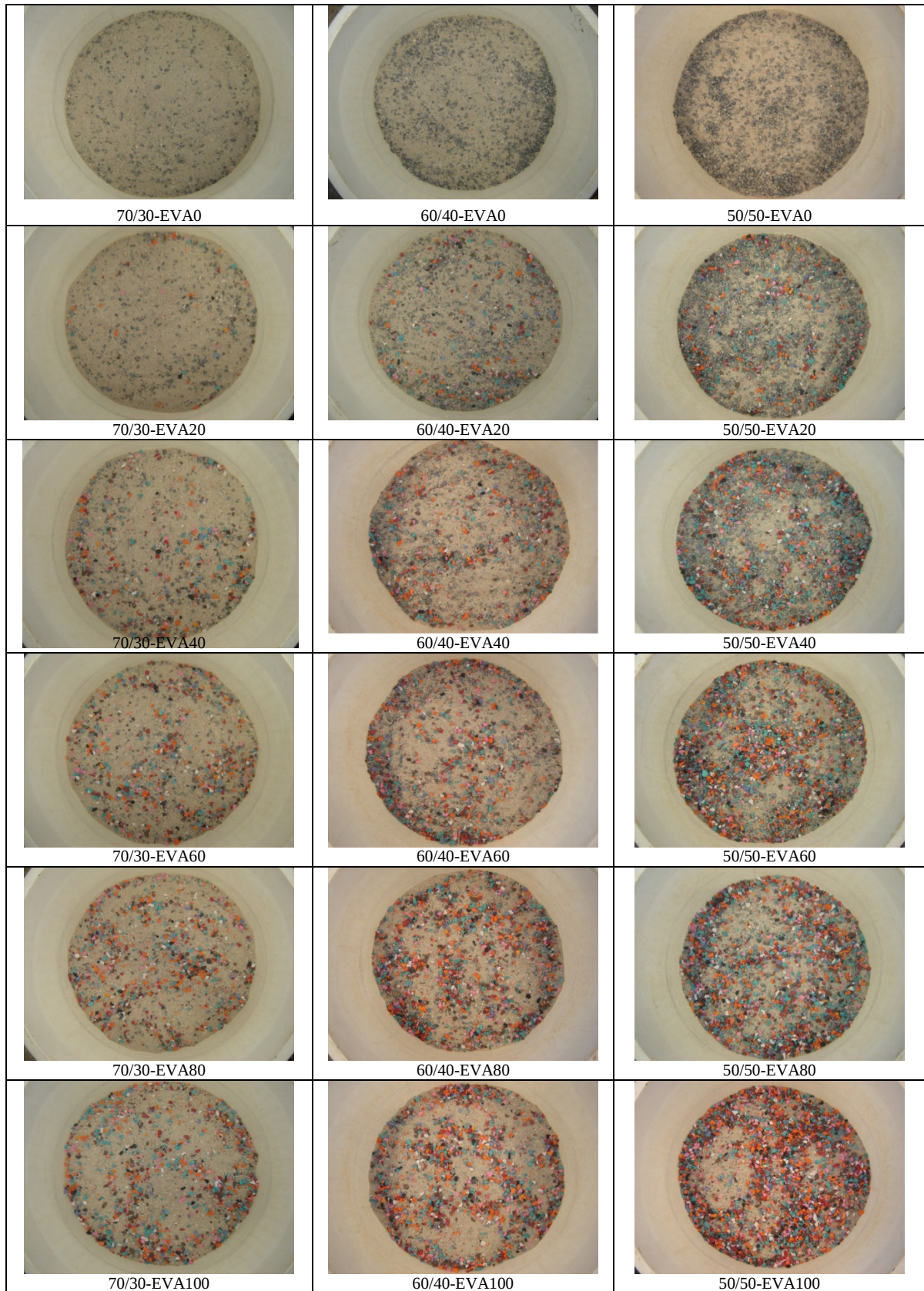
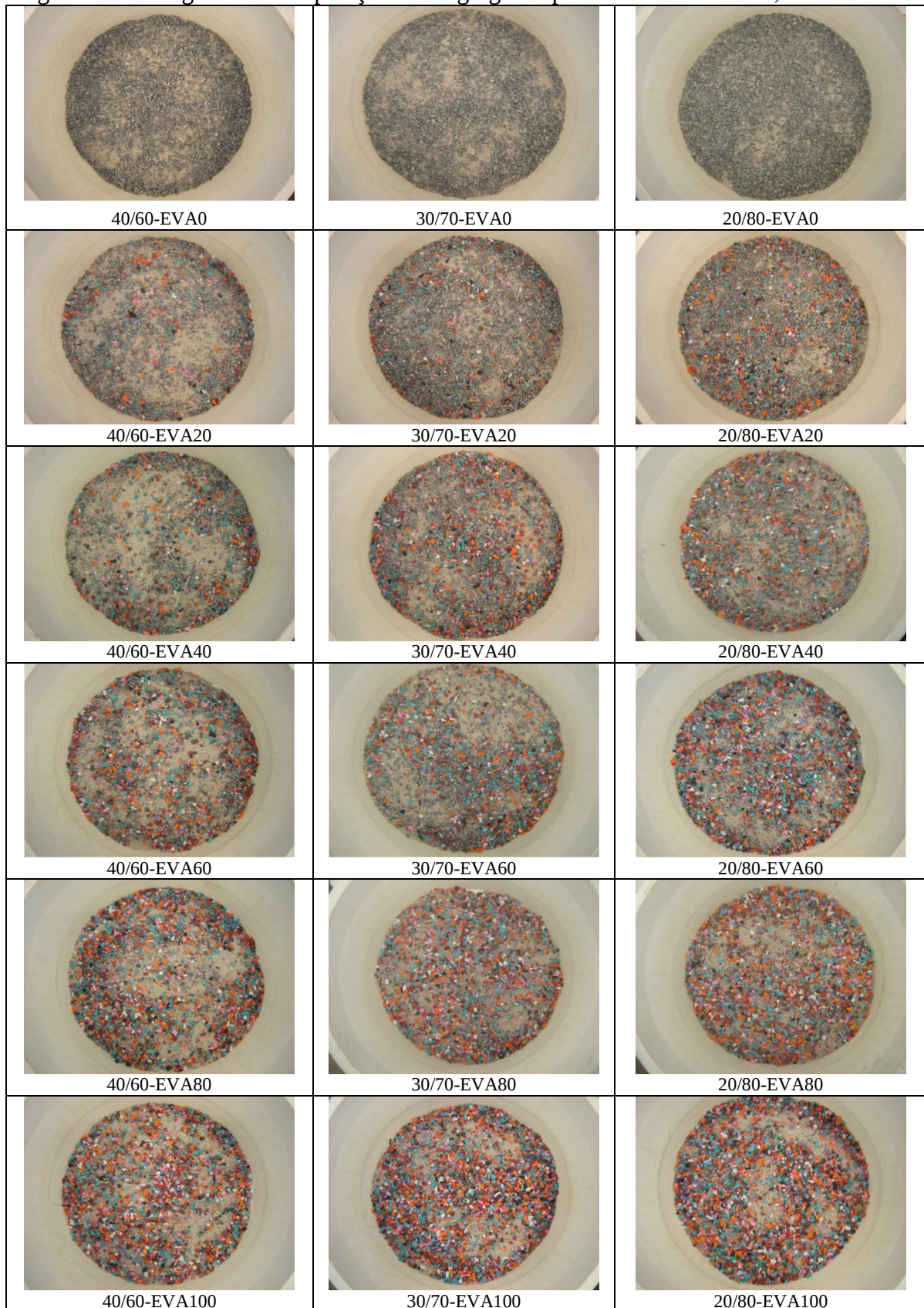


Figura 4.7 – Imagens das composições dos agregados para as misturas 40/60; 30/70 e 20/80.



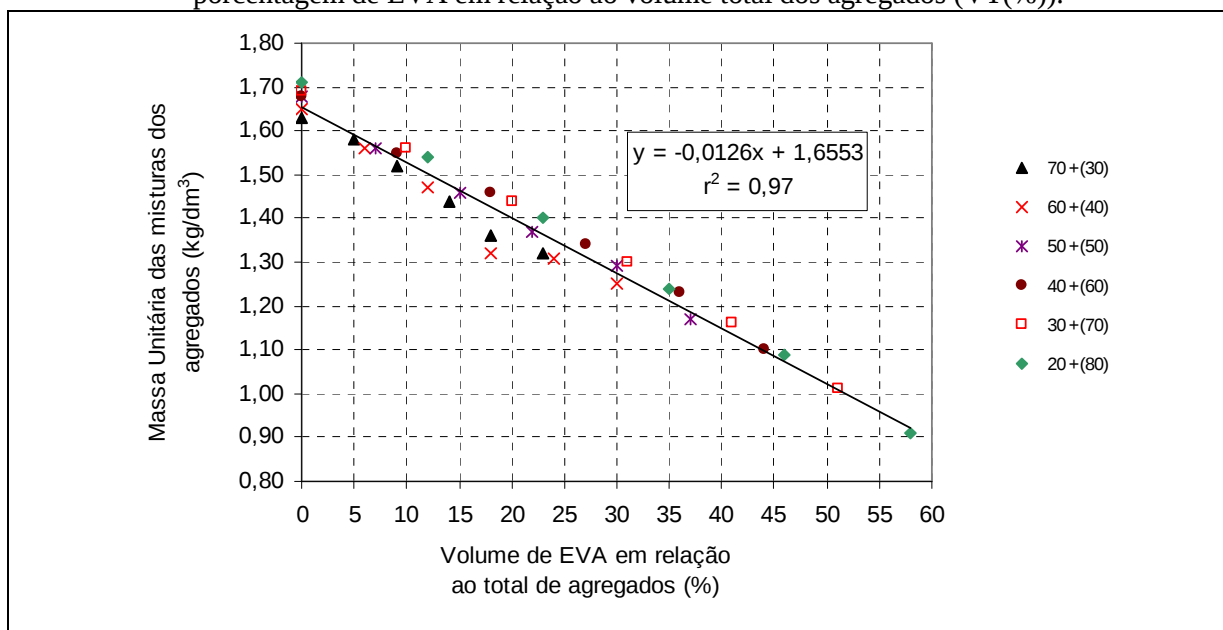
Na Tabela 4.4, são apresentadas as massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados para os teores de EVA e os valores das proporções EVA em cada mistura em relação ao volume total dos agregados ($VT(\%) = \text{areia fina} + \text{areia grossa} + \text{EVA} + \text{brita}$).

Tabela 4.4 – Massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados (MU) e porcentagem de EVA em relação ao volume total dos agregados ($VT(\%)$).

AREIA GROSSA + (BRITA “0” e EVA) (em massa)		Teores EVA em substituição a brita “0” (em volume)					
		0%	20%	40%	60%	80%	100%
70 + (30)	MU = VT(%)=	1,63 0	1,58 5	1,52 9	1,44 14	1,36 18	1,32 23
60 + (40)	MU = VT(%)=	1,65 0	1,56 6	1,47 12	1,32 18	1,31 24	1,25 30
50 + (50)	MU = VT(%)=	1,68 0	1,56 7	1,46 15	1,37 22	1,29 30	1,17 37
40 + (60)	MU = VT(%)=	1,68 0	1,55 9	1,46 18	1,34 27	1,23 36	1,10 44
30 + (70)	MU = VT(%)=	1,69 0	1,56 10	1,44 20	1,30 31	1,16 41	1,01 51
20 + (80)	MU = VT(%)=	1,71 0	1,54 12	1,40 23	1,24 35	1,09 46	0,91 58

Os valores das massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados (areia fina + areia grossa + EVA + brita “0”) com seus respectivos teores de EVA estão mostrados na Figura 4.8. Essa é uma correlação inversa, à medida que se eleva o volume de EVA na mistura, diminui sua massa unitária, com alto coeficiente de determinação, 0,97.

Figura 4.8 – Relação entre as massas unitárias das misturas compostas com todos os agregados e a porcentagem de EVA em relação ao volume total dos agregados ($VT(\%)$).



Ao comparar a correlação entre as misturas, têm-se as proporções 60 + (40), seguidas da 70 + (30) os piores empacotamentos. Na comparação entre os valores de massa unitária das misturas com os mesmos valores de incorporação de EVA, têm-se as proporções 60 + (40), seguidas das proporções 70 + (30). Os resultados mais baixos (situam-se na parte inferior da curva).

As proporções 50 + (50); 40 + (60); 30 + (70) e 20 + (80) possuem as maiores massas unitárias (comparando valores iguais de incorporação de EVA) e se assemelham entre si, demonstrando graus de empacotamento parecidos.

Com as misturas completas com todos os agregados que foram utilizados nos traços, têm-se nas proporções 50 + (50); 40 + (60); 30 + (70) e 20 + (80) as que apresentam melhores empacotamentos.

4.3.2 Análise das propriedades dos concretos no estado fresco

Por meio de uma avaliação direta, de forma visual e com o manuseio da mistura com a colher de pedreiro, entre outros, pôde-se verificar que as misturas apresentaram consistência plástica e condições normais de manuseio e aplicação (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Ensaio de abatimento do tronco de cone para a mistura 40/(60)-EVA40.



Durante a realização do ensaio de abatimento, percebeu-se que os concretos com EVA apresentavam melhor trabalhabilidade do que o normalmente esperado para a faixa registrada nos valores do abatimento em concretos convencionais, fato esse já percebido por Santiago (2008).

Com a relação água/cimento mantida constante em 0,49, foram obtidos abatimentos dentro do intervalo de 70 mm a 120 mm.

4.3.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

4.3.3.1 Massa Específica

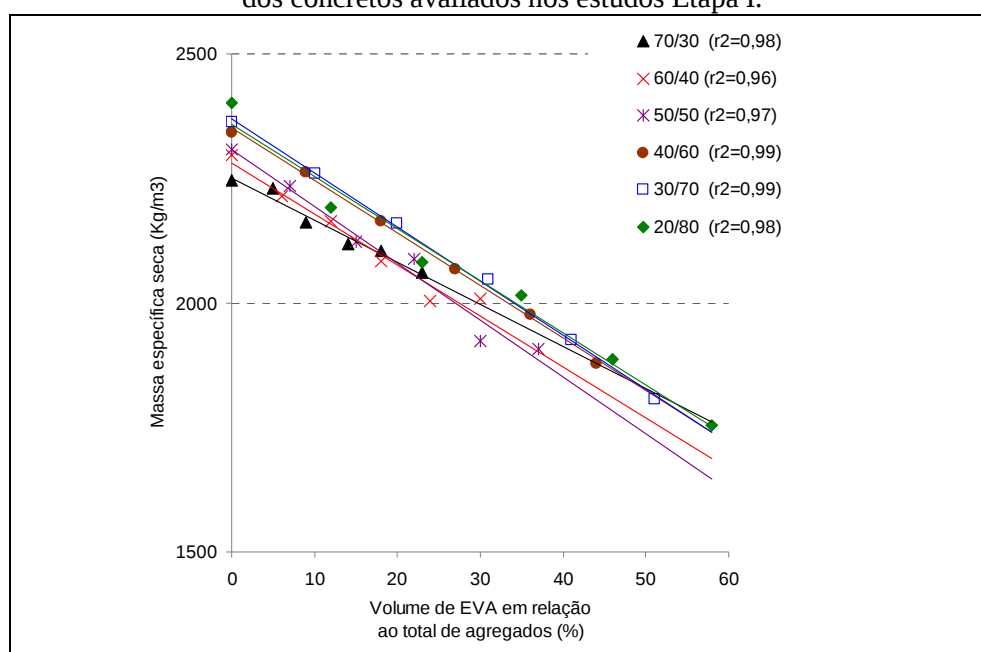
Os valores das massas específicas estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores das massas específicas dos concretos avaliados nos estudos Etapa I.

Nomenclatura da mistura	Volume EVA (% em relação aos agregados)	Massa específica da amostra seca (kg/m ³)	Massa específica da amostra saturada (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)
70/(30)-EVA0	0	2245	2281	2330
70/(30)-EVA20	5	2229	2259	2299
70/(30)-EVA40	9	2162	2197	2241
70/(30)-EVA60	14	2117	2150	2188
70/(30)-EVA80	18	2105	2138	2178
70/(30)-EVA100	23	2060	2091	2126
60/(40)-EVA0	0	2296	2328	2371
60/(40)-EVA20	6	2214	2249	2294
60/(40)-EVA40	12	2163	2198	2241
60/(40)-EVA60	18	2083	2119	2162
60/(40)-EVA80	24	2004	2031	2059
60/(40)-EVA100	30	2008	2039	2073
50/(50)-EVA0	0	2308	2341	2387
50/(50)-EVA20	7	2234	2269	2316
50/(50)-EVA40	15	2123	2151	2185
50/(50)-EVA60	22	2088	2122	2163
50/(50)-EVA80	30	1924	1957	1989
50/(50)-EVA100	37	1907	1934	1961
40/(60)-EVA0	0	2342	2357	2378
40/(60)-EVA20	9	2262	2277	2297
40/(60)-EVA40	18	2164	2179	2197
40/(60)-EVA60	27	2069	2096	2127
40/(60)-EVA80	36	1977	1999	2023
40/(60)-EVA100	44	1878	1902	1925
30/(70)-EVA0	0	2363	2387	2422
30/(70)-EVA20	10	2259	2289	2328
30/(70)-EVA40	20	2159	2187	2221
30/(70)-EVA60	31	2048	2072	2099
30/(70)-EVA80	41	1926	1951	1976
30/(70)-EVA100	51	1806	1831	1852
20/(80)-EVA0	0	2402	2420	2447
20/(80)-EVA20	12	2190	2214	2244
20/(80)-EVA40	23	2081	2101	2124
20/(80)-EVA60	35	2015	2039	2064
20/(80)-EVA80	46	1886	1911	1934
20/(80)-EVA100	58	1753	1776	1795

Com base nos resultados da massa específica seca (Tabela 4.5), obtém-se o gráfico da Figura 4.10, em que se pode observar como se comportam as linhas de tendências da relação volume de EVA *versus* massa específica seca. Em todos os traços, as curvas possuem coeficientes de determinação bem expressivos (acima de 0,9), como era de se esperar, devido à substituição da brita “0” por um agregado mais leve, o EVA. Por meio de uma correlação inversa, conforme se aumenta a incorporação de EVA, diminui a massa específica do concreto.

Figura 4.10 – Relação entre porcentagem do volume de EVA incorporado e a massa específica seca dos concretos avaliados nos estudos Etapa I.



Alguns concretos obtiveram massa específica seca menor que 2000 kg/m^3 , sendo classificados, conforme norma brasileira, de concretos leves: são as misturas 50/(50)-EVA80; 50/(50)-EVA100; 40/(60)-EVA80; 40/(60)-EVA100; 30/(70)-EVA80; 30/(70)-EVA100; 20/(80)-EVA80 e 20/(80)-EVA100.

4.3.3.2 Resistência à compressão axial

As médias dos resultados da resistência à compressão estão mostradas na Tabela 4.6 e ainda os valores dos respectivos desvios-padrão e dos coeficientes de variação. Conforme se acrescenta agregados de EVA, há uma diminuição considerável na resistência à compressão. Essa situação já era esperada devido às características das partículas dos agregados de EVA, de possuir maior porosidade e ser menos rígida do que a pasta de cimento.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão axial, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos avaliados nos estudos Etapa I.

Nomenclatura da mistura	Resistência à compressão					
	07 dias			28 dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
70/(30)-EVA0	33,7	2,66	7,89	41,1	1,76	4,28
70/(30)-EVA20	33,8	1,44	4,26	38,9	1,74	4,46
70/(30)-EVA40	30,7	0,88	2,88	35,7	1,85	5,19
70/(30)-EVA60	25,5	0,56	2,20	31,0	0,71	2,29
70/(30)-EVA80	23,3	1,56	6,72	28,9	0,83	2,88
70/(30)-EVA100	20,4	2,43	11,93	24,8	0,59	2,37
60/(40)-EVA0	36,5	2,72	7,43	41,5	1,86	4,48
60/(40)-EVA20	30,5	2,34	7,67	34,8	1,53	4,41
60/(40)-EVA40	25,6	3,02	11,79	30,1	1,04	3,46
60/(40)-EVA60	23,7	1,25	5,29	27,2	1,69	6,20
60/(40)-EVA80	21,3	1,35	6,35	24,8	0,53	2,14
60/(40)-EVA100	18,1	1,71	9,44	21,1	0,70	3,31
50/(50)-EVA0	33,1	4,07	12,30	38,3	0,93	2,41
50/(50)-EVA20	27,3	1,36	4,97	31,5	1,99	6,33
50/(50)-EVA40	21,7	2,44	11,24	24,8	2,36	9,50
50/(50)-EVA60	19,0	1,98	10,38	22,6	1,08	4,79
50/(50)-EVA80	17,6	1,04	5,92	21,4	1,07	4,99
50/(50)-EVA100	14,7	1,61	10,99	16,8	0,66	3,94
40/(60)-EVA0	33,7	1,28	3,79	39,1	1,02	2,61
40/(60)-EVA20	27,3	2,81	10,29	31,3	1,34	4,28
40/(60)-EVA40	25,3	1,70	6,70	30,4	1,76	5,80
40/(60)-EVA60	20,0	1,72	8,62	25,2	1,06	4,19
40/(60)-EVA80	16,1	1,45	8,98	20,2	1,96	9,67
40/(60)-EVA100	14,0	2,13	15,13	16,5	0,50	3,00
30/(70)-EVA0	38,7	1,17	3,02	41,0	1,46	3,57
30/(70)-EVA20	29,8	2,08	6,99	32,5	2,27	6,98
30/(70)-EVA40	17,2	0,32	1,88	22,0	1,01	4,59
30/(70)-EVA60	20,7	0,64	3,07	21,3	0,58	2,71
30/(70)-EVA80	14,3	1,16	8,13	16,9	0,76	4,49
30/(70)-EVA100	12,5	0,64	5,11	14,6	0,44	3,03
20/(80)-EVA0	32,6	4,13	12,66	39,1	0,45	1,16
20/(80)-EVA20	25,5	2,98	11,72	29,2	0,91	3,10
20/(80)-EVA40	20,6	1,15	5,6	23,4	0,84	3,59
20/(80)-EVA60	12,7	1,36	10,75	15,8	0,95	6,00
20/(80)-EVA80	12,0	1,17	9,76	14,0	0,66	4,72
20/(80)-EVA100	10,2	1,72	16,93	12,3	0,26	2,11

Para verificar estatisticamente a influência do teor de incorporação do agregado de EVA nos resultados da resistência à compressão dos concretos, foi realizada a ANOVA, cujo

resumo dos resultados está apresentado nas Tabelas 4.7 a 4.12, e ainda aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de significância, cujas tabelas completas encontram-se no Apêndice B1, Tabelas B1.1 a B1.6.

Tabela 4.7 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 70+(30) – Etapa I.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	155,11992	84,0020	4,2479	<0,001	**
Erro	18	1,84662				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 4.8 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 60+(40) – Etapa I.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	214,81129	122,7813	4,2479	<0,001	**
Erro	18	1,74954				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 4.9 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 50+(50) – Etapa I.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	241,27730	110,0506	4,2479	<0,001	**
Erro	18	2,19242				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 4.10 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 40+(60) – Etapa I.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	268,08469	144,7150	4,2479	<0,001	**
Erro	18	1,85250				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 4.11 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 30+(70) – Etapa I.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	408,70304	235,2859	4,2479	<0,001	**
Erro	18	1,73705				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 4.12 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 20+(80) – Etapa I.

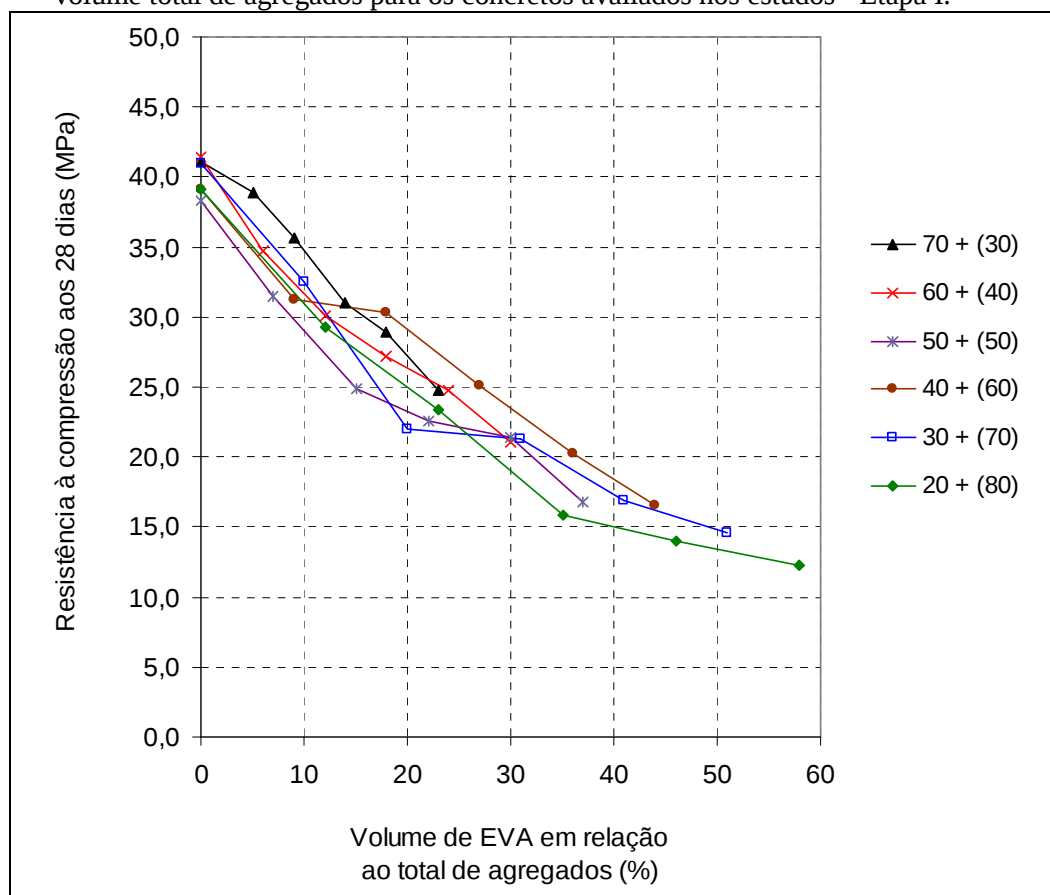
Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamentos: Teores EVA	5	433,63779	829,8361	4,2479	<0,001	**
Erro	18	0,52256				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Nos resultados da análise estatística para o efeito do fator Teores de EVA, o “F” aparece como significativo ao nível de 1% de probabilidade para todos os concretos. Com isso, pode-se afirmar que o aumento da incorporação de EVA provoca perdas na resistência do concreto.

Na Figura 4.11, há o gráfico que relaciona para todos os concretos suas resistências à compressão com os percentuais de EVA presentes no volume total de agregados.

Figura 4.11 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e percentuais de EVA presentes no volume total de agregados para os concretos avaliados nos estudos - Etapa I.



Existe uma aproximação entre as curvas quando se têm os menores valores de incorporação de EVA (até o valor aproximado de 15%), devido ao volume de EVA ainda ser pequeno e, por isso mesmo, ainda não geram influências diferenciadas para as proporções estudadas. A diferença de resistência à compressão para estes concretos, com menor incorporação de EVA, é devido, praticamente, à diferenciação nas distribuições granulométricas das combinações entre os agregados naturais, tendo em vista que a relação cimento/agregados é igual para todos (traço 1:3, em massa) e é mantida a mesma relação água/cimento.

Porém, na medida em que a incorporação de EVA aumenta, verifica-se que existem misturas com mesmo volume de EVA em substituição aos agregados que se apresentam diferentes resistências. Ou seja, podem existir concretos com teores de EVA iguais e com resistências diferenciadas, pois, além da influência da presença do agregado leve, também há a interveniência dos arranjos que se formam entre as proporções dos agregados naturais com o agregado de EVA.

Como podem ser observadas no gráfico, as resistências obtidas pelos concretos que compõem a proporção 40 + (60) (40% de areia grossa e 60% de EVA e brita “0”) possuem melhores resistências se comparadas aos demais concretos compostos pela mesma proporção de EVA. Ou seja, além do fator Teor de EVA, a maneira que as partículas dos materiais interagiram entre si é também algo interveniente na resistência mecânica.

Para se observar melhor essa afirmativa, apresenta-se o Quadro 4.1, em que são mostrados os conjuntos de traços, a partir de intervalos de resistências à compressão (variando de 5 em 5 MPa) relacionados aos valores de EVA incorporados (variando de 5 em 5% de EVA em relação ao volume de agregados).

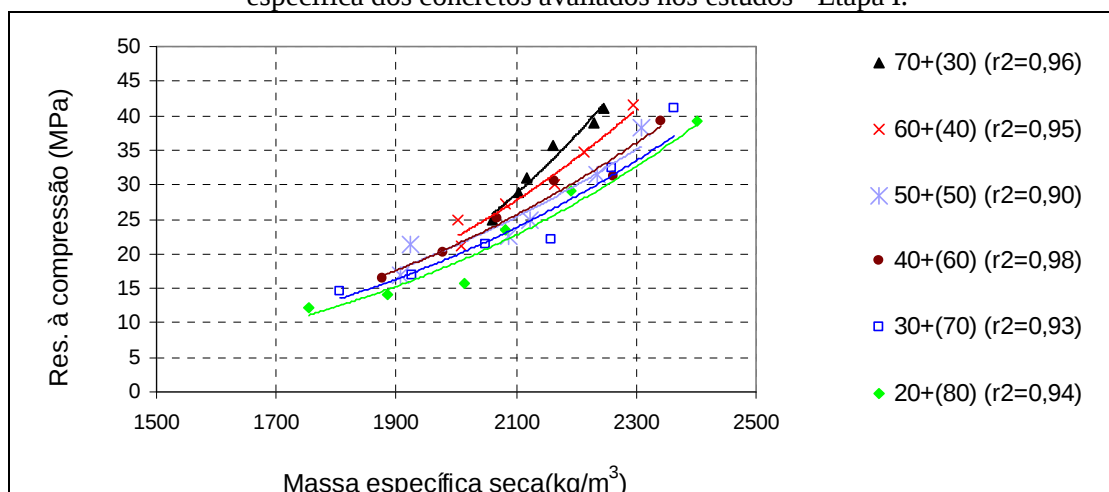
Pelos dados do Quadro 1, verifica-se que os concretos que conseguiram resistências acima de 35MPa foram os sem EVA (concretos de referências) e apenas dois concretos com EVA, porém com pouquíssima incorporação. Quando se analisa o intervalo entre 30MPa - 35MPa, o concreto que consegue atingir essa resistência com maior incorporação de agregado de EVA é o 40/(60)-EVA40, que substitui mais de 15% do volume de todos os agregados (areia fina; areia grossa; EVA e brita “0”) por resíduo de EVA. Para o intervalo entre 25MPa - 30MPa, tem no concreto 40/(60)-EVA60 o melhor desempenho, ao atingir mais de 25% de volume de todos os agregados sendo ocupado por EVA. Para o intervalo entre 20MPa - 25MPa, concreto 40/(60)-EVA80 tem o melhor desempenho, e consegue ter mais de 35% do volume de todos os agregados sendo ocupado por EVA. No intervalo entre 15MPa – 20MPa, os concretos 40/(60)-EVA100 e 30/(70)-EVA80 atingem essas resistências com mais de 40% de volume de todos os agregados sendo ocupados por EVA.

Portanto, a proporção 40+(60) apresenta-se como um desempenho de destaque nas várias faixas de resistência, conseguindo as melhores resistências com o uso de maior quantidade possível de incorporação de resíduo de EVA. Isso deve ser consequência da melhor capacidade atingida na dosagem, em que a presença da areia fina proporcionou um bom empacotamento entre os materiais presentes nessa mistura, como visto nos estudos das proporções anidras dos agregados. E essa proporção manteve-se bem graduada após a substituição da brita “0” pelo agregado de EVA.

4.3.3.3 Relação resistência à compressão e massa específica

Na Figura 4.12, mostram-se os resultados médios da resistência à compressão e massa específica seca dos concretos aos 28 dias, para os traços dos concretos avaliados nesta etapa.

Figura 4.12 – Relação entre a média dos valores de resistência à compressão aos 28 dias e a massa específica dos concretos avaliados nos estudos - Etapa I.



Em todos os traços, a resistência reduz, conforme se diminui a massa específica do concreto, demonstrando uma forte correlação entre essas duas propriedades do compósito. Esse é um comportamento típico dos concretos leves, que assume a existência da correlação resistência do compósito ser oposta à sua densidade.

Com valor da resistência à compressão e a massa específica, encontra-se o Fator de Eficiência para a resistência à compressão (Tabela 4.13). Os concretos com uso de EVA possuem menores fatores de eficiência em relação aos concretos de referência (sem EVA). Isso indica que o uso do EVA provocou uma redução da qualidade da matriz que ocasionou uma perda de "eficiência" dos concretos com EVA relativamente ao concreto convencional.

Entre as proporções avaliadas, os resultados mais elevados foram obtidos nos concretos com 40 + (60) (40% de areia grossa e 60% de EVA e brita "0"), indicando que essa proporção consegue resultados mais eficientes.

Os valores dos Fatores de Eficiência estão, em média, acima dos apresentados pelas demais pesquisas com uso de EVA. Misturas em consistência plástica similares a da presente tese, com uso de EVA e RCD, apresentaram os melhores resultados para os traços com teores de 25% de EVA e 25% de RCD, que obteve um F_{ef} igual a 9 MPa.dm³/Kg e para o concreto com 50% de EVA, com F_{ef} igual a 6,3 MPa.dm³/Kg (SANTIAGO, 2008).

Tabela 4.13 – Fator de eficiência para as idades de 7 e 28 dias para os concretos nos estudos Etapa I.

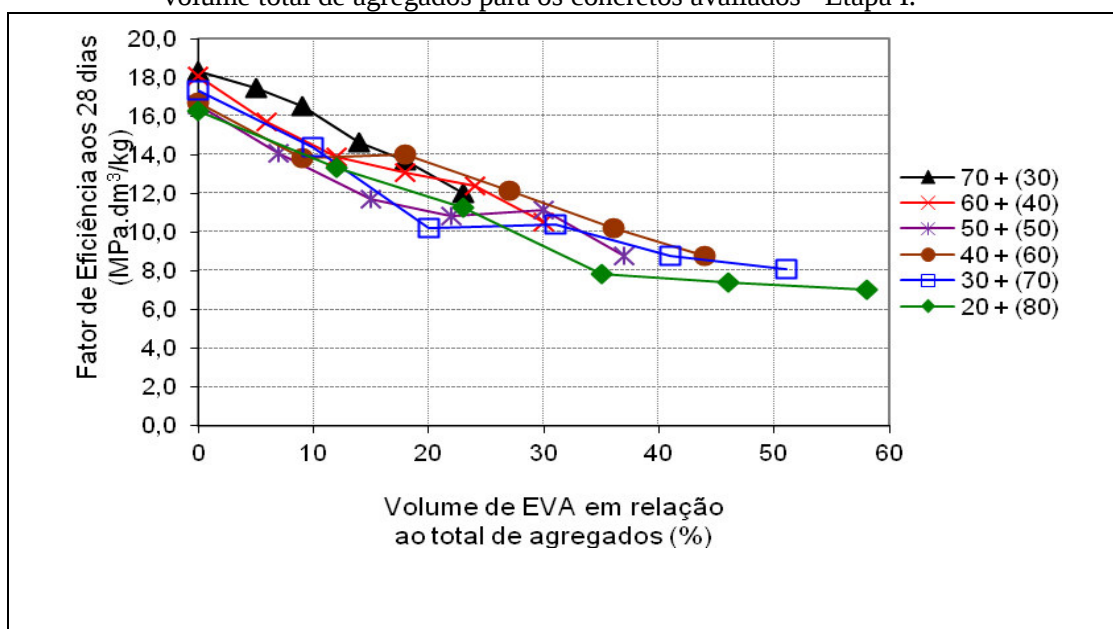
Nomenclatura da mistura	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)					
	07 dias			28 dias		
	Média	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)	Média	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
70/(30)-EVA0	15,0	1,19	7,89	18,3	0,78	4,28
70/(30)-EVA20	15,2	0,65	4,26	17,5	0,78	4,46
70/(30)-EVA40	14,2	0,41	2,87	16,5	0,86	5,18
70/(30)-EVA60	12,0	0,27	2,20	14,6	0,33	2,29
70/(30)-EVA80	11,1	0,74	6,72	13,7	0,40	2,88
70/(30)-EVA100	9,9	1,18	11,92	12,0	0,29	2,37
60/(40)-EVA0	15,9	1,18	7,43	18,1	0,81	4,47
60/(40)-EVA20	13,8	1,06	7,67	15,7	0,69	4,41
60/(40)-EVA40	11,8	1,39	11,79	13,9	0,48	3,45
60/(40)-EVA60	11,4	0,60	5,29	13,1	0,81	6,20
60/(40)-EVA80	10,6	0,68	6,35	12,4	0,26	2,14
60/(40)-EVA100	9,0	0,85	9,44	10,5	0,35	3,30
50/(50)-EVA0	14,3	1,76	12,3	16,6	0,40	2,41
50/(50)-EVA20	12,2	0,61	4,97	14,1	0,89	6,33
50/(50)-EVA40	10,2	1,15	11,23	11,7	1,11	9,50
50/(50)-EVA60	9,1	0,95	10,38	10,8	0,52	4,79
50/(50)-EVA80	9,1	0,54	5,92	11,1	0,55	4,99
50/(50)-EVA100	7,7	0,84	10,99	8,8	0,35	3,94
40/(60)-EVA0	14,4	0,55	3,79	16,7	0,44	2,61
40/(60)-EVA20	12,1	1,24	10,29	13,8	0,59	4,28
40/(60)-EVA40	11,7	0,78	6,70	14,0	0,81	5,80
40/(60)-EVA60	9,7	0,83	8,62	12,2	0,51	4,19
40/(60)-EVA80	8,1	0,73	8,98	10,2	0,99	9,67
40/(60)-EVA100	7,5	1,13	15,23	8,8	0,26	2,99
30/(70)-EVA0	16,4	0,50	3,02	17,4	0,62	3,56
30/(70)-EVA20	13,2	0,92	6,99	14,4	1,00	6,98
30/(70)-EVA40	8,0	0,15	1,87	10,2	0,47	4,59
30/(70)-EVA60	10,1	0,31	3,07	10,4	0,57	5,61
30/(70)-EVA80	7,4	0,60	8,13	8,8	0,39	4,48
30/(70)-EVA100	6,9	0,35	5,11	8,1	0,24	3,02
20/(80)-EVA0	13,6	1,72	12,66	16,3	0,19	1,16
20/(80)-EVA20	11,6	1,36	11,71	13,3	0,41	3,10
20/(80)-EVA40	9,9	0,55	5,60	11,2	0,40	3,59
20/(80)-EVA60	6,3	0,68	10,75	7,8	0,47	6,00
20/(80)-EVA80	6,4	0,62	9,76	7,4	0,35	4,72
20/(80)-EVA100	5,8	0,98	16,93	7,0	0,15	2,11

4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com os resultados obtidos – Etapa I (dosagem de concreto EVA), conclui-se que:

- há um envolvimento dos grãos do agregado de EVA com os demais elementos da mistura de forma a tornar satisfatória as condições de manuseio e aplicação das misturas com consistência plástica;
- os fatores densidade do EVA e a distribuição granulométrica dos componentes da mistura devem ser considerados nos estudos da dosagem. Existe um teor ideal de incorporação do EVA, em torno de 15% de volume em relação ao total dos agregados: acima desse valor, há maior interferência nas propriedades do compósito, devido à presença do agregado leve EVA; abaixo desse valor, por ser pouco o volume do agregado leve, o esqueleto granulométrico entre as partículas de todos elementos da mistura é quem rege os arranjos;
- entre os traços analisados, os obtidos pela proporção 40 + (60) (40% de areia grossa e 60% de EVA e brita “0”) apresentaram mais otimizados fatores de eficiência (Figura 4.13)

Figura 4.13 – Relação entre Fator de Eficiência aos 28 dias e percentuais de EVA presentes no volume total de agregados para os concretos avaliados - Etapa I.



Pela Figura 4.13, pode-se observar que as curvas dos Fatores de Eficiência da proporção 40 + (60) se sobrepõe em relação às demais proporções na faixa de interferência da maior presença do EVA, o que pode ser justificado pela melhor maneira em que as partículas dos materiais interagiram e proporcionaram melhor empacotamento entre si.

Com base nas conclusões obtidas, na Tabela 4.14, estão apresentados os traços adotados e sua classificação, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2009) de classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.

Tabela 4.14 – Apresentação das misturas com melhores desempenhos (maiores resistência com maiores incorporação de agregado EVA) para os concretos avaliados nos estudos - Etapa I (traço 1:3, em massa) definidas conforme Classes de Resistência da NBR 8953 (ABNT, 2009) e classificação⁴.

Nomenclatura da Mistura (ver Tabela 4.6)	Volume de EVA (em % a todos os agregados)	Classe de Resistência (NBR 8953)	Resistência característica a compressão (MPa)	Classificação
40/(60)-EVA40	18	C30	30	C30 S50
40/(60)-EVA100	44	CL15	15	CL15 S50
40/60-EVA0	TR - traço de referencia, mantendo as mesmas proporções, porém SEM adição de EVA			

Foram escolhidos dois traços entre os executados da proporção 40+(60) como indicativos para se usar em finalidades diferentes:

1 - para fins estruturais (30MPa): o traço que incorpora 18% de volume de EVA em relação ao total de agregados (nomenclatura da proporção: 40/(60)-EVA40), classificado como CONCRETO NORMAL e ESTRUTURAL, com resistência igual a 30 MPa.

2 - para fins não estruturais: o traço que incorpora até 44% de volume de EVA em relação ao total de agregados (nomenclatura da proporção: 40/(60)-EVA100), classificado como CONCRETO LEVE e NÃO ESTRUTURAL, com resistência igual a 15 MPa. Nesse concreto, o EVA substitui em 100% a brita.

⁴ Observação:

Por massa específica:

- concreto normal (C): massa específica seca entre 2000Kg/m³ e 2800Kg/m³;
- concreto leve (CL): massa específica seca inferior a 2000Kg/m³;
- concreto pesado ou denso (CD): massa específica seca superior a 2800Kg/m³.

Por classes de resistência:

- para fins estruturais: classificados nos grupos I e II, que compreende a partir da classe C20 (20MPa) a C50 (50MPa) e classe C55 (55MPa) a C100 (100MPa);
- não estruturais: classe de resistência C10 (10MPa) e C15 (15MPa).

Por classes de consistência: (A=abatimento em mm)

- S10: 10 ≤ A ≤ 50; - S50: 50 ≤ A ≤ 100; - S100: 100 ≤ A ≤ 160;
- S160: 160 ≤ A ≤ 220; - S220: 220 ≤ A ≤ 280; - S280: 280 ≤ A ≤ 350.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ABSORÇÃO PRÉVIA DO EVA EM ÁGUA: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS – Etapa II

5.1 INTRODUÇÃO

Como foi discutido na literatura do Capítulo 2, a grande maioria das pesquisas que utiliza o resíduo de EVA como agregado para uso em concreto tem realizado o procedimento de imersão em água antes da preparação da mistura, justificando essa necessidade pelo fato de ser um material poroso que pode absorver a água de amassamento (GARLET, 1998; BEZERRA, 2002; POLARI FILHO, 2005; PIMENTEL, 2005). Entretanto, essa necessidade ainda não foi comprovada e pode ocorrer que tal procedimento não venha influenciar de forma significativa nas propriedades do concreto (MELO *et al.*, 2006).

Justifica-se a realização dessa etapa devido à falta de consenso nos trabalhos precedentes sobre a necessidade de se fazer ou não a imersão prévia em água do agregado de EVA e não comprovações de quais os principais efeitos desse procedimento nos concretos.

Diante disso, essa etapa tem como objetivo avaliar os efeitos do procedimento de imersão prévia do agregado de EVA em água nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, quanto aos resultados de resistência mecânica e no módulo de elasticidade do concreto e nas alterações microestruturais.

5.2 EXPERIMENTAL

Foram produzidos concretos, utilizando agregados de EVA sem e com imersão prévia em água com os traços selecionados na etapa anterior (Etapa I), ou seja, um traço de referência (sem EVA); um traço com incorporação de 18% de volume de EVA em relação ao total de agregados, classificado como CONCRETO NORMAL e ESTRUTURAL; um traço com incorporação de 44% de volume de EVA em relação ao total de agregados, classificado como CONCRETO LEVE e NÃO ESTRUTURAL.

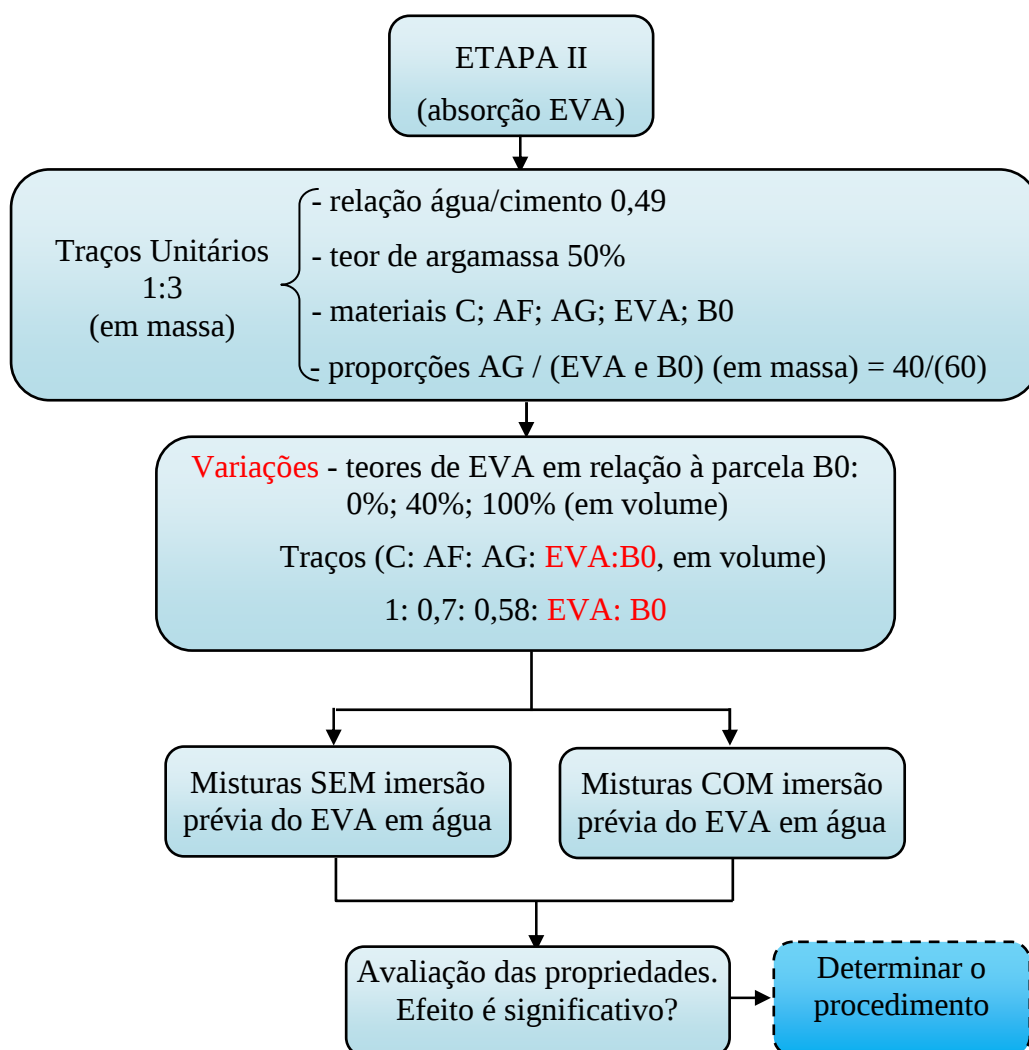
As misturas foram obtidas da seguinte forma:

- mistura **40/(60)-EVA40** : sendo incorporado teor de 40% de EVA em volume substituindo a brita 0. Nesse caso, o teor de EVA representa 18% de volume em relação ao total de agregados;

- mistura **40/(60)-EVA100** : sendo incorporado teor de 100% de EVA em volume substituindo a brita 0. Nesse caso, o teor de EVA representa 44% de volume em relação ao total de agregados.

A estruturação experimental da Etapa II está mostrada no Diagrama 5.1.

Diagrama 5.1 – Estruturação do capítulo 5 – Etapa II.



Observação: C = cimento Portland; AF = areia fina; A = areia grossa; EVA= EVA; B0 = brita 0.

Nessa etapa, os traços de estudo passarão a incorporar as siglas **SI** e **CI**, que indicam misturas **Sem Imersão** e **Com Imersão** prévia em água dos agregados de EVA, respectivamente. E, como os traços têm em comum a proporção 40/60 (40% de areia grossa e 60% de EVA e brita “0”), foi então retirada da nomenclatura essa informação como forma de facilitação da escrita e leitura. A apresentação das misturas estudadas nesta etapa está apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Apresentação das misturas executadas na Etapa II, separadas por SEM ou COM imersão prévia do EVA em água.

Nomenclatura da Mistura	Tratamento	% EVA em volume		Traço (em volume) C: AF: AG: EVA: B0	a/c
		em relação à brita	em relação a todos os agregados		
EVA40:SI	Sem imersão	40	18	1: 0,7: 0,58: 0,41: 0,61	0,49
EVA40:CI	Com imersão				
EVA100:SI	Sem imersão	100	44	1: 0,7: 0,58: 1,02: 0,0	
EVA100:CI	Com imersão				
EVA0	-	-	-	1: 0,7: 0,58: 0,0: 1,02	

Observação: C = cimento Portland; AF = areia fina; EVA = EVA; B0 = brita 0;
a/c = relação água/cimento.

Para a confecção desses concretos, foi utilizada a mesma betoneira da Etapa I (betoneira de laboratório de eixo inclinado, com capacidade de 140 litros), bem como a mesma sequência de colocação dos materiais, sendo: 1º - o EVA; 2º - parte da água com a betoneira ligada; 3º - todo o cimento Portland; 4º - a brita; 5º - toda a areia; 6º - o restante da água. A cura também foi igual, com as amostras em câmara úmida até a data de rompimento, bem como obedeceu a mesma forma de capeamento dos corpos-de-prova e mantida a relação água/cimento de 0,49.

Nas misturas com uso de EVA em estado saturado, o agregado foi colocado em um balde com água, utilizando-se uma tela de nylon, com um peso sobre ela, como barreira para garantir sua total imersão em água; procurou-se evitar que esse flutuasse na superfície da água. O tempo de imersão foi determinado em 60 minutos, recomendado na literatura.

Após esse período de imersão, fez-se a retirada da água que não foi absorvida pelo agregado, deixando a água escoar e reterendo a saída do EVA através da tela de nylon. Fez-se nova pesagem (agregado + água absorvida), e por diferença desse valor em relação à massa do agregado inicial em estado seco, se determinou a quantidade de água incorporada à mistura junto ao EVA. E, portanto, para se manter a relação água/cimento fixa em 0,49 em todas as misturas, adicionou-se na mistura água de complementação do traço.

Para se conseguir atender aos objetivos desta etapa, as variáveis monitoradas nos concretos foram:

- massa específica, absorção de água e índice de vazios no estado endurecido;
- resistência à compressão e o fator de eficiência calculado;
- resistência à tração por compressão diametral e o fator de eficiência calculado;
- módulo estático de elasticidade à compressão.

Os ensaios foram realizados para cada uma das duas situações de aplicação do EVA nas misturas para obtenção dos concretos, ou seja, com e sem imersão prévia em água.

a) ***No estado fresco foram realizados:***

- consistência pelo abatimento do troco de cone (NBR NM 67, ABNT 1998);
- densidade de massa aparente, o rendimento e o teor de ar pelo método gravimétrico (NBR 9833, ABNT 2008).

b) ***No estado endurecido foram determinados:***

- absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, em corpos-de-prova cilíndricos (10cm x 20cm), sendo quatro exemplares (NBR 9778, ABNT 2005);
- resistência à compressão (NBR 5739, ABNT 2007): nas idades de 28, 56, 91 e 154 dias, em corpos-de-prova cilíndricos (10cm x 20cm), sendo quatro exemplares em cada idade;
- resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222, ABNT 2011): na idade de 28 dias, sendo quatro exemplares em corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm);
- módulo estático de elasticidade à compressão (NBR 8522, ABNT 2008): determinado na idade de 210 dias, sendo utilizado para cada amostra cinco corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), sendo três exemplares usados para determinar o módulo de elasticidade e dois para determinação da resistência à compressão. Esse ensaio foi realizado no laboratório da TECOMAT. O equipamento utilizado foi uma prensa EMIC DL60000, cujos valores obtidos foram processados por um sistema de aquisição de dados computadorizada por meio do programa Tesc versão 3.04 para obtenção dos gráficos. Conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2008), foram determinados os níveis de carregamento do ensaio com base na média da resistência à compressão ensaiada, assim obteve-se o valor do módulo de elasticidade (E_{ci}) através da Equação 5.1.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{equação 5.1})$$

Onde: σ_b = tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3f_c$);

σ_a = tensão básica, em megapascals ($\sigma_a = 0,5\text{MPa}$);

ε_b = deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a = deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica.

c) **Na pasta de cimento com EVA:**

- microscopia eletrônica de varredura: o objetivo foi estudar a interface pasta-agregado para avaliar as condições de interação do agregado à matriz cimentante nas duas condições de aplicação: sem e com imersão prévia em água.

Para cada traço analisado, foram ensaiadas duas amostras em pasta, sendo, em cada amostra, realizadas duas séries em linhas de EDS, com 11 pontos de EDS por linhas, totalizando 44 EDS's. Para os quatro traços, foram então realizados 176 pontos de EDS.

A realização dessa análise em pastas de cimento com EVA, sem a colocação dos agregados naturais, tem como objetivo eliminar a interferência dos agregados.

O procedimento de preparação da amostra e o método de análise obedeceram ao seguinte:

Preparação da amostra:

Foram moldadas amostras com as mesmas proporções entre cimento/EVA utilizados nos concretos em estudo. Porém, houve necessidade de alterar a relação água/cimento usada nas misturas moldadas para os concretos, devido à menor quantidade de materiais, e assim o uso da relação água/cimento dos concretos deixou as amostras com excesso de água, impossibilitando sua moldagem.

Portanto, foram realizadas moldagens preliminares até se obter consistências compatíveis aos traços experimentais em concreto, e assim a relação água/cimento foi determinada e mantida constante, para todas as amostras dos ensaios de microscopia, em $a/c=0,40$. Os traços das amostras da pasta de cimento com EVA, para os respectivos concretos desta etapa da pesquisa estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Apresentação dos traços da pasta de cimento com EVA para as misturas executadas na Etapa II, separadas por SEM ou COM imersão prévia do EVA em água.

Nomenclatura da Mistura	Tratamento	Traço (em volume) C: EVA	a/c
EVA40:SI	Sem imersão	1: 0,41	0,40
EVA40:CI	Com imersão		
EVA100:SI	Sem imersão	1: 1,02	
EVA100:CI	Com imersão		
EVA0	-	1: 0,0	

Observação: C = cimento Portland; EVA = EVA; a/c = relação água/cimento.

Foram moldados corpos-de-prova 6x2,5x2,5cm. O procedimento de moldagem e cura seguiu o mesmo realizado para as amostras em concreto, ficando os corpos-de-prova na câmara até a data de realização da preparação da amostra, 28 dias após a moldagem.

Para conseguir as amostras, primeiramente fez-se um corte longitudinal no corpo-de-prova com uma serra diamantada de baixa rotação, lubrificado com água, para reduzir a espessura da amostra. Então se fez uma fratura nela, partindo-a com as mãos, tendo a preocupação de escolher aquelas que obtiveram superfícies mais planas possíveis.

A amostra passou por uma imersão em acetona durante 24 horas para interrupção da hidratação da matriz de cimento. Após esse procedimento, fez-se a secagem em estufa por 24 horas, temperatura de 35°C e colocada em dissecador até o momento do ensaio.

As imagens do ensaio foram obtidas da face da amostra que não teve contato com a serra, pois o corte danifica a superfície ao arranhar as partículas que irão interferir na análise.

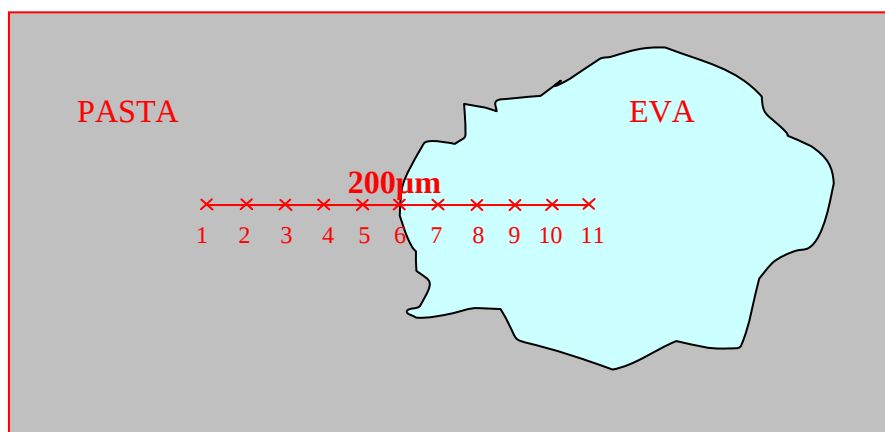
Para análise em EDS, foram escolhidas as amostras com as faces que se apresentaram planas. Após esse procedimento, as amostras foram metalizadas a vácuo conforme procedimento do subitem 3.2.3.3, letra e.

Metodologia de análise:

As amostras foram estudadas por meio da análise de identificação dos produtos de hidratação do cimento presentes na região da pasta situada próxima ao agregado, com a espectrografia por dispersão de energias (EDS), aliadas à análise morfológica com visualização das imagens obtidas por sinais do tipo elétrons secundários (SE) e elétrons retro-espalhados (BSE). Para isso, realizou-se a análise química em uma série de pontos do EDS na área de interface (distância de 100µm entrando na pasta e 100µm entrando no grão de EVA).

Para obtenção dos espectros EDS, foram determinados pontos numa sequência linear, sendo 5 pontos localizados na pasta, 1 ponto no limite pasta-agregado e 5 pontos no interior do agregado, com distâncias de 20µm entre eles, formando assim uma linha imaginária de 200µm perpendicular à linha divisória pasta-agregado, para as duas situações de uso do EVA, sem e com imersão prévia, conforme desenho esquemático da Figura 5.1.

Figura 5.1 – Desenho esquemático da linha imaginária, perpendicular à interface pasta-agregado, com os pontos para obtenção do EDS.

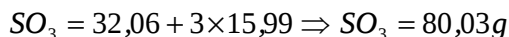
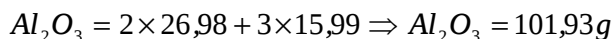
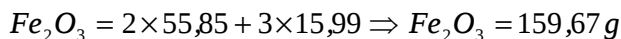
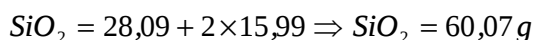
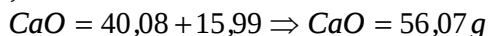


Assim, obteve-se um perfil de vários pontos do EDS, calcularam-se as relações entre os óxidos ao longo de uma determinada extensão no interior da zona analisada e formou-se o perfil das composições dos principais produtos oriundos da hidratação do cimento, com base nas expressões que relacionam valores numéricos à presença dos produtos cimentícios de hidratação, apresentadas no capítulo 2, subitem 2.4.3 (LACHOWSKI *et al.*, 1980; TAYLOR e NEWBURY, 1984; KJELSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; ROSSIGNOLO, 2003).

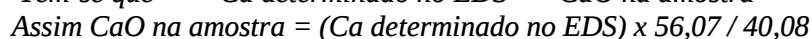
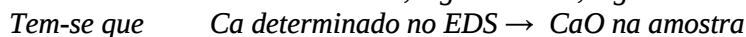
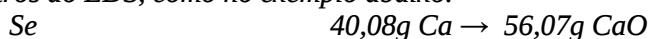
A análise não é muito precisa, sendo essa uma metodologia que encontra teores com valores aproximados, servindo como parâmetros de comparações, com os quais se pode obter um perfil das relações dos óxidos presentes ao longo de uma determinada área no interior da amostra, e isso atende ao que se propõe nessa análise.

Como o espectro do EDS fornece os percentuais em massa dos elementos químicos, teve que se calcular o valor em óxido. Para isso, fez-se o cálculo estequiométrico, conforme segue o procedimento explicativo:

Encontra-se a massa molecular através da soma das massas atômicas dos elementos das moléculas, sendo:



Para encontrar o valor da massa dos óxidos presente na amostra, determina-se através da proporção ao valor do percentual das massas dos respectivos elementos, que corresponde a massa atômica, obtido dos espectros do EDS, como no exemplo abaixo.



Da mesma forma, calculam-se os demais óxidos e efetuam-se as relações das expressões citadas no capítulo 2, subitem 2.4.3.

- Difractometria de Raios-X: o objetivo da realização deste ensaio foi a identificação das fases cristalinas presentes nas pastas das misturas analisadas nesta Etapa II. A identificação das substâncias foi conseguida pelo banco de dados do programa MDI Jade5.

Para a obtenção das amostras em pó, fez a moagem de fragmentos das amostras dos corpos-de-prova (corpos-de-prova preparados conforme mesma metodologia do ensaio do MEV, já descrito anteriormente no subitem 5.3.1.c e apresentados na Tabela 5.2), utilizando um moinho de facas, da marca Fritsch, modelo Pulverisette 14. O pó foi selecionado

utilizando-se peneira com abertura de 0,075mm. Após esse procedimento, a amostra foi colocada em um porta-amostra apropriado para o equipamento e submetida à análise de DRX.

O equipamento utilizado no ensaio foi um Difratorômetro de raios-X, da marca SIEMENS e modelo D-5000 com tubo de alvo de cobre, com filtro de níquel. Para obtenção dos difratogramas, foi transmitindo um comprimento de ondas de 30mA, varredura com passo de $0,01^\circ 2\theta$, movendo-se a uma velocidade de 1seg/passos, com tensão de voltagem de 40 kV, sendo os ângulos de varredura de 3° a $74^\circ (2\theta)$, com radiação $\text{Cu } \alpha$.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Propriedades dos concretos no estado fresco

Para essas misturas da Etapa II, foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone. Conforme já comentado no subitem 4.4.2, as misturas apresentaram consistência plástica, com boas condições de manuseio e aplicação.

Não foram observadas diferenças no aspecto das misturas quando se utilizavam agregados de EVA sem imersão prévia em água (EVA:SI) e com a imersão prévia em água (EVA:CI). As propriedades dos concretos no estado fresco estão apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Propriedades físicas das misturas no estado fresco com relação água/cimento constante= 0,49 - Etapa II.

Nomenclatura da Mistura	Tratamento	Densidade do concreto no estado fresco (kg/m^3)	Teor de ar (%)	Consumo cimento (kg/m^3)	Rendimento do concreto	Abatimento (mm)
EVA40:SI	Sem imersão	2142	2,19	526	1,022	120
EVA40:CI	Com imersão	2136	2,47	525	1,025	110
EVA100:SI	Sem imersão	1833	6,35	534	1,068	90
EVA100:CI	Com imersão	1782	7,26	514	1,078	100
EVA0	-	2344	0,50	522	1,005	120

De acordo com os dados da Tabela 5.3, verifica-se que a densidade do concreto no estado fresco diminui à medida que aumenta os teores de EVA, comportamento esse já esperado, pelo fato da influência da baixa densidade do agregado de EVA.

Os resultados da análise estatística estão apresentados nas Tabela 5.4 e 5.5, por meio da ANOVA e do Teste de Tukey, respectivamente. Os dados estatísticos completos desta análise estão apresentados no Apêndice A1, Tabela A1.1.

Tabela 5.4 – Análise de variância para densidade do concreto no estado fresco aplicando as variáveis : Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	19401,04	35,1506	6,93	<0,001	**
Fator2 – Teores de EVA	1	2530506,13	4584,74	6,93	<0,001	**
Int. F1xF2	1	11801,78	21,38	6,93	<0,001	**
Erro	88	551,94				
Total	91					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

Tabela 5.5 – Teste de Tukey para as médias de interação da densidade do concreto no estado fresco entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	2142 aA	1833 aB
Com	2136 aA	1781 bB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Por meio da ANOVA, verifica-se que (Tabela 5.4):

- os fatores tratamento de imersão e teores de EVA provocam resultados significativos ao nível de 1% de significância.

Pela análise das médias com o Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 5.5):

- para o fator tratamento de imersão, as médias da densidade nas amostras EVA40 não diferem entre si, e entre as amostras EVA100 a diferença é significativa;

- para o fator teores de EVA, as médias das densidades são significativamente menores para as amostras EVA100.

Uma hipótese que pode explicar a diferença entre as densidades dos concretos no estado fresco de traços iguais (EVA100:SI > EVA100:CI) é que, quando se utiliza agregado de EVA sem imersão prévia, existe um achatamento de seus grãos, provocado pelo peso dos demais componentes da mistura durante a moldagem deste concreto. E quando se utiliza agregados de EVA previamente imersos em água, a presença dessa água em seus poros diminui o efeito do achatamento do volume do grão, sendo, nesse caso, os grãos de agregados de EVA previamente imersos em água mais volumosos e, assim, tornam-se um obstáculo maior à saída do ar, o que proporciona a existência de um concreto menos denso.

Esse comportamento ocorreu entre as misturas EVA100:SI e EVA100:CI que possuem maiores teores de agregados de EVA, e não aconteceu entre as misturas EVA40:SI e EVA40:CI, devido à menor incorporação de EVA, que não foi suficientemente volumoso para tornar-se significativo.

Com base nos resultados do ar incorporado naturalmente das misturas estudadas apresentados na Tabela 5.3, verifica-se que há um crescimento, à medida que se incorpora maiores teores de EVA. Incremento na ordem de 340% e 390% nas misturas EVA40:SI e EVA40:CI, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Nas misturas teores de EVA mais elevados, a incorporação é ainda mais expressiva, em torno de 1200% e 1350% de aumento nas misturas EVA100:SI e EVA100:CI, respectivamente.

A análise estatística está apresentada nas Tabelas 5.6 e 5.7. Os dados estatísticos completos desta análise estão apresentados no Apêndice A2, Tabela A2.1.

Tabela 5.6 – Análise de variância para o ar incorporado naturalmente no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	8,20	19,13	6,87	<0,001	**
Fator2 – Teores de EVA	1	460,43	1074,47	6,87	<0,001	**
Int. F1xF2	1	2,19	5,12	3,92	0,026	*
Fatores x Concreto Convencional	1	304,3	710,43	6,87	<0,001	**
Erro	110	0,42				
Total	114					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 < p < 0,05$);

Tabela 5.7 – Teste de Tukey para as médias de interação do ar incorporado naturalmente no concreto entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	2,19 aB	6,35 bA
Com	2,47 aB	7,25 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base nos resultados da ANOVA, verifica-se que (Tabela 5.6):

- os fatores tratamento de imersão e teores de EVA provocam resultados significativos ao nível de 1% de significância.

Ao se fazer o estudo da interação destes efeitos entre as médias das amostras, com o uso do Teste de Tukey, comprova-se que (Tabela 5.7):

- para o fator tratamento de imersão, as médias do valor de ar incorporado nas amostras EVA40 não diferem entre si, e entre as amostras EVA100 a diferença é significativa;
- para o fator teores de EVA, as médias do valor do ar incorporado são significativamente maiores para as amostras EVA100.

A diferença significativa no valor de ar incorporado naturalmente entre as misturas com maior quantidade de agregados de EVA (EVA100:CI > EVA100:SI) é devido às partículas dos grãos de EVA terem menor redução de volume nas misturas EVA100:CI do que

nas misturas EVA100:SI, devido à existência da água no interior dos grãos de EVA com imersão prévia, que dificulta o achatamento do seu volume. Assim, esses agregados tornam-se um obstáculo mais volumoso, e isso dificulta a liberação do ar do interior das misturas EVA100:CI, sendo esse efeito menos perceptivo quando se utiliza misturas com menores teores de EVA, como nas misturas EVA40:SI e EVA40:CI, em que os resultados ficaram próximos.

O aumento de volume de ar incorporado nas misturas com uso de EVA é devido a textura esponjosa e a forma angular dos grãos, que dificultam a liberação das bolhas de ar durante a moldagem da mistura, deixando assim um alto teor de ar no interior do concreto (SANTIAGO, 2008).

Quanto aos dados da Tabela 5.3, em relação aos valores apresentados do consumo de cimento, o fato de se ter adotado um traço rico (1:3), houve em todos os concretos um consumo relativamente elevado e mantido praticamente constante entre eles. Isso ocorreu por se deixar fixa a proporção dos elementos no traço e devido à substituição da brita pelo EVA ter conservado a mesma grandeza volumétrica.

Em relação aos valores encontrados para o rendimento do concreto, à medida que se aumenta o teor de EVA, há um acréscimo no rendimento. Esse fato é devido à presença do material poroso EVA, que provoca uma incorporação natural de ar na mistura.

O valor do abatimento medido por meio do ensaio de abatimento está mostrado na última coluna da Tabela 5.3, ficando no intervalo entre 100 e 120mm, não sendo percebidas diferenças de manuseio e moldagem entre as misturas EVA:SI e EVA:CI.

5.3.2 Propriedades dos concretos no estado endurecido

5.3.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, o ensaio foi realizado sem o processo de fervura prescrito pela norma NBR9778 (ABNT, 2005), para evitar que ocorressem transformações exotérmicas na amostra, devido à fervura, e que viessem prejudicar a confiabilidade do resultado, conforme verificado por Santiago (2008).

Na Tabela 5.8, estão apresentadas as médias dos valores da absorção de água, do índice de vazios e massa específica com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação obtidos conforme procedimento da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), especificamente sem submeter a amostra às condições de fervura. Existe um incremento da absorção de água, à

medida que aumenta a incorporação de EVA nos concretos, devido à estrutura porosa desse material que provoca o aumento do volume de vazios.

Tabela 5.8 – Valores da absorção de água, do índice de vazios e massa específica com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação, para os concretos EVA:SI e EVA:CI.

Traços			Absorção de água por imersão (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica da amostra seca (kg/m ³)		Massa específica da amostra saturada (kg/m ³)		Massa específica real (kg/m ³)	
EVA40:SI	MÉDIA		7,2		14,0		2005		2096		2275	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,37	5,15	0,66	4,69	12,4	0,62	13,2	0,63	17,3	0,76
EVA40:CI	MÉDIA		7,2		13,9		2001		2079		2253	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,36	5,07	0,71	5,13	11,4	0,57	8,71	0,42	20,3	0,90
EVA100:SI	MÉDIA		8,0		13,2		1661		1793		1914	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,49	6,15	0,78	5,93	12,1	0,73	12,6	0,7	19,2	1,00
EVA100:CI	MÉDIA		8,7		14,1		1630		1771		1898	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,39	4,50	0,71	5,02	9,97	0,61	16,4	0,92	26,4	1,39
EVA0	MÉDIA		6,4		13,9		2182		2321		2535	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,14	2,20	0,33	2,37	18,7	0,86	20,2	0,87	27,0	1,06

A análise estatística está nas Tabelas 5.9 e 5.10. Os dados estatísticos completos desta análise estão no Apêndice B.2, Tabela B2.1

Tabela 5.9 – Análise de variância para a absorção de água por imersão no concreto aplicando as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,45	3,32	4,54	0,0879	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	5,32	39,08	8,68	<0,001	**
Int. F1xF2	1	0,54	4,00	4,54	0,0637	Ns
Fatores x Concreto Referência	1	5,95	43,73	8,68	<0,001	**
Erro	15	0,14				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 5.10 – Teste de Tukey para as médias de interação da absorção de água por imersão no concreto entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	7,18 aB	7,97 bA
Com	7,15 aB	8,67 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.9):

- o fator tratamento imersão prévia do EVA apresenta-se como não significativo;
- o fator teores de EVA e, ao comparar os concretos com EVA ao concreto de referência (EVA), gera efeito significativo ao nível de 1% de significância nos resultados.

Ao se fazer o estudo da interação destes efeitos entre as médias das amostras, com o uso do Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 5.10):

- para o fator tratamento de imersão, as médias da absorção de água nas amostras EVA40 não diferem entre si, e entre as amostras EVA100 a diferença é significativa;
- para o fator teores de EVA, as médias da absorção de água são significativamente maiores para as amostras EVA100.

A imersão prévia do EVA fez aumentar a absorção de água nos concretos que possuem maior volume de EVA, indicando que, para esses, há um volume de EVA suficientemente significativo para provocar na pasta do concreto uma massa mais porosa, com maior facilidade de permeabilidade de água.

Quanto ao índice de vazios, os valores entre os concretos EVA:SI e EVA:CI também ficam muito próximos, com pouca diferença entre si.

A análise estatística está nas Tabelas 5.11 e 5.12. . Os dados estatísticos completos desta análise estão no Apêndice B.3, Tabela B3.1.

Tabela 5.11 – Análise de variância para índice de vazios no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,54	1,26	4,54	0,2795	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	0,30	0,70	0,001	>0,050	Ns
Int. F1xF2	1	1,16	2,66	4,54	0,1232	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	0,03	0,07	0,001	>0,050	Ns
Erro	15	0,43				
Total	19					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 5.12 – Teste de Tukey para as médias de interação do índice de vazios no concreto entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	14,04 aA	13,23 aA
Com	13,88 aA	14,14 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Conforme registros da análise estatística (Tabelas 5.11 e 5.12), pode-se afirmar que:

- as diferenças nos valores do índice de vazios são não significativos, mesmo modificando os teores de EVA e aplicando ou não a imersão prévia em água desse agregado.

Em relação à massa específica seca, tem-se uma redução no seu valor, à medida que se eleva o teor de EVA; e, ao comparar as misturas nas condições EVA:SI e EVA:CI, os valores ficaram bem próximos, havendo uma pequena diferenciação nas misturas EVA100:SI e EVA100:CI, onde se tem no concreto com uso de EVA sem imersão prévia em água um valor um pouco mais elevado (Tabela 5.8). A análise estatística está nas Tabelas 5.13 e 5.14. Os dados estatísticos completos desta análise estão apresentados no Apêndice B.4, Tabela B4.1

Tabela 5.13 – Análise de variância para massa específica seca no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	1242,86	7,06	4,54	0,0179	*
Fator2 – Teores de EVA	1	511409,13	2904,07	8,68	<0,001	**
Int. F1xF2	1	715,79	4,06	4,54	0,0619	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	410322,86	2330,05	8,68	<0,001	**
Erro	15	2641,5				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 5.14 – Teste de Tukey para as médias da massa específica seca no concreto entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	2004,75 aA	1660,56 aB
Com	2000,50 aA	1629,5 bB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.13):

- o fator tratamento imersão prévia e o fator teores de EVA apresentam-se como significativos;

Ao se fazer o Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 5.14):

- para o fator tratamento de imersão, as médias da massa específica seca nas amostras EVA40 não diferem entre si, e entre as amostras EVA100 a diferença é significativa;

- para o fator teores de EVA, as médias da massa específica seca são significativamente menores para as amostras EVA100.

5.3.2.2 Resistência à compressão

As médias dos resultados da resistência à compressão estão apresentadas na Tabela 5.15 e ainda os valores dos respectivos desvios-padrão e dos coeficientes de variação.

Alguns resultados do coeficiente de variação possuem valores elevados, o que pode indicar uma variação de volume do agregado leve presente nas amostras com o mesmo valor de teor de EVA pré-definido. Isso se dá devido a uma provável dificuldade de homogeneização da presença dos grãos de EVA no interior da mistura, e, com isso, pode acontecer que, na hora do lançamento da mistura nos moldes dos corpos-de-prova, se tenha valores diferentes de EVA para o mesmo concreto.

Tabela 5.15 – Resistência à compressão axial, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.

Traços			07 dias		28 dias		56 dias		91 dias		182 dias	
EVA40:SI	MÉDIA (MPa)		23,2		30,4		31,7		32,9		33,5	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	3,04	13,11	0,93	3,07	1,39	4,38	2,46	7,47	6,32	18,8
EVA40:CI	MÉDIA (MPa)		24,5		31,4		31,0		31,9		31,8	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,5	2,05	3,4	10,8	1,32	4,25	1,35	4,21	4,0	12,5
EVA100:SI	MÉDIA (MPa)		13,2		16,3		18,3		18,3		17,7	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,24	1,79	0,78	4,79	0,5	2,71	0,53	2,87	1,73	9,8
EVA100:CI	MÉDIA (MPa)		9,79		14,6		16,1		16,4		16,2	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,24	2,42	0,71	4,86	0,22	1,37	0,37	2,24	1,75	10,8
EVA0	MÉDIA (MPa)		32,1		40,2		47,4		50,4		53,2	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	1,46	4,56	0,76	1,89	2,78	5,87	3,56	7,05	4,59	8,64

De acordo com os dados da Tabela 5.15, verifica-se que as resistências do concreto de referência ficam bem acima dos concretos com EVA, como já visto nos estudos da Etapa I, em que a presença do agregado leve provoca diminuição na resistência do concreto, como já explicado naquela etapa.

Ao comparar os resultados entre os mesmos traços nas condições EVA:SI e EVA:CI, verifica-se que existe uma aproximação de seus resultados, indicando que não há alterações substanciais nas resistências ao se utilizar agregados de EVA imersos ou não previamente em água.

Apesar dessa aproximação, no concreto com teor de EVA mais elevado, tem-se o EVA100:CI que apresenta resistência um pouco inferior ao do concreto EVA100:SI.

Sendo assim, o processo de imersão prévia em água do agregado de EVA não trouxe benefícios à resistência do concreto, e sim, provocou uma pequena redução nas resistências, quando se compara aos concretos que utilizaram maiores teores de EVA.

Com a ANOVA e o Teste de Tukey, verificou-se estatisticamente a influência do tratamento de imersão prévia em água do agregado, do teor de EVA e do tempo nos resultados da resistência à compressão do concreto de EVA e se ocorre a interação dessas influências entre si.

Na Tabela 5.16, está apresentado o estudo estatístico da ANOVA. Os dados estatísticos completos desta análise estão apresentados no Apêndice B1, Tabela B1.7.

Tabela 5.16 – Análise de variância para a resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	27,60	5,67	4,00	0,0205	*
Fator2 – Teores de EVA	1	4228,22	868,15	7,08	<0,001	**
Fator3 – Idade	4	147,45	30,27	4,00	<0,001	**
Int. F1xF2	1	18,03	3,70	3,65	0,0589	Ns
Int. F1xF3	4	1,03	0,21	0,12	>0,050	Ns
Int. F2xF3	4	7,26	1,49	2,52	0,2164	Ns
Int. F1xF2xF3	4	3,53	0,72	0,12	>0,050	Ns
Erro	60	4,87				
Total	79					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 < p < 0,05$);

ns = não significativo ($p > 0,05$).

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.16):

- o fator tratamento imersão e o fator teores EVA apresentam-se como significativo.

Na Tabela 5.17, há o estudo da interação tratamento imersão e teores de EVA.

Tabela 5.17 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	30,33 aA	16,75 aB
Com	30,11 aA	14,62 bB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base no teste de Tukey da Tabela 5.17, tem-se que:

- para o fator tratamento imersão, as médias das resistências à compressão nas amostras EVA40 não diferem entre si, e entre as amostras EVA100 a diferença é significativa;

- para o fator teores de EVA, as médias da resistência à compressão são significativamente menores para as amostras EVA100.

Na Tabela 5.18, há o estudo da interação tratamento imersão ao longo do tempo.

Tabela 5.18 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias)

Tratamento imersão	Idade				
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	182 dias
Sem	18,19 aB	23,33 aA	24,98 aA	25,59 aA	25,62 aA
Com	17,14 aB	22,97 aA	23,51 aA	24,19 aA	24,01 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base no teste de Tukey da Tabela 5.18, tem-se que:

- a interação dos fatores Tratamento de Imersão com a Idade, em ambas as situações (EVA:SI e EVA:CI), os concretos aumentam de resistência nas primeiras idades e se mantêm estatisticamente constantes nas idades mais avançadas. Ou seja, o uso de agregado de EVA sem ou com imersão prévia em água, conserva, proporcionalmente, o comportamento típico da evolução da resistência dos concretos ao longo do tempo.

Na Tabela 5.19, tem-se o estudo da interação teores de EVA ao longo do tempo.

Tabela 5.19 – Teste de Tukey para as médias da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias)

Teores de EVA	Idade				
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	182 dias
18% (EVA40)	23,85 aB	30,86 aA	31,32 aA	32,42 aA	32,66 aA
44% (EVA100)	11,48 bB	15,44 bA	17,17 bA	17,35 bA	19,97 bA

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base no teste de Tukey da Tabela 5.19, tem-se que:

- a interação dos fatores Teores de EVA com a Idade, os concretos, em ambos os teores (18% e 44%) têm os crescimentos das suas médias de resistências nas primeiras idades, e se mantêm estatisticamente constantes nas idades mais avançadas.

- as médias das resistências dos concretos EVA100 se mantêm diferentes das resistências dos concretos EVA40 para qualquer idade.

5.3.2.3 Fator de Eficiência para a resistência à compressão

As médias dos resultados dos fatores de eficiência para a resistência à compressão estão apresentadas na Tabela 5.20 e seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

Tabela 5.20 – Fator de eficiência para resistência à compressão, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.

Traços		07 dias		28 dias		56 dias		91 dias		182 dias	
EVA40:SI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	11,6		15,2		15,8		16,4		16,7	
	Desvio Padrão Coef. Var.	1,52	13,11	0,47	3,07	0,69	4,38	1,23	7,47	3,15	18,8
EVA40:CI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	12,3		15,7		15,5		16,0		15,9	
	Desvio Padrão Coef. Var.	0,25	2,05	1,70	10,8	0,66	4,25	0,67	4,21	2,0	12,6
EVA100:SI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	7,9		9,8		11,0		11,0		10,7	
	Desvio Padrão Coef. Var.	0,14	1,79	0,47	4,79	0,30	2,71	0,32	2,87	1,04	9,8
EVA100:CI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	6,0		8,9		9,8		10,1		10,0	
	Desvio Padrão Coef. Var.	0,15	2,42	0,44	4,86	0,14	1,37	0,23	2,24	1,08	10,8
EVA0	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	14,7		18,4		21,7		23,1		24,4	
	Desvio Padrão Coef. Var.	0,67	4,56	0,12	8,25	1,27	5,87	1,63	7,05	2,11	8,6

Com base nos resultados da Tabela 5.20, verifica-se que:

- os fatores de eficiência nas misturas EVA40:SI e EVA40:CI são praticamente iguais;
- nas misturas EVA100, os valores dos fatores de eficiência na condição EVA:SI são maiores, em relação aos concretos na condição EVA:CI, com acréscimo na ordem de 1MPa.dm³/kg;
- os concretos sem EVA obtiveram os maiores resultados, em média a diferença desses é da ordem de 6MPa.dm³/kg, em relação aos concretos EVA40, e de 9MPa.dm³/kg para os concretos EVA100.

Os resumos dos resultados estatísticos estão apresentados nas Tabelas 5.21 até 5.23. Os dados estatísticos completos estão apresentados no Apêndice B1, Tabela B1.8.

Tabela 5.21 – Análise de variância para o Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias)

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	7,10	5,63	4,00	0,0209	*
Fator2 – Teores de EVA	1	619,03	490,6	7,08	<0,001	**
Fator3 – Idade	4	43,54	34,51	3,65	<0,001	**
Int. F1xF2	1	5,31	4,21	4,00	0,0444	*
Int. F1xF3	4	0,25	0,20	0,12	>0,050	Ns
Int. F2xF3	4	0,93	0,74	0,12	>0,050	Ns
Int. F1xF2xF3	4	1,06	0,84	0,12	>0,050	Ns
Erro	60					
Total	79					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 < p < 0,05$);

ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 5.22 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	15,13 aA	10,08 aB
Com	15,05 aA	8,97 bB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 5.23 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, entre as variáveis estudadas: Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91 e 182 dias)

Teores de EVA	Idade				
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	182 dias
18% (EVA40)	11,91 aB	15,41 aA	15,64 aA	16,19 aA	16,31 aA
44% (EVA100)	6,97 bB	9,38 bA	10,43 bA	10,54 bA	10,31 bA

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.21):

- o fator tratamento imersão prévia, o fator teores de EVA e o fator idade são significativos nos resultados do fator de eficiência da resistência à compressão;

- a interação das médias do tratamento imersão e teores de EVA é, praticamente, não significativa, e as interações entre os demais fatores apresentam-se como não significativas.

Pelo Teste de Tukey, tem-se que (Tabelas 5.22 e 5.23):

- para o fator tratamento de imersão, as médias do fator de eficiência nas amostras EVA40 não diferem entre si. Entre as amostras EVA100, a diferença é significativa, sendo o Fator de Eficiência inferior quando se utiliza EVA imerso previamente em água;

- os comportamentos estatísticos já analisados das amostras se mantêm inalterados ao longo do tempo.

5.3.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

As médias dos resultados das resistências à tração por compressão diametral estão apresentadas na Tabela 5.24, assim como os valores dos respectivos desvios-padrão e dos coeficientes de variação.

Tabela 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.

Traços		28 dias	
EVA40:SI	MÉDIA (MPa)	2,6	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,36 13,8
EVA40:CI	MÉDIA (MPa)	2,6	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,06 2,23
EVA100:SI	MÉDIA (MPa)	1,4	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,22 14,9
EVA100:CI	MÉDIA (MPa)	1,7	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,39 22,9
EVA0	MÉDIA (MPa)	3,2	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,27 8,25

De acordo com os dados da Tabela 5.24, as médias para os mesmos teores de EVA para as condições de tratamento EVA:CI e EVA:SI são próximos. Os concretos com maior porcentagem de EVA (EVA100) apresentaram menores resistências, e o de referência apresentou o melhor resultado.

Nas Tabelas 5.25 e 5.26, são apresentadas a análise de variância ANOVA e o Teste de Tukey, sendo analisadas as variáveis Tratamento Imersão e Teores de EVA para a resistência à tração por compressão diametral. Os dados detalhados encontram-se no Apêndice B1, Tabela B1.9.

Tabela 5.25 – Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,06639	0,8234	0,001	>0,050	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	4,13389	51,2671	8,6831	<0,001	**
Int. F1xF2	1	0,07469	0,9262	0,001	>0,050	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	4,14324	51,3830	8,6831	<0,001	**
Erro	15	0,08063				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 5.26 – Teste de Tukey para as médias da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias nos concretos, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	2,60 aA	1,44 aB
Com	2,59 aA	1,71 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.25):

- o fator tratamento imersão prévia apresenta-se como não significativo;
- o fator teores de EVA é significativo ao nível de 1% de significância.

Pelo Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 5.26):

- para o fator tratamento de imersão, as médias das resistências à tração de todas as amostras não diferem entre si;
- para o fator teores de EVA, as médias da resistência à tração são significativamente menores para as amostras EVA100.

5.3.2.5 Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral

As médias dos resultados estão apresentadas na Tabela 5.27 e seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

Tabela 5.27 – Fator de Eficiência para resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.

Traços			28 dias	
EVA40:SI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		1,3	
	Desvio	Coef.	0,18	13,8
	Padrão	Var.		
	EVA40:CI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		1,3
Desvio		Coef.	0,03	2,23
Padrão		Var.		
EVA100:SI		Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		0,9
	Desvio	Coef.	0,13	14,9
	Padrão	Var.		
	EVA100:CI	Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		1,0
Desvio		Coef.	0,24	22,9
Padrão		Var.		
EVA0		Fator Eficiência (MPa.dm ³ /kg)		1,5
	Desvio	Coef.	0,12	8,25
	Padrão	Var.		

De acordo com os dados da Tabela 5.27, as médias para os mesmos teores de EVA e para as condições de tratamento EVA:CI e EVA:SI são praticamente iguais, demonstrando que tal procedimento não interfere nos valores dessa resistência, havendo uma diminuição no fator de eficiência, quando se compara os concretos com EVA e o concreto de referência, ou seja, a presença do EVA provoca diminuição na resistência à tração.

Os resumos dos resultados estatísticos estão apresentados nas Tabelas 5.28 e 5.29. Os dados estatísticos completos estão apresentados no Apêndice B1, Tabela B1.10.

Tabela 5.28 – Análise de variância do Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,03179	1,2980	4,5431	0,2723	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	0,45051	18,3915	8,6831	<0,001	**
Int. F1xF2	1	0,03262	1,3317	4,5431	0,2664	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	0,39179	15,9942	8,6831	0,0012	**
Erro	15	0,02450				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 5.29 – Teste de Tukey para as médias do Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias nos concretos, entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	1,30 aA	0,87 aB
Com	1,29 aA	1,05 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados da ANOVA, tem-se (Tabela 5.28):

- o fator tratamento imersão prévia apresenta-se como não significativo;
- o fator teores de EVA é significativo ao nível de 1% de significância.

Pelo Teste de Tukey, tem-se que:

- para o fator tratamento de imersão, as médias dos pontos de eficiência à tração de todas as amostras não diferem entre si;
- para o fator teores de EVA, as médias dos fatores de eficiência à tração são significativamente menores para as amostras EVA100.

5.3.2.6 Módulo estático de elasticidade à compressão (E_c)

As médias dos resultados dos módulos de elasticidades estão apresentadas na Tabela 5.30 e seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

Tabela 5.30 – Módulo estático de elasticidade à tração compressão aos 210 dias, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa II.

Traços			Média	
EVA40:SI	Módulo de Elasticidade (GPa)		21,3	
	Desvio	Coef.	6,30	29,58
	Padrão	Var. (%)		
EVA40:CI	Módulo de Elasticidade (GPa)		24,7	
	Desvio	Coef.	1,12	4,53
	Padrão	Var. (%)		
EVA100:SI	Módulo de Elasticidade (GPa)		16,5	
	Desvio	Coef.	0,80	4,82
	Padrão	Var. (%)		
EVA100:CI	Módulo de Elasticidade (GPa)		14,1	
	Desvio	Coef.	0,30	2,13
	Padrão	Var. (%)		
EVA0	Módulo de Elasticidade (GPa)		35,5	
	Desvio	Coef.	0,15	0,42
	Padrão	Var. (%)		

Os resultados encontrados evidenciam que existe uma diminuição do valor do E_c , à medida que se acrescenta maior incorporação de EVA. Segundo Garlet (1998), isso indica a ductilidade do material, provocada pelas propriedades elásticas do polímero.

Tomando como base os concretos EVA40 que são classificados como estruturais de classe de resistência C30, pela nova norma NBR6118 que está em revisão, concretos C30 com uso de agregados granito e gnaise teria o limite mínimo do módulo um valor de 31GPa. A deformação elástica do concreto depende fundamentalmente da sua composição, especialmente dos agregados. Por isso, a norma apresenta alguns coeficientes de correção, em função do tipo de agregado graúdo, que devem ser multiplicados aos limites do módulo por ela tabelados. Assim, no uso de concretos com EVA, precisa também ser adotado no projeto estrutural um possível coeficiente de correção para esse agregado.

Dessa forma, há nos concretos com EVA um comportamento diferenciado aos concretos convencionais, que, nos resultados analisados, os concretos EVA40:SI e EVA40:CI ficaram com valores de 68,7% e 79,7%, respectivamente dos valores do módulo da classe C30 de norma.

A redução do módulo de elasticidade devido à presença do EVA pode ocasionar uma fragilidade do sistema, quanto aos limites da deformação de uma peça submetida às condições

estruturais (GARLET, 1998), que deve ser considerado nos valores de cálculo estrutural. Há, portanto, quanto ao uso estrutural desses concretos, limitações, devido ao baixo valor do módulo, e que devem ser consideradas nas verificações de serviço (deslocamento) da estrutura.

Por outro lado, esses concretos, ao passarem por acentuadas deformações antes da ruptura, poderão assim prevenir rupturas bruscas como normalmente ocorrem nos concretos normais (PIMENTEL, 2005).

Nas Tabelas 5.31 e 5.32, estão apresentados a ANOVA e o teste de Tukey. Os valores detalhados desse estudo estatístico encontram-se no Apêndice B5, Tabela B5.1.

Tabela 5.31 – Análise de variância do Módulo de Elasticidade aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,70083	0,0836	0,001	>0,050	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	175,56750	20,9541	10,0443	0,001	**
Int. F1xF2	1	24,94083	2,9767	4,9646	0,115	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	643,53750	76,8067	10,0443	<0,001	**
Erro	10	8,37867				
Total	14					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 5.32 – Teste de Tukey para as médias Módulo de Elasticidade dos concretos, entre as variáveis: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	21,3 aA	16,5 aA
Com	24,7 aA	14,1 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas;

Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base nos resultados da ANOVA, verifica-se que (Tabela 5.31):

- o fator tratamento imersão prévia apresenta-se como não significativo;
- o fator teores de EVA é significativo ao nível de 1% de significância.

No estudo entre as médias das amostras, com o teste de Tukey, tem-se (Tabela 5.32):

- para o fator tratamento de imersão, as médias do módulo entre todas as amostras não diferem entre si;

- para o fator teores de EVA, as médias do módulo nas amostras EVA:SI não diferem entre si; e das amostras EVA:CI são significativamente menores para as amostras EVA100.

Portanto, o tratamento imersão não é um fator interventor para alterar o módulo.

Nos concretos EVA:SI, mesmo alterando os teores de EVA, não apresentou alteração estatisticamente significativa no módulo de elasticidade; já para os concretos que EVA:CI,

houve uma diminuição estatisticamente significativa no valor do módulo para o concreto com maior teor de EVA. Isso demonstra que, quando se faz a imersão prévia do EVA em água, o concreto fica mais suscetível aos efeitos da presença do EVA, provavelmente devido ao agregado de EVA previamente saturado provocar uma maior relação a/c na região da interface pasta-EVA do que o agregado sem imersão prévia em água. Esse acúmulo de água na interface irá sair com o tempo, gerando assim uma região mais porosa.

5.3.3 Análises da microestrutura da pasta de cimento com o EVA

No concreto convencional, o ganho da resistência mecânica é relacionado com a microestrutura da zona da pasta-agregado, que é influenciada pela relação água/cimento, composição do agregado, tipo de cimento e agregado. Por analogia, propõe-se a resistência mecânica do concreto com o EVA, que será influenciada pela zona microestrutura entre a pasta, os agregados naturais e o EVA, além da influência do grão de EVA, devido se tratar de um agregado leve de baixa resistência.

As discussões apresentadas até então nesta pesquisa sobre as condições de uso do agregado de EVA sem ou com imersão prévia em água foram baseadas nos resultados das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido quanto às alterações ocorridas na absorção de água, na massa específica, nas resistências, nos fatores de eficiências à compressão e à tração e nos valores do módulo de elasticidade.

Neste subitem, será abordada a busca do entendimento da microestrutura da pasta de concreto nas condições de uso do EVA sem e com imersão prévia em água.

Os trabalhos encontrados na literatura que abordam o uso de EVA como agregado leve não realizaram estudos sobre microestruturas, e, portanto, não existe nenhum conhecimento a respeito dos mecanismos de interação do agregado de EVA com a matriz de cimento. As técnicas a serem utilizadas nos estudos da microestrutura serão semiquantitativas por meio da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), Difractometria de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

5.3.3.1 Estudo semiquantitativo da zona de transição por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

As análises foram realizadas nas pastas (28 dias de hidratação) para as quatro misturas que utilizam resíduos de EVA (EVA40:SI; EVA40:CI; EVA100:SI; EVA100:CI).

Para cada mistura, foram preparadas duas amostras e, em cada amostra, obtidas duas linhas imaginárias de 200µm perpendicular a linha divisória pasta-agregado, com 11 pontos de EDS em cada linha, totalizando 44 EDS em cada mistura, abrangendo uma região com 100µm de distância da interface para dentro da pasta e 100µm de distância da interface para dentro do grão de EVA. Portanto, foram obtidos 176 EDS's.

Estão apresentadas nas Tabelas 5.33 a 5.36 as médias dos resultados das relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO para os pontos posicionados na linha imaginária, calculadas conforme metodologia descrita no subitem 5.2, letra c.

Tabela 5.33 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA40:SI

Relação	Relação entre massas atômicas totais											
	Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	(µm)	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
	Elemento	Pasta					Int.		EVA			
$\frac{CaO}{SiO_2}$	M	7,85	6,89	5,10	5,97	7,86	6,35	4,55	2,79	2,03	1,66	1,82
	DV	3,83	1,62	1,37	2,04	1,84	2,20	4,22	2,72	1,25	1,09	0,98
	CV	48,8	23,5	26,8	34,1	23,4	34,6	92,8	97,5	61,4	65,7	53,7
$\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO}$	M	0,11	0,11	0,12	0,12	0,08	0,15	0,31	0,43	0,53	0,71	0,53
	DV	0,04	0,04	0,04	0,02	0,01	0,06	0,29	0,21	0,37	0,67	0,40
	CV	40,5	35,9	33,1	14,0	14,8	39,6	92,1	49,1	70,1	93,6	75,2
$\frac{SO_3}{CaO}$	M	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04					
	DV	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02					
	CV	1,5	22,4	31,6	21,7	42,1	45,2					

Obs: M = média; DV=desvio padrão; CV=coeficiente de variação(%); Int=interface.

Tabela 5.34 - Relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA40:CI

Relação	Posição (µm) Elemento	Relação entre massas atômicas totais										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
		Pasta			Int.			EVA				
$\frac{CaO}{SiO_2}$	M	9,31	5,26	5,54	5,50	4,94	7,71	4,62	6,23	4,32	7,36	7,64
	DV	5,44	3,16	3,33	1,64	3,65	3,74	2,86	4,55	3,74	4,67	5,49
	CV	58,4	60,2	60,0	29,9	73,8	48,5	61,8	73,0	86,6	63,4	71,9
$\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO}$	M	0,06	0,13	0,09	0,13	0,10	0,11	0,17	0,16	0,28	0,10	0,13
	DV	0,02	0,04	0,05	0,05	0,08	0,06	0,11	0,11	0,22	0,07	0,15
	CV	34,3	28,2	51,5	39,4	84,0	55,3	67,4	69,6	80,0	73,8	112
$\frac{SO_3}{CaO}$	M	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07					
	DV	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05					
	CV	29,7	32,5	50,5	24,0	59,2	68,0					

Obs: M = média; DV=desvio padrão; CV=coeficiente de variação(%); Int=interface.

Tabela 5.35 - Relações CaO/SiO₂, (Al₂O₃+Fe₂O₃)/CaO e SO₃/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA100:SI

Relação	Posição (μm) Elemento	Relação entre massas atômicas totais										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
		Pasta					Int.	EVA				
<u>CaO</u>	M	5,01	4,07	5,04	4,78	6,93	7,80	7,10	7,16	5,46	3,23	4,08
<u>SiO₂</u>	DV	1,66	1,25	2,88	0,86	5,02	6,04	7,20	6,31	5,21	3,63	4,53
	CV	33,1	30,6	57,2	18,0	72,4	77,4	101	88,1	95,3	112	111
<u>Al₂O₃ + Fe₂O₃</u>	M	0,15	0,15	0,14	0,10	0,08	0,12	0,40	0,50	0,78	1,17	1,25
<u>CaO</u>	DV	0,09	0,08	0,08	0,01	0,04	0,09	0,63	0,79	1,32	1,22	1,72
	CV	60,0	52,1	55,7	10,2	44,5	77,2	159	157	168	104	137
<u>SO₃</u>	M	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01					
<u>CaO</u>	DV	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00					
	CV	50,5	16,5	13,9	38,0	22,7	26,7					

Obs: M = média; DV=desvio padrão; CV=coeficiente de variação(%); Int=interface.

Tabela 5.36 - Relações CaO/SiO₂, (Al₂O₃+Fe₂O₃)/CaO e SO₃/CaO obtidos a partir das massas atômicas totais para a idade de 28 dias – Mistura EVA100:CI

Relação	Posição (μm) Elemento	Relação entre massas atômicas totais										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
		Pasta					Int.	EVA				
<u>CaO</u>	M	4,35	5,51	5,67	5,78	12,66	10,24	1,60	0,91	0,81	1,42	1,66
<u>SiO₂</u>	DV	0,79	2,16	4,25	3,86	10,70	8,46	0,85	0,95	0,65	1,62	1,88
	CV	18,2	39,1	75,0	66,8	84,5	82,7	52,9	104	81,1	114	113
<u>Al₂O₃ + Fe₂O₃</u>	M	0,12	0,11	0,08	0,11	0,08	0,12	0,57	1,73	1,85	1,16	1,08
<u>CaO</u>	DV	0,02	0,05	0,03	0,04	0,05	0,08	0,37	1,37	1,60	0,72	0,83
	CV	17,4	49,3	34,1	36,6	61,7	67,3	64,8	78,8	86,6	62,1	76,9
<u>SO₃</u>	M	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04					
<u>CaO</u>	DV	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03					
	CV	7,1	20,2	44,7	31,7	51,9	86,2					

Obs: M = média; DV=desvio padrão; CV=coeficiente de variação(%); Int=interface.

As análises que correlacionam os resultados aos produtos de hidratação do cimento serão realizadas somente na área da Pasta, pois há dificuldade de se obter uma análise coerente a respeito dos valores das relações dos óxidos presentes no EVA, com base nas expressões propostas pelo método, haja vista, no agregado de EVA, haver alguns elementos iguais aos do cimento e que fazem parte da composição do composto polimérico. O perfil na área do EVA foi apresentado, então, apenas para se observar em qual posição há alteração nos resultados, o que pode indicar mudança de material, e assim poder-se-á ter uma ideia de uma provável penetração da pasta no agregado.

A seguir, são apresentadas as imagens em MEV nas quatro áreas analisadas para as amostras das pastas de cimento com EVA das misturas que utilizaram teor de EVA de 18%, sem e com imersão prévia em água (Figuras 5.2 e 5.3), e ainda o gráfico em que são mostrados os valores de suas relações molares (Figuras 5.3 e 5.5).

Figura 5.2 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA40:SI.

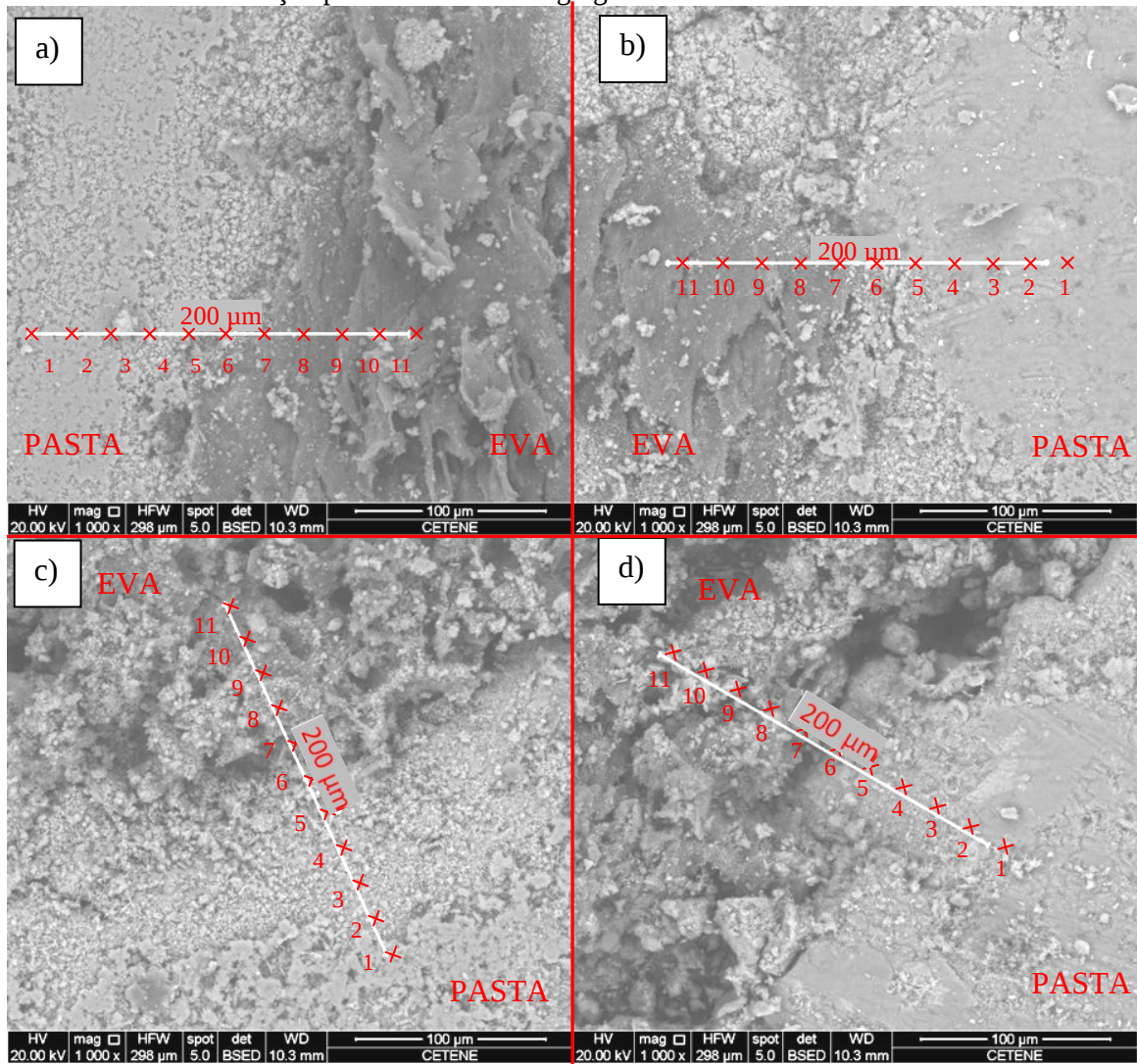


Figura 5.3 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA40:SI.

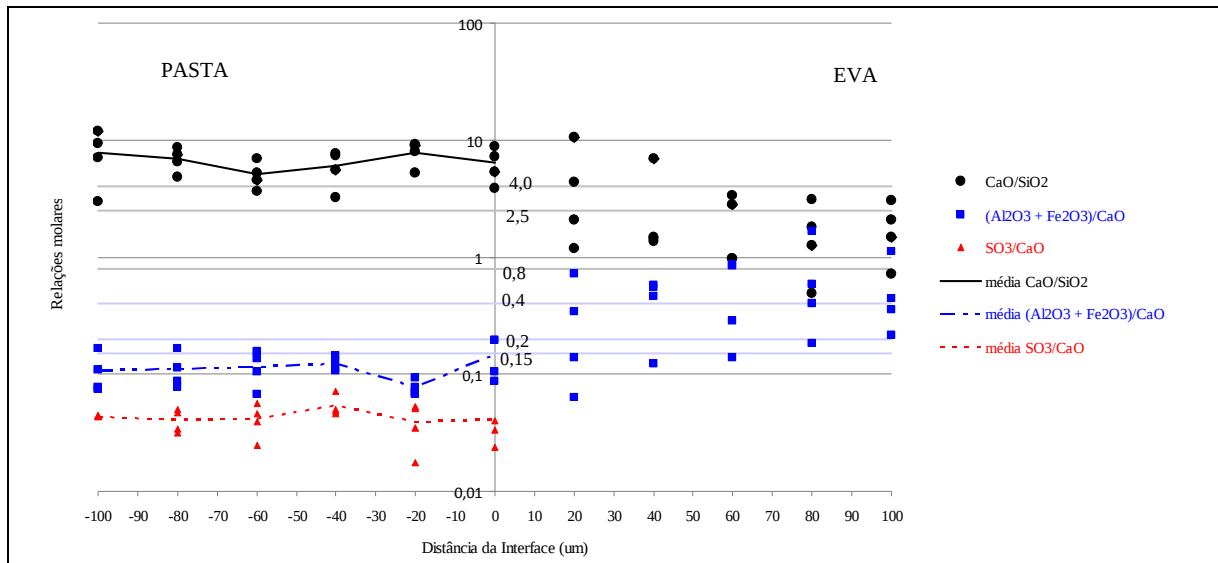


Figura 5.4 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA40:CI.

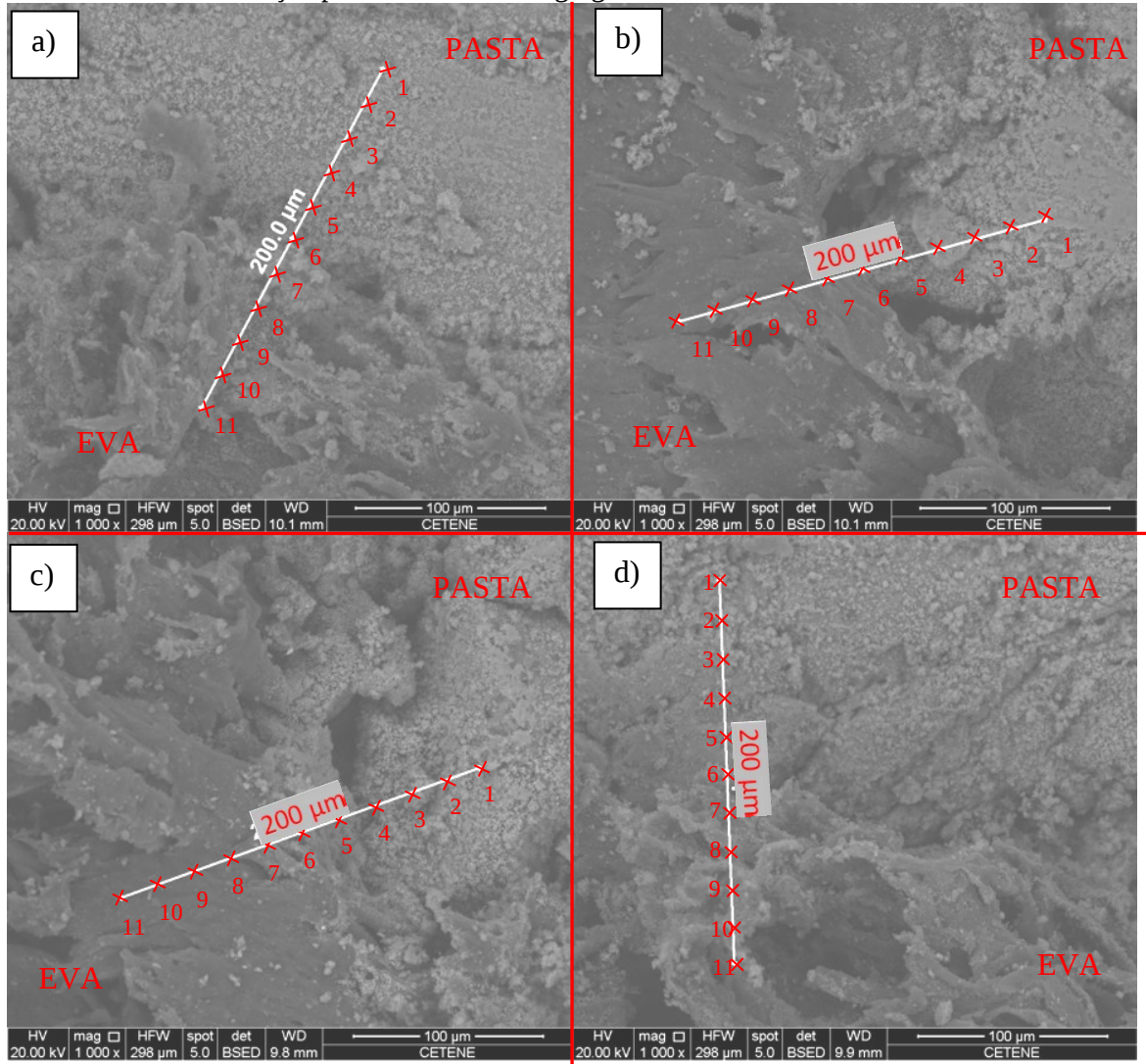
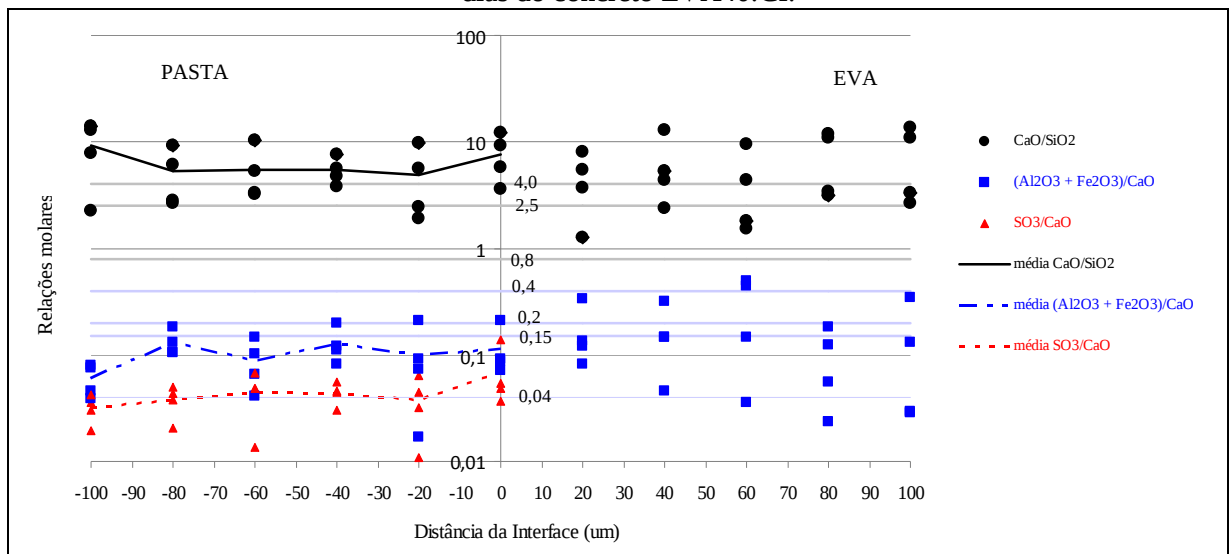


Figura 5.5 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA40:CI.



Os espectros EDS para cada um dos pontos analisados em todas as amostras de pastas de cimento com agregado de EVA estão apresentados no Apêndice C (Mistura EVA40:SI – nos subitens C1.1; C1.2; C1.3 e C1.4); (Mistura EVA40:CI – nos subitens C2.1; C2.2; C2.3 e C2.4); (Mistura EVA100:SI – nos subitens C3.1; C3.2; C3.3 e C3.4); (Mistura EVA100:CI – nos subitens C4.1; C4.2; C4.3 e C4.4).

Ao observar a evolução das relações CaO/SiO_2 , $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO para os concretos que incorporaram baixo teor de EVA (EVA40:SI e EVA40:CI), percebe-se que, em ambas situações, as curvas das relações molares se situam em faixas de grandezas semelhantes, sem tendência de declive ou aclave, não havendo modificações significativas dos valores dos elementos de hidratação do cimento ao se aproximar do grão de EVA.

A não variação das faixas de intervalo indicativas das relações molares ao longo do trecho avaliado da pasta, demonstra que não se registraram regiões fortemente características que sejam preferenciais à maior formação de algum tipo de elementos de hidratação. Houve apenas um sutil crescimento da curva SO_3/CaO para as amostras EVA40:CI, ao se aproximar da interface, indicando que, nessas condições, pode surgir um pouco mais de etringita do que na mistura EVA40:SI. Porém, em ambas situações, os resultados estão bem abaixo de 0,15, indicando ser ínfima a quantidade de etringita.

Com a análise semiquantitativa da espectrografia por dispersão de energias (EDS) ao comparar as amostras EVA40:SI e EVA40:CI, não se demonstrou que a imersão do agregado em água possa interferir nos resultados, e assim, ambos os concretos demonstram ter comportamentos microestruturais semelhantes. Pode ter ocorrido que o pouco volume de EVA presente nas amostras, em relação ao volume de pasta, não foi suficiente para interferir no comportamento da mistura. Também não pôde ser observada muito nitidamente a espessura da zona de transição nessas amostras.

A seguir, são apresentadas as imagens em MEV das amostras do traço com maior incorporação de EVA, 44% (Figuras 5.6 e 5.8) e ainda o gráfico em que são mostrados os valores de suas relações molares (Figuras 5.7 e 5.9).

Quando se faz a comparação entre os concretos EVA100:SI e EVA100:CI, surge então uma situação diferenciada ao analisar as curvas CaO/SiO_2 entre as misturas. Em ambos, apesar da maior parte das relações CaO/SiO_2 , apresentarem abaixo de 10, o que indica pouca concentração de CH ao longo dos pontos da pasta, pode-se verificar que, ao se aproximar da interface, tem-se uma elevação desta relação.

Figura 5.6 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado de EVA do concreto EVA100:SI.

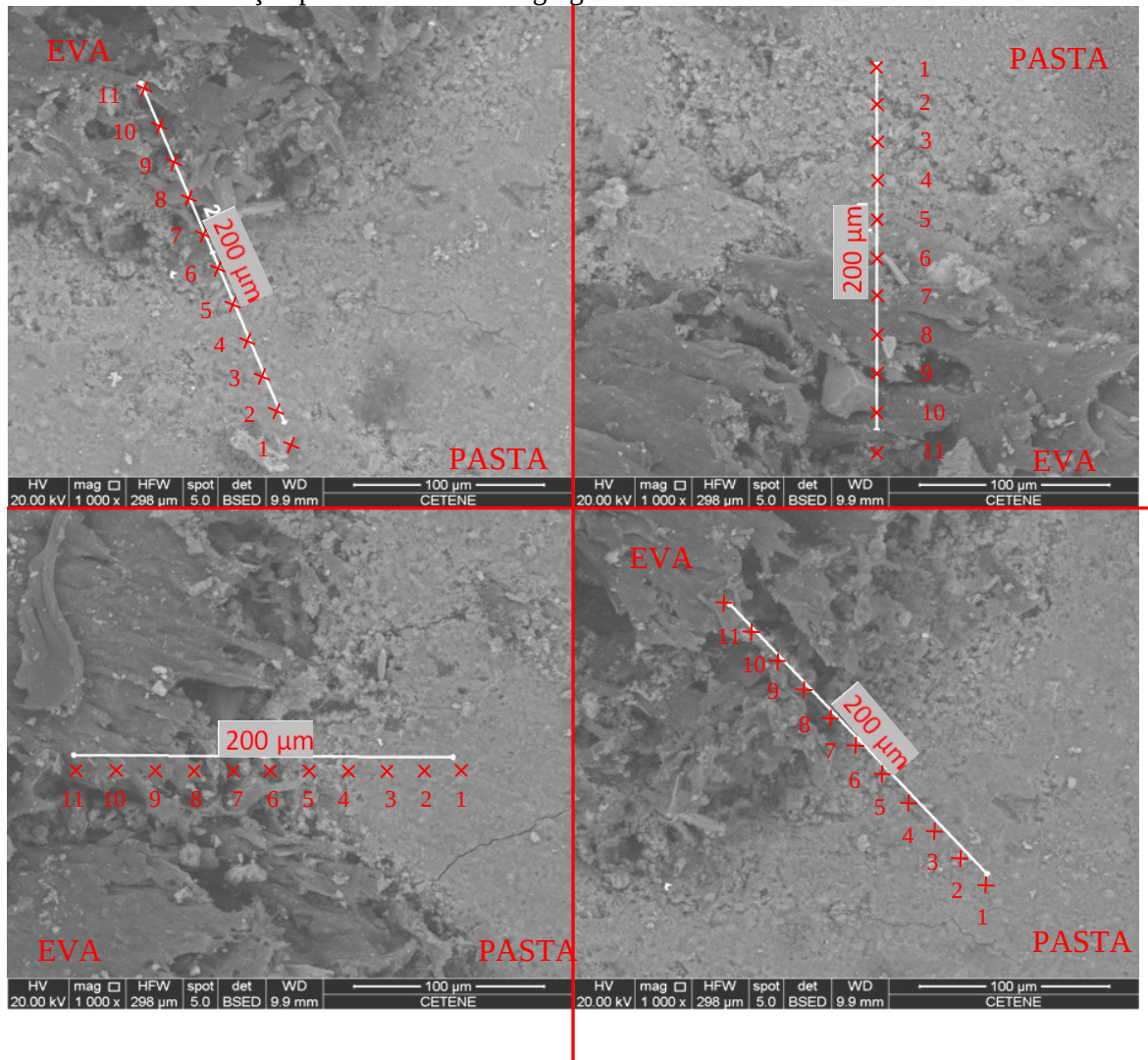


Figura 5.7 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA100:SI.

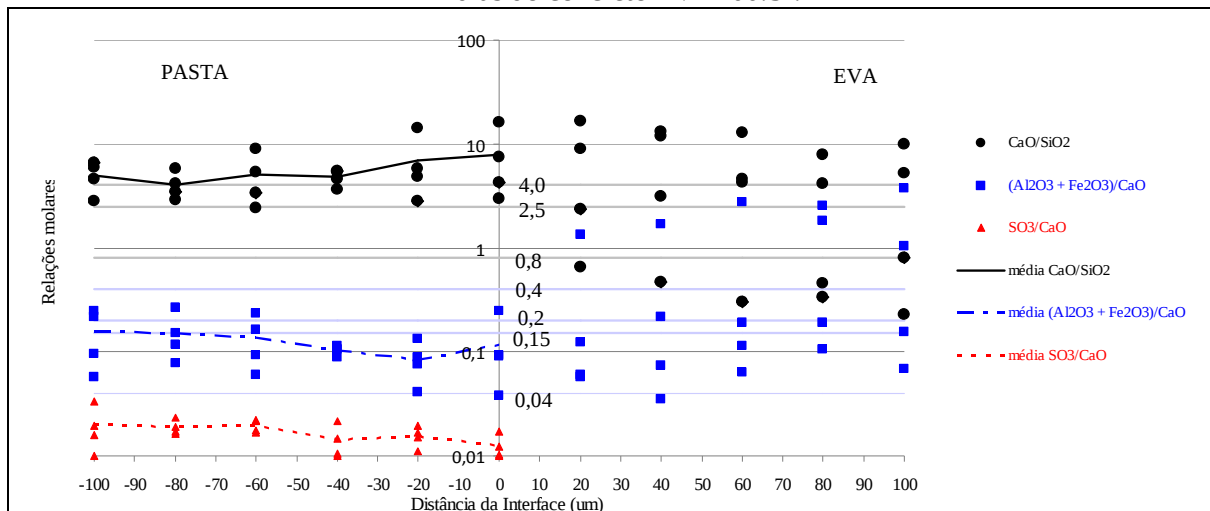


Figura 5.8 – Imagens em MEV elétrons retroespalhados dos pontos obtidos para EDS da zona de transição pasta de cimento e agregado EVA do concreto EVA100:CI.

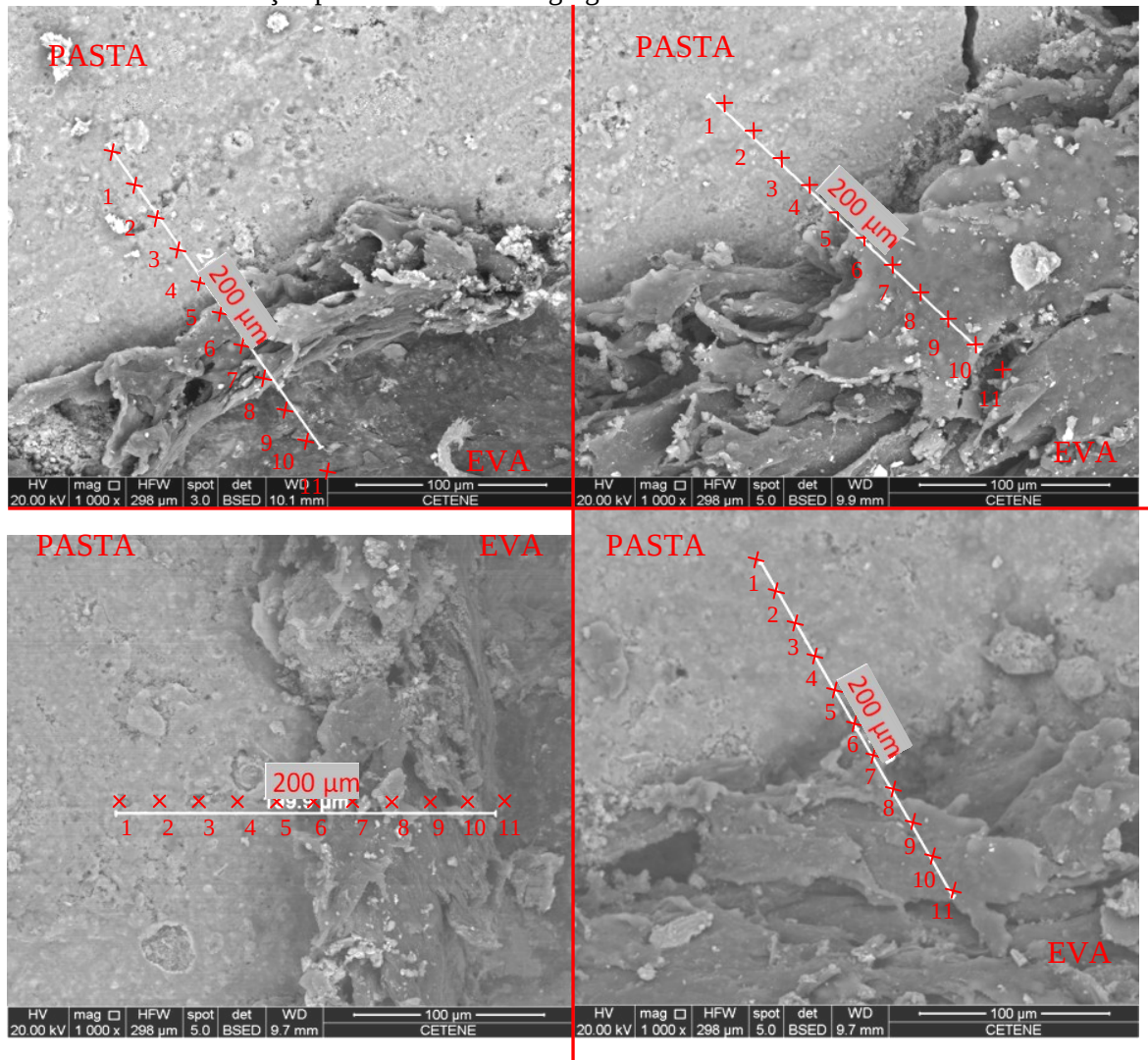
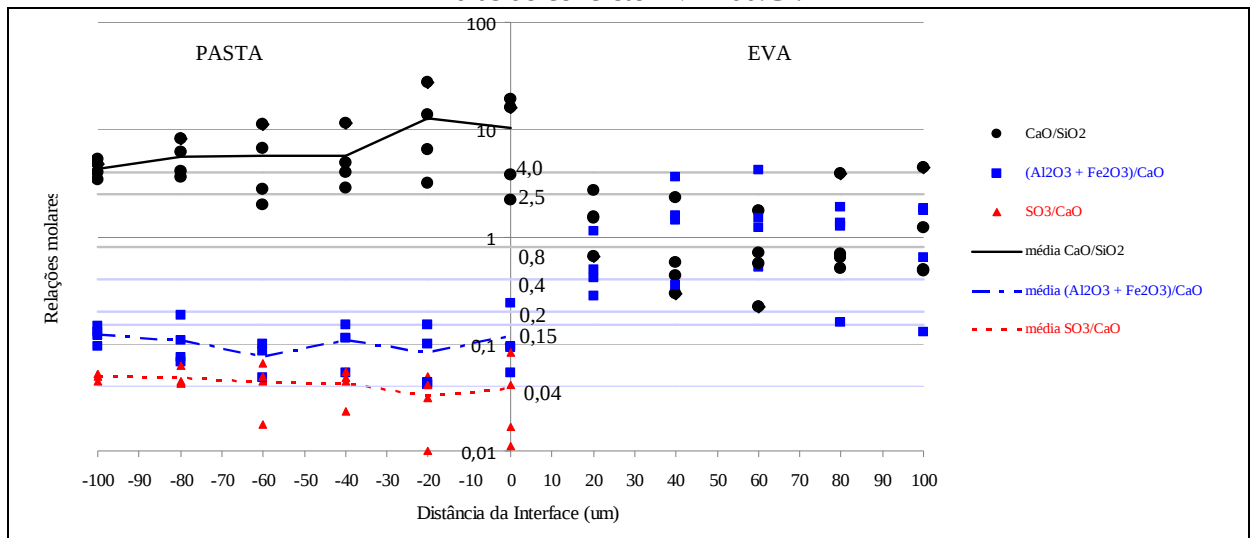


Figura 5.9 – Relações entre massas atômicas totais na pasta de cimento com agregado na data de 28 dias do concreto EVA100:CI.



O crescimento da relação CaO/SiO_2 , quando se aproxima do grão de EVA, é bem mais expressivo nas amostras na condição EVA100:CI, chegando nessa área a uma maior quantidade de pontos com valores CaO/SiO_2 acima de 10, indicando um aumento na formação da face CH e redução da quantidade de CSH nesta região, fato característico das zonas de transição, como ocorre quando se utiliza agregados comuns.

O comportamento das curvas $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO permanece praticamente constante em todos os pontos analisados da matriz de cimento.

Como as relações $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ e SO_3/CaO ficaram constantes, a espessura da zona de transição foi determinada observando a distância entre a interface pasta-agregado e o ponto em que os valores da relação CaO/SiO_2 sofreram alterações. Sendo assim, para os concretos EVA:SI e EVA:CI, tem-se na posição de 40 μm o crescimento dessa relação, o que indica menor quantidade de CSH e maior concentração de compostos cristalinos hidróxidos de cálcio.

Essa situação foi mais acentuada nas amostras na condição EVA100:CI. Portanto, nesse concreto, tem-se um comportamento um pouco parecido com o que ocorre com os concretos com uso de agregados naturais, em que há um acúmulo de água na região próxima ao agregado. Em situações de relação água/cimento mais elevada, formam-se os produtos em cristais relativamente maiores e, conseqüentemente, tem-se uma região mais porosa do que o restante da pasta, e de menor resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Isso pode explicar os resultados mais baixos encontrados nas resistências mecânicas, ao comparar os resultados dos concretos EVA100:CI com o EVA100:SI.

Uma explicação para este comportamento parecido com o dos agregados naturais é que, com o agregado com imersão prévia em água, os poros do grão do EVA tendem a ficar “vedados” por água, o que dificulta a penetração da água da mistura ao seu interior, deixando a interface com acúmulo de água, e que, conseqüentemente, torna a pasta mais porosa nessa região na mistura EVA:100CI. Essa superfície vedada do grão do EVA saturado pode provocar ainda a ocorrência do efeito parede.

Nas misturas EVA:SI, como o agregado está seco, seus poros superficiais estão livres e abertos. Assim, consegue absorver parte da água da pasta durante seu processo de endurecimento, reduzindo a relação água/cimento, conseqüentemente, contribuindo na resistência da matriz na interface pasta/agregado de EVA. Esse mesmo comportamento foi detectado em concretos com uso de agregados leves de argila expandida, em que, sem imersão prévia em água, obtiveram interfaces mais densas e melhores resistências mecânicas, se comparadas as dos concretos que utilizaram agregados previamente saturados em água

(SWAMY e LAMBERT, 1981; WASSERMAN e BENTUR, 1996; KJELLSSEN *et al.*, 1998; VIEIRA, 2000; LO e CUI, 2004).

Quanto à penetração da pasta no interior do agregado, existe uma imprecisão apresentada nos cálculos das relações molares (Tabelas 5.33 a 5.36), devido à presença dos elementos químicos do polímero interferirem nas determinações dos óxidos para uso nesta metodologia, como se pode verificar nos altos valores dos coeficientes de variação obtidos nas amostras. Portanto, esta análise deve ser feita com restrições, apenas como caráter indicativo. Entre as amostras analisadas, as que obtiveram resultados com possibilidades mais expressivas de análise foram as misturas que utilizaram maior quantidade de EVA, apresentadas nas Tabelas 5.35 e 5.36.

Com base nesses resultados, considerando-se os valores médios da relação CaO/SiO_2 ao penetrar no EVA (Tabela 5.35), na mistura EVA100:SI, as importâncias dessas relações se assemelham entre o ponto da interface e os dois primeiros pontos adentrando no grão (valores: 7,8; 7,10 e 7,16, respectivamente), o que pode indicar que, até a profundidade de 40 μm no interior do agregado, o comportamento do material analisado é o mesmo, e assim provavelmente a pasta de cimento penetrou nos poros do agregado de EVA. Isso é facilitado, pois os poros do EVA encontram-se sem água. Já na situação EVA100:CI (Tabela 5.36), há uma alteração brusca na média da relação CaO/SiO_2 da interface e do primeiro ponto dentro do grão de EVA (valores: 10,24 e 1,60, respectivamente), o que indica comportamento diferenciado do material e, provavelmente, não há penetração da pasta. Com isso, há uma hipótese de que a pasta de cimento penetra mais profundamente nos grãos de EVA que não tiveram imersão prévia em água, e isso fortalece a ligação pasta-EVA.

5.3.3.2 Estudo da pasta por meio das fases identificadas nos difratogramas (DRX)

Os resultados obtidos nas análises de DRX para as pastas das misturas que utilizam resíduos de EVA (EVA40:SI; EVA40:CI; EVA100:SI e EVA100:CI) e também da mistura de referência (EVA0) na idade de 28 dias estão apresentados nas Figuras 5.10 a 5.14.

As amostras com EVA mantiveram as fases cristalinas hidratadas do cimento, pois, ao comparar os picos nos difratogramas da amostra da pasta sem EVA (Figura 5.10) com as amostras de pastas com EVA (Figuras 5.10 a 5.14), não houve o surgimento de picos diferentes aos registrados pela mistura sem EVA ou no difratograma da amostra do EVA puro (Figura 3.7), indicando que não deve ter se formado produtos de reações do cimento com o polímero, ou esse é mal cristalizado ou amorfo.

Figura 5.10 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA0

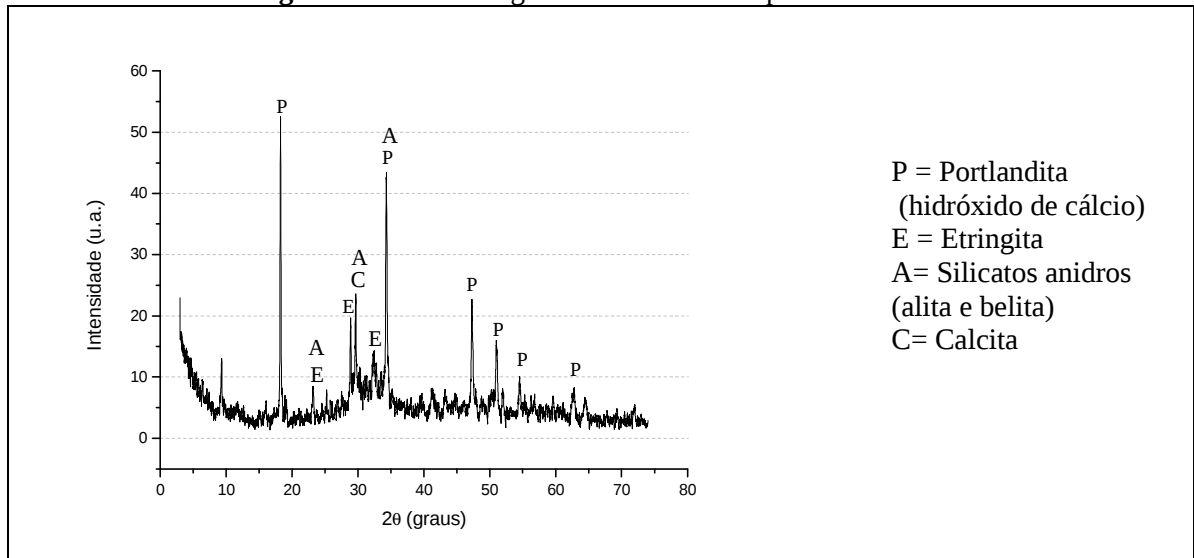


Figura 5.11 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA40:SI

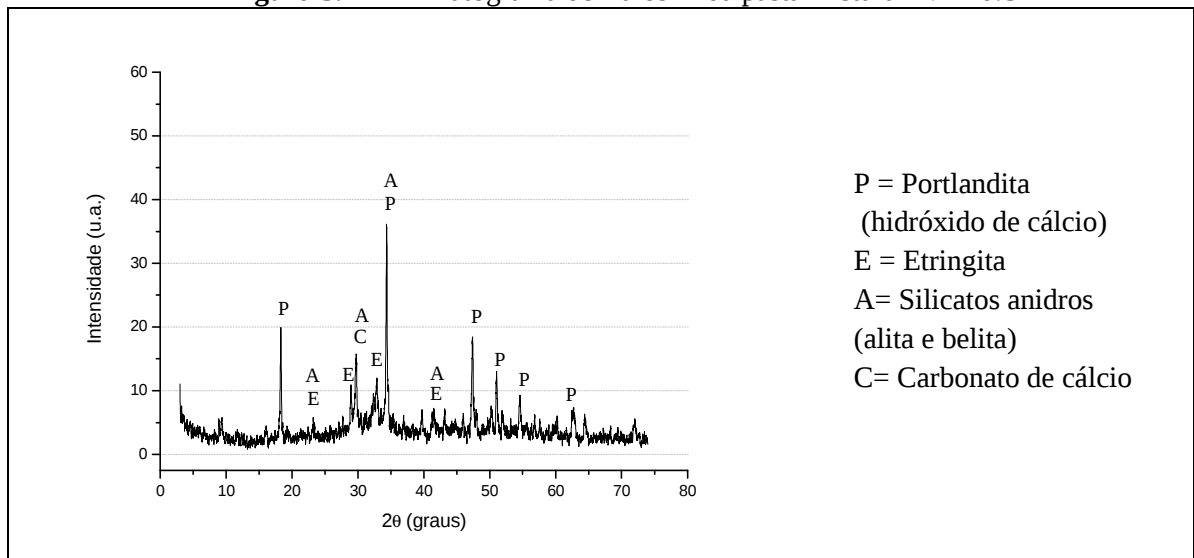


Figura 5.12 – Difratoograma de Raios-X da pasta mistura EVA40:CI

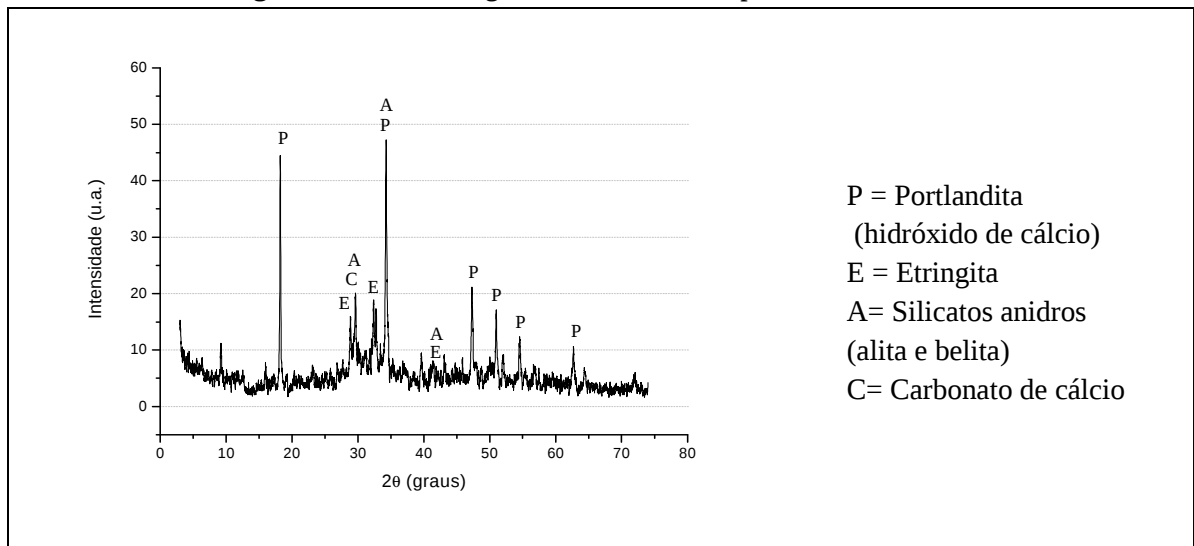
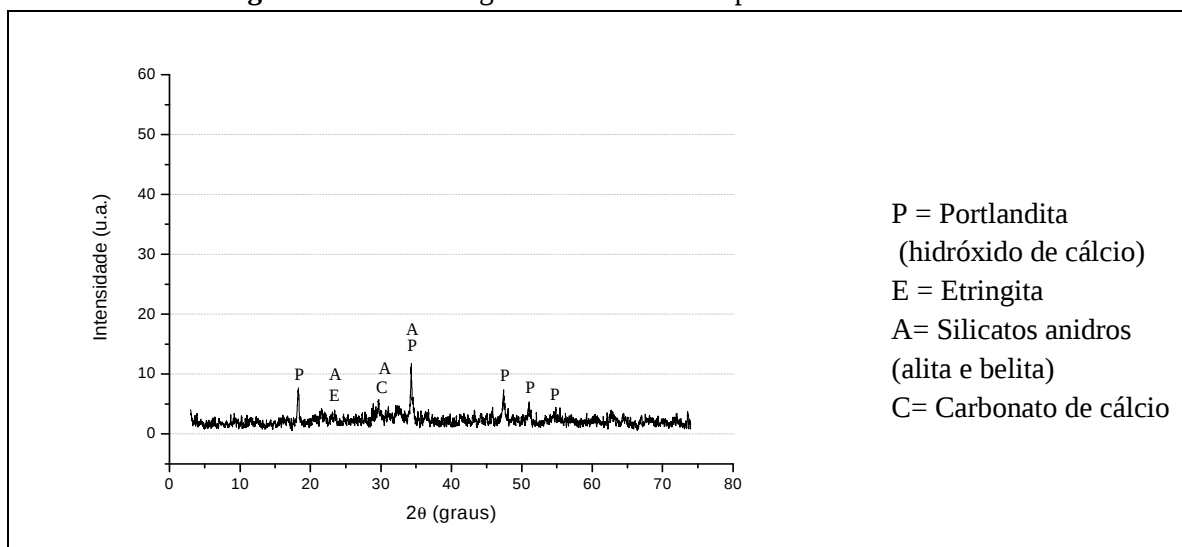
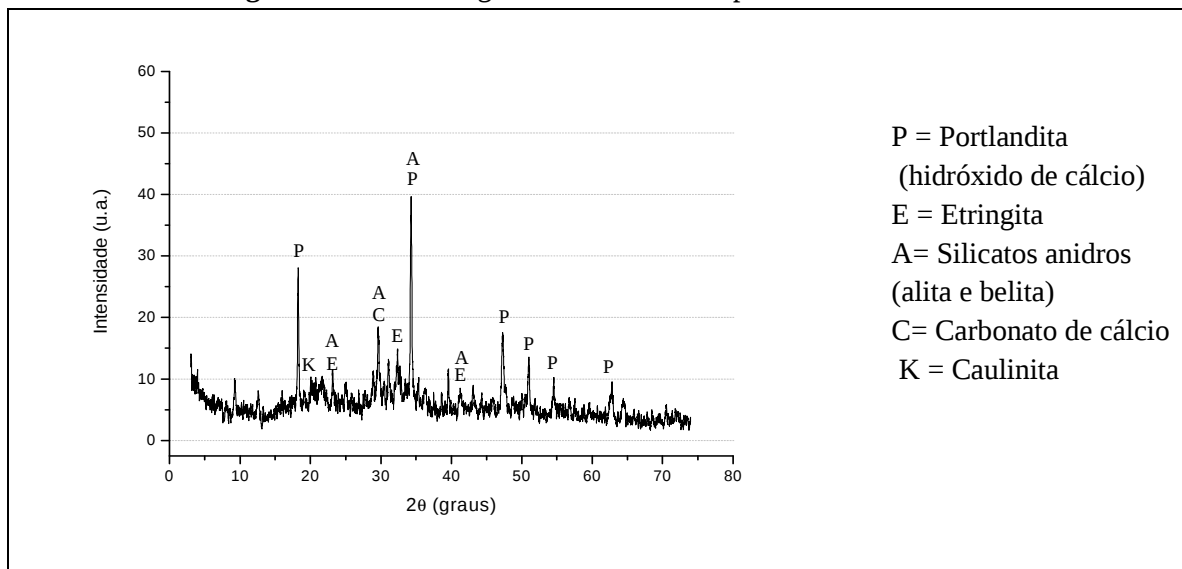


Figura 5.13 – Difrátograma de Raios-X da pasta mistura EVA100:SI**Figura 5.14** – Difrátograma de Raios-X da pasta mistura EVA100:CI

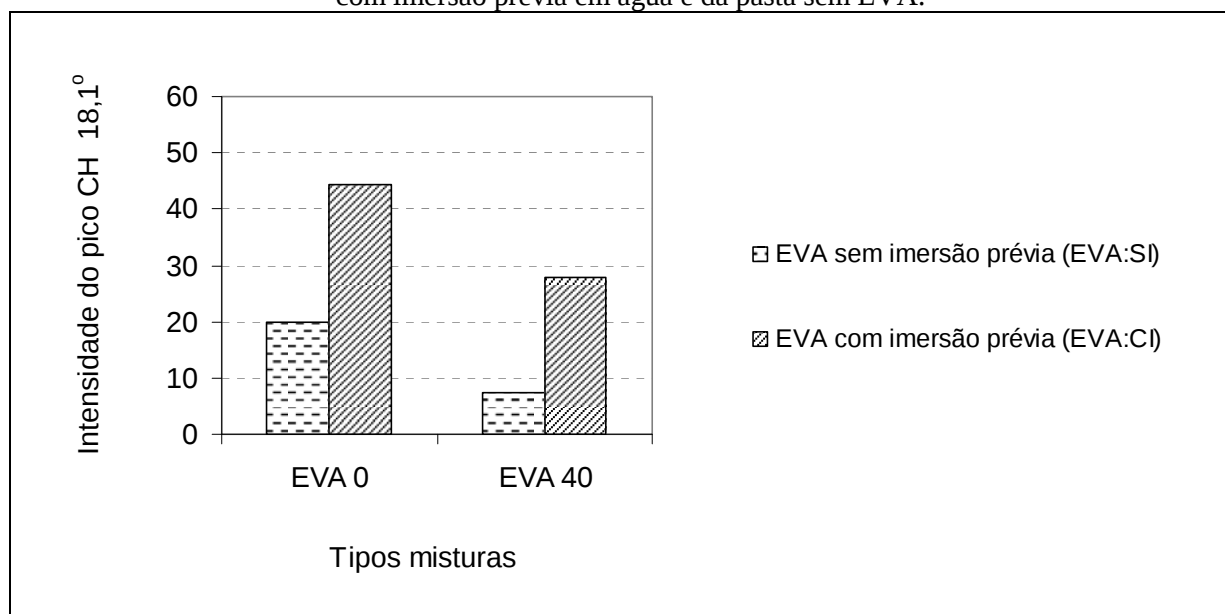
Em todas as amostras foram detectados diversos picos referentes às principais fases do clínquer (alita e belita), indicando que a hidratação do cimento ainda não foi completamente obtida.

Surgiram, também, picos de etringita com baixa intensidade e não foram observados picos de monossulfoaluminato de cálcio, devido ao seu baixo grau de cristalinidade e devido a sua pouca presença, como visto na análise das relações molares (item 5.4.3.1). O halo detectado entre os ângulos 28° e 36° (2θ) pode ser atribuído ao formação do gel amorfo de silicato de cálcio hidratado. O outro halo entre 13° e 26° (2θ), percebido principalmente na amostra EVA100:CI, pode ser atribuído a presença do polímero.

Em relação aos picos pertencentes ao hidróxido de cálcio, ao isolar o pico característico ($2\theta=18,1^\circ$), observa-se que ao comparar as misturas que utilizam EVA sem e com imersão prévia do agregado EVA em água, tem-se nas misturas com imersão prévia, maior formação de CH (Figura 5.15).

Esse comportamento é um indicativo da contribuição da área da pasta próxima ao agregado de EVA saturado, que possui uma pasta mais porosa, e assim, mais propícia à formação dos cristais maiores de CH. A zona de transição da pasta-EVA previamente imersa em água tem um comportamento microestrutural próximo aos da zona de transição pasta-agregados naturais (amostra convencional), em que, devido à superfície fechada dos poros do agregado, pode haver um acúmulo de água nesta região que facilita a formação de vazios depois da pasta endurecida.

Figura 5.15 – Comparação entre a intensidade do pico CH ($18,1^\circ$) das pastas com uso de EVA sem e com imersão prévia em água e da pasta sem EVA.



Essa análise, com base nos ensaios de DRX, comparativa entre as amostras com EVA com e sem imersão prévia em água, corrobora com a análise apresentada a partir dos resultados da espectroscopia de energia dispersiva (EDS), obtidos nos pontos posicionados na linha imaginária da zona de transição EVA-pasta e analisados por meio das relações atômicas totais apresentadas no subitem 5.3.3.1. Ou seja, na zona de transição das misturas com uso de agregados de EVA com imersão prévia em água, tem-se um acúmulo de água que deixa essa área mais porosa e, conseqüentemente, com mais facilidade de formação dos cristais de hidróxido de cálcio se comparado às misturas com uso de EVA secos.

5.3.3.3 *Observação por Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

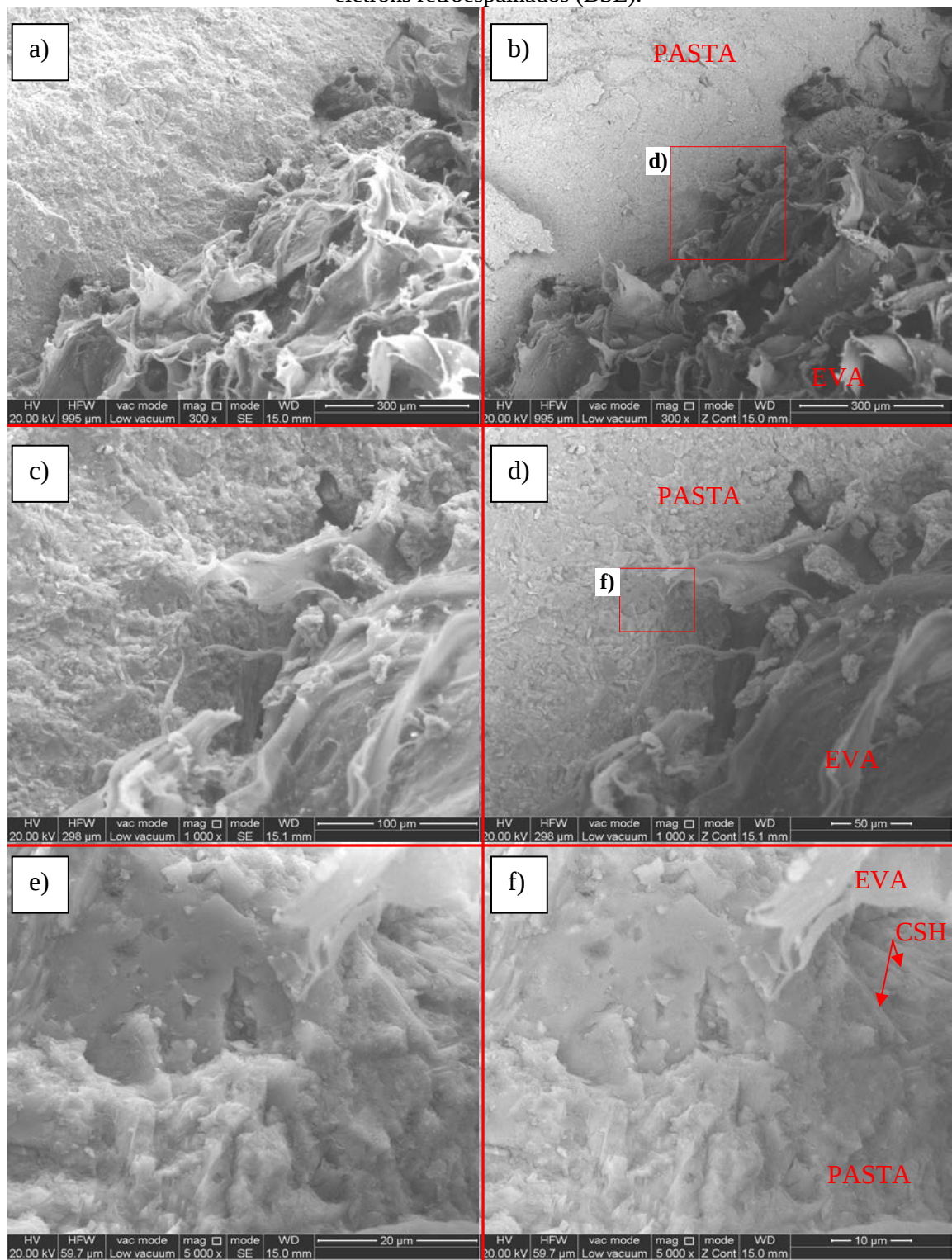
Como forma complementar à análise da interface pasta-EVA, foram realizadas várias imagens do tipo elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE) das pastas de cimento EVA:SI e EVA:CI, que são apresentadas a seguir (Figuras 5.16 e 5.17).

Na zona próxima à interface com o agregado artificial, as pastas EVA:SI apresentaram-se mais densas, se comparadas com as pastas EVA:CI, e aparentaram existir bom entrelaçamento entre EVA e pasta (Figura 5.16).

As pastas EVA:CI demonstraram também existir uma ligação física entre o agregado e a pasta, em que se percebe a penetração da pasta nas saliências de contorno do grão de EVA (Figura 5.17b). Porém, nessa mesma imagem, pode-se ver a presença de poros nas regiões próximas ao agregado, deixados pelo excesso de água. Na Figura 5.17d, observa-se que existem pontos de vazios na interface.

Outra provável consequência da maior presença de água é a perda da rugosidade natural que o agregado possui, dada a sua superfície porosa vedada por água. Ou seja, a água forma uma película que torna a superfície do agregado lisa e, consequentemente, diminui a sua capacidade de entrelaçar com a pasta, enfraquecendo a interface. Além do mais, com a superfície do agregado vedada, tem-se a intensificação do efeito parede. O surgimento dessa película de água se assemelha aos “filmes de água”, já conhecidos pela literatura, que surgem em torno dos grãos grandes dos agregados naturais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

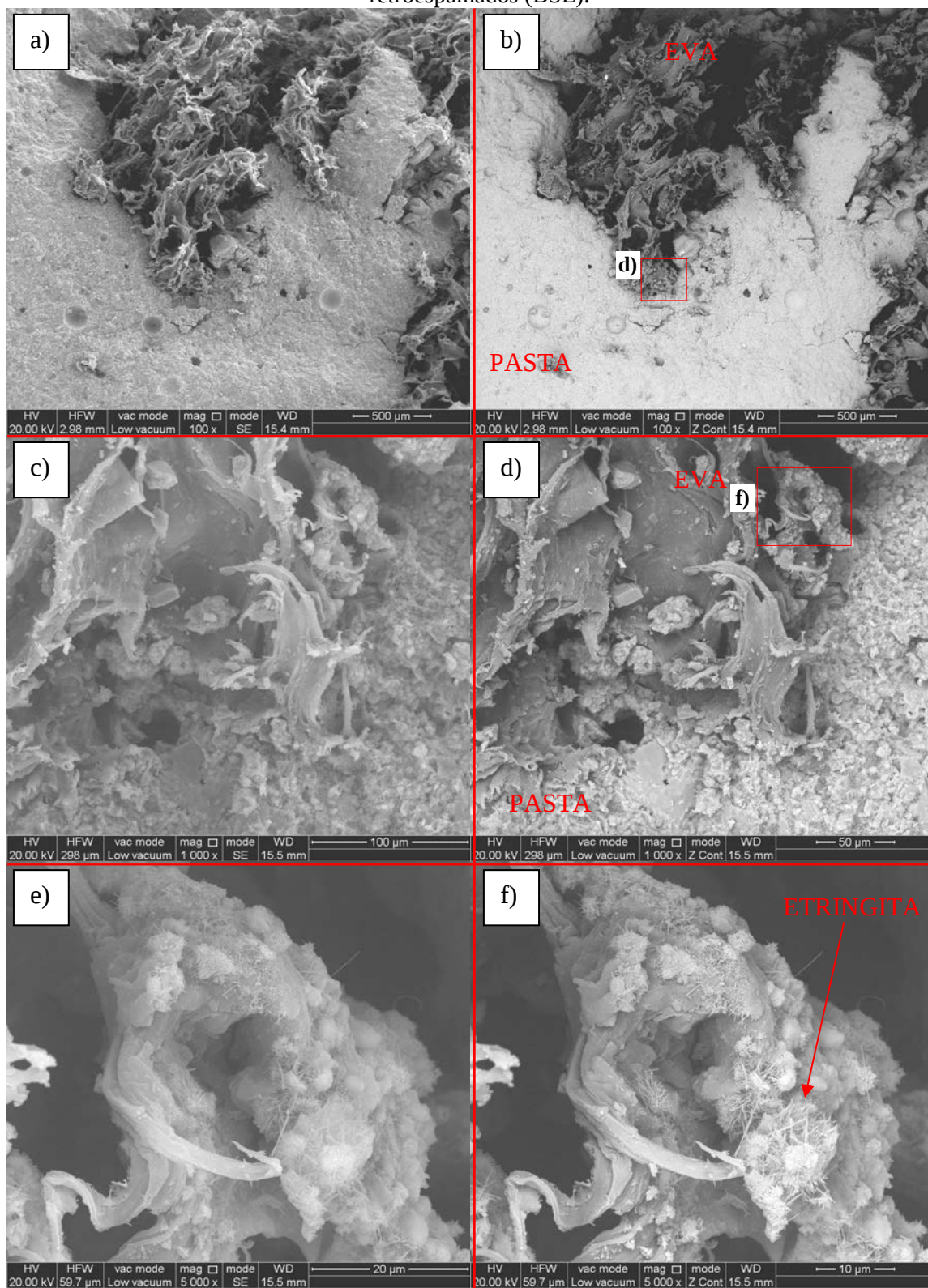
Figura 5.16 – Imagens MEV da pasta de cimento EVA:SI, obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).



Obs: Imagens ES: a) 100x; c) 1000x; e) 5000x

Obs: Imagens BSE: b) 100x; d) 1000x; f) 5000x

Figura 5.17 – Imagens MEV da pasta EVA:CI obtidas por elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE).



Obs: Imagens ES: a) 100x; c) 1000x; e) 5000x

Obs: Imagens BSE: b) 100x; d) 1000x; f) 5000x

Ainda analisando as imagens MEV da pasta com EVA, foi detectada uma fase rica em cálcio com aspecto semelhante ao hidróxido de cálcio, em placas hexagonais bem definidas, porém de estrutura porosa (Figura 5.16e,f).

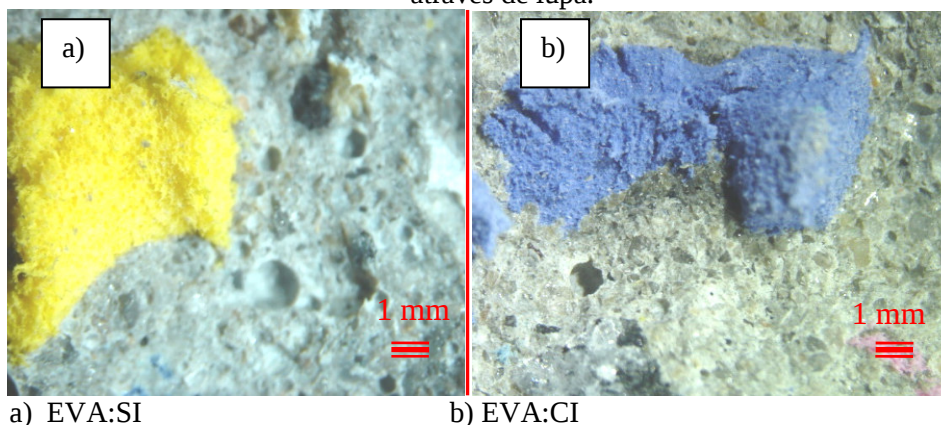
As alterações microestruturais que a presença do EVA provocaram na pasta se restringiram às alterações quantitativas dos elementos hidratados do cimento. Sendo assim, a presença do EVA na mistura tem a função característica de um agregado.

Não foram detectados depósitos volumosos de silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio, e foram encontrados alguns cristais de etringita envolvendo o EVA em pontos das amostras EVA:CI (Figura 5.17f).

5.3.3.4 Observação por Imagens por lupa

As imagens foram obtidas pelo modo fraturado das amostras (agregado inteiro), pois não é possível se fazer por lâminas, devido ao ato de lixar destruir o polímero. Nas imagens, foram observadas nas amostras EVA:CI uma mancha escurecida indicativa do acúmulo de água na região ao redor do grão de EVA, conforme comentado anteriormente (Figura 5.18).

Figura 5.18 – Imagens da região circunvizinha aos grãos de EVA no interior do concreto, obtidas através de lupa.



5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

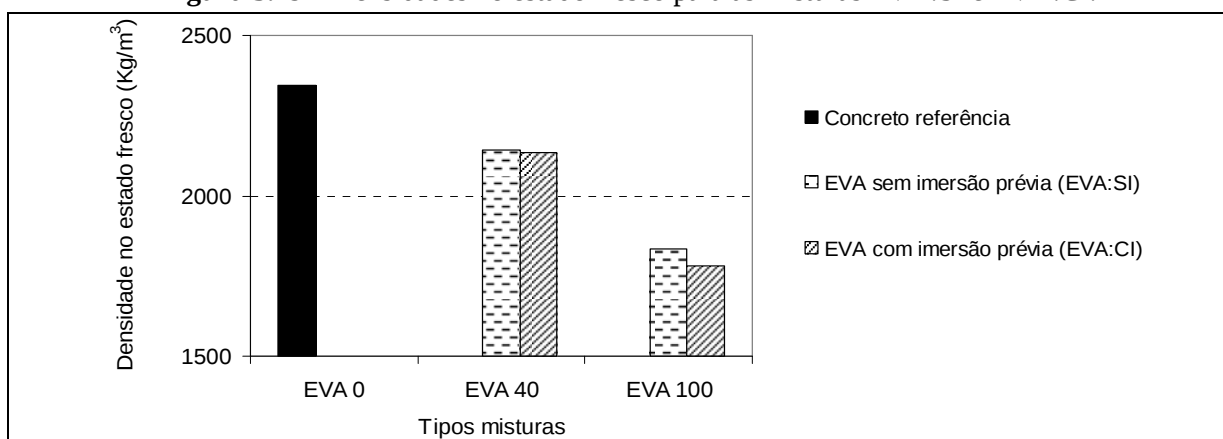
Com os resultados obtidos neste Estudo – Etapa II, em que foram avaliadas as condições de absorção prévia do EVA em água nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, é possível concluir que o tal procedimento provoca alterações em algumas propriedades do concreto, se comparado ao concreto com mesmo traço, porém, com uso de agregado de EVA sem a imersão prévia em água. Todavia, o processo de absorção prévia do EVA em água não tem influência significativa em todas as propriedades.

As propriedades dos concretos em seu estado fresco e endurecido, **que sofrem alterações significativas**, para os teores de EVA avaliados nesta pesquisa, devido ao **procedimento de imersão prévia do agregado de EVA em água**, foram:

No estado fresco:

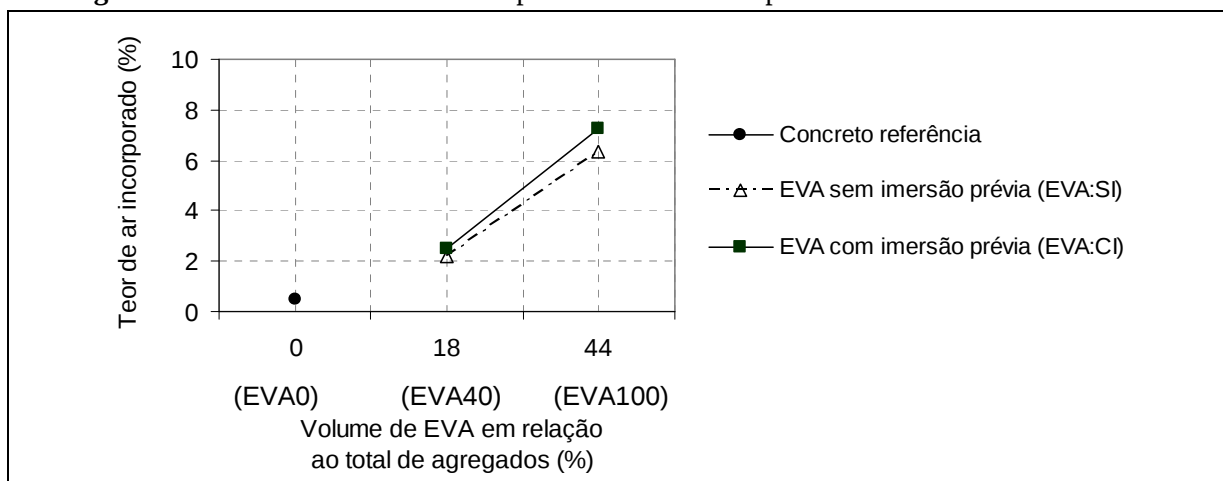
- Densidade fresca - ao se fazer a comparação das densidades no estado fresco entre as misturas EVA:SI e EVA:CI de traços iguais (Figura 5.19), as misturas EVA40:SI e EVA40:CI possuem valores praticamente inalterados, entretanto as misturas EVA100:SI e EVA100:CI apresentam valores distintos entre si.

Figura 5.19 – Densidades no estado fresco para as misturas EVA:SI e EVA:CI.

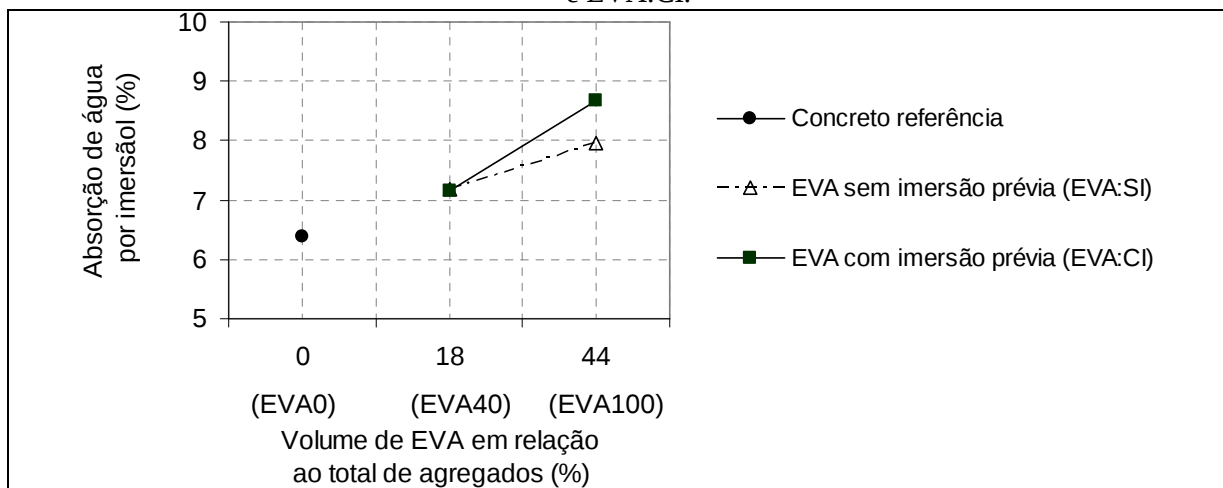


Ocorreu que nas dosagens de maior incorporação de EVA (Mistura EVA100:CI = uso de teor de 44% de EVA em volume em relação ao total de agregados) o uso do agregado de EVA saturado deixou a mistura com menor densidade fresca, pois os grãos de EVA com poros cheios de água não sofreram diminuição do seu volume no interior da mistura, como aconteceu com os grãos de EVA seco que sofreram maior achatamento, e isso tornou-se um obstáculo maior à saída do ar, o que gerou misturas menos densas.

- Incorporação natural de ar – pelo mesmo motivo anteriormente explicado, nas misturas com teor elevado de EVA em que há utilização de EVA com imersão prévia em água, houve uma maior incorporação natural de ar, pois esse teve mais dificuldade de sair devido ao volume do grão de EVA ser maior que o dos grãos secos, que são achatados mais facilmente (Figura 5.20)

Figura 5.20 – Teor de EVA e ar incorporado naturalmente para as misturas EVA:SI e EVA:CI.**No estado endurecido:**

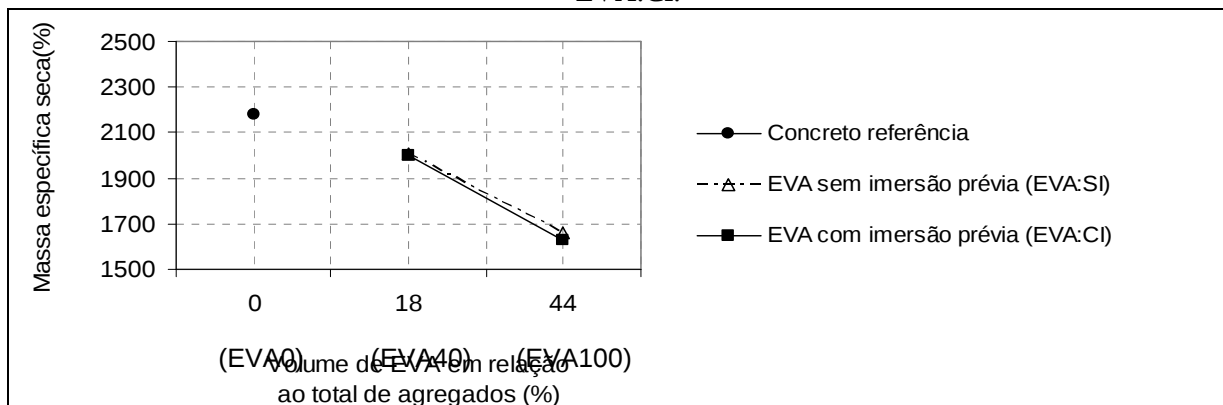
- Absorção de água – nos concretos EVA40:SI e EVA40:CI, os valores da absorção são praticamente os mesmos, porém há uma diferenciação quando se comparam os concretos EVA100:SI e EVA100:CI (Figura 5.21).

Figura 5.21 – Relação entre os teores de EVA e a absorção de água por imersão dos concretos EVA:SI e EVA:CI.

Tal comportamento ocorreu, porque o maior excesso de água que fica nas regiões da pasta próximas aos agregados de EVA saturados provocou, nas misturas com volume excessivo de EVA, uma maior quantidade de poros e, assim, ficaram mais suscetíveis à absorção de água.

- Massa específica – os concretos com EVA com imersão prévia em água são levemente menos densos que os mesmos concretos com uso de EVA sem imersão (Figura 5.22); isso devido à maior quantidade de vazios existentes nas regiões próximas aos agregados de EVA previamente saturados.

Figura 5.22 – Relação entre os teores de EVA e a massa específica seca dos concretos EVA:SI e EVA:CI.



Por outro lado, registram-se propriedades dos concretos em seu estado fresco e endurecido **que não sofrem alterações significativas** com o procedimento de **imersão prévia do EVA em água** para os teores de EVA avaliados neste pesquisa:

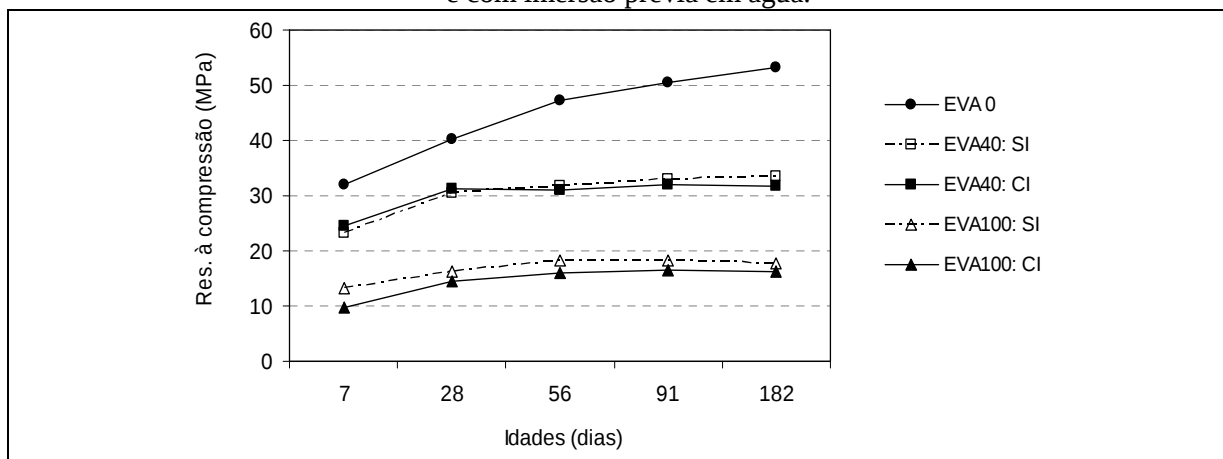
No estado fresco:

- A plasticidade das misturas e suas condições do manuseio e moldagem – essas propriedades permaneceram inalteradas quando se utilizam agregados de EVA com ou sem imersão prévia em água.

No estado endurecido:

- Resistência à compressão e fator de eficiência – ambas as formas de utilização do agregado de EVA possuem comportamentos bastante semelhantes quanto à resistência, à compressão do concreto e ao seu fator de eficiência, não havendo diferenças marcantes entre os concretos nas condições EVA:SI e EVA:CI (Figura 5.23).

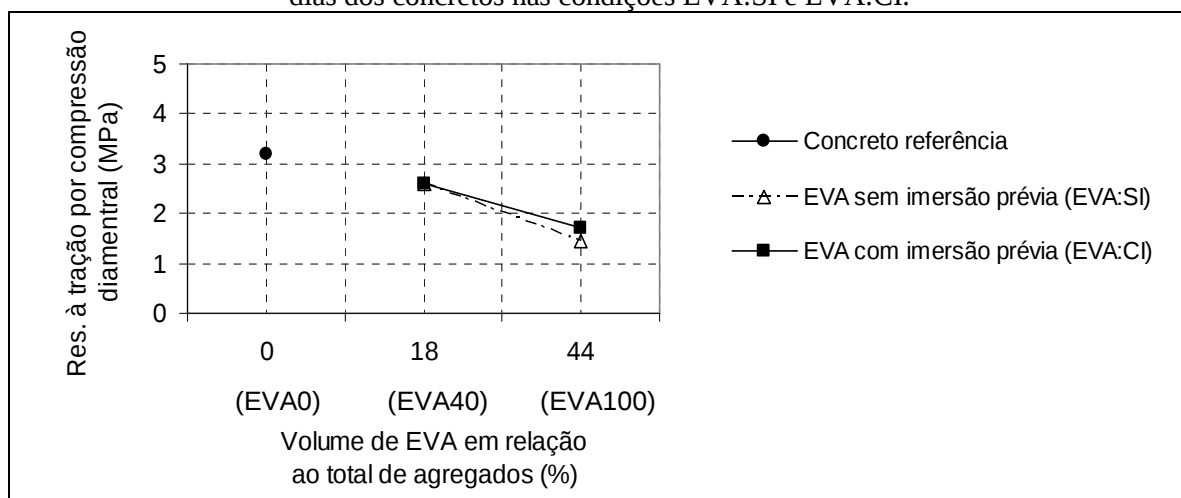
Figura 5.23 – Resistência à compressão axial ao longo do tempo nos concretos com uso de EVA sem e com imersão prévia em água.



Foi registrada uma pequena redução na resistência dos concretos e, consequentemente, em seu fator de eficiência à compressão para os traços com maiores teores de EVA (Mistura EVA100:CI = uso de teor de 44% de EVA em volume em relação ao total de agregados), quando se comparam concretos com uso de EVA com imersão em água aos que não realizam esse procedimento. Isso acontece, provavelmente, devido à maior concentração de água que se acumulou na região próxima ao agregado previamente saturado, e isso formou uma região com maior relação água/cimento, mais porosa, e, assim, de menor resistência.

- Resistência à tração por compressão diametral e fator de eficiência – o procedimento imersão prévia em água do agregado de EVA também não influencia na resistência à tração por compressão diametral e seu fator de eficiência. Os valores são próximos, indicando comportamentos semelhantes para a resistência à tração quando se utiliza agregados sem ou com imersão prévia em água (Figura 5.24).

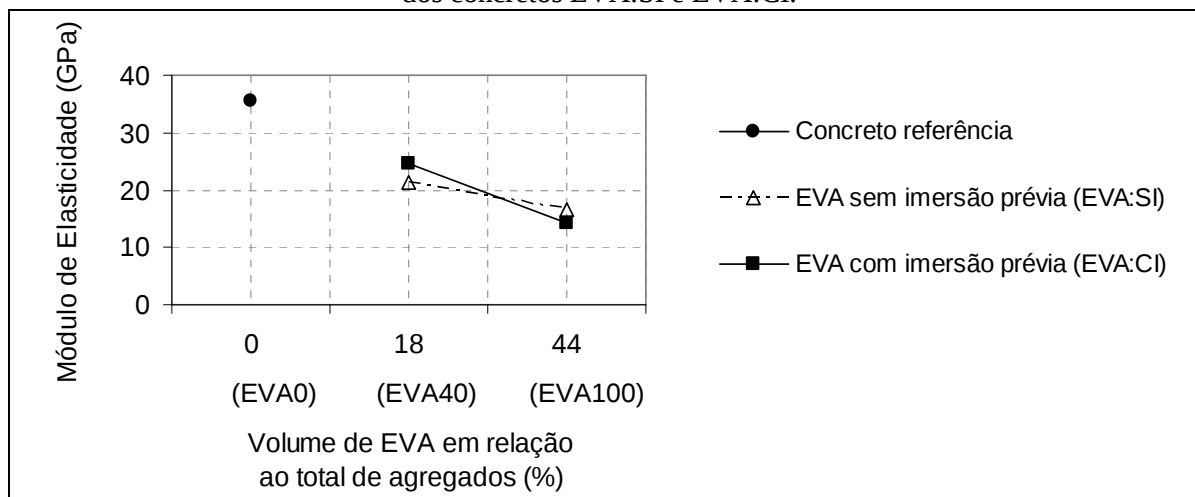
Figura 5.24 – Relação entre os teores de EVA e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos nas condições EVA:SI e EVA:CI.



- Módulo estático de elasticidade à compressão – a propriedade de ductilidade do polímero proporciona aos concretos com EVA uma redução significativa no valor do E_c , em comparação ao concreto de referência. Entretanto, ao comparar concretos utilizando agregados de EVA com traços iguais, o procedimento de imersão prévia do agregado de EVA em água não influencia no módulo, ou seja, tanto faz se usar agregado previamente saturado ou não para os concretos analisados neste estudo. Por meio da Figura 5.25, verifica-se a diminuição do módulo com o aumento da incorporação do EVA, e, ao se compararem os

concretos com traços iguais nas condições EVA:SI e EVA:CI, os resultados ficaram muito próximos.

Figura 5.25 – Relação entre os teores de EVA e o módulo de elasticidade à compressão aos 210 dias dos concretos EVA:SI e EVA:CI.



Quanto à microestrutura do concreto, a presença do agregado de EVA manteve a formação dos compostos constituídos da pasta de cimento hidratada, indicando que não houve reação do polímero com o aglomerante, o que caracteriza de fato o EVA como um agregado.

Quando se analisa a microestrutura na zona de transição pasta-agregado de EVA, existe uma diferenciação entre o uso do agregado previamente saturado ao que não passou por esse procedimento. Devido ao maior volume de vazios nas interfaces pasta-agregado de EVA, quando esse é previamente imerso em água, tem-se nesta região uma facilidade maior de formação de grandes cristais de hidróxido de cálcio. Assim, as misturas com uso de EVA com imersão prévia em água formam-se mais hidróxido de cálcio do que as misturas com EVA sem imersão prévia em água.

Nas misturas com uso de agregado de EVA, previamente imerso em água, tem-se um comportamento semelhante aos dos agregados naturais, em que a presença da água nos poros externos do agregado deixou o grão do EVA “vedado” e, assim, dificultou a penetração da água da mistura ao seu interior, deixando a região da pasta próxima ao agregado com excesso de água.

Enfim, conclui-se que, para os teores de EVA incorporados nesse estudo, não há diferenças significativas provocadas pelo procedimento de imersão prévia do agregado de EVA nesse tipo de concreto quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, especificamente nos resultados de resistência mecânica e no módulo de elasticidade do concreto e pelas

alterações microestruturais, que possam justificar a necessidade de fazer tal procedimento, antes de utilizar o EVA, para beneficiar as características do compósito.

Assim, com base nos resultados obtidos nesta etapa, afirma-se que se pode utilizar EVA sem fazer a sua imersão prévia em água, bastando uma simples molhagem com a água da mistura durante o próprio processo de preparação da dosagem.

À medida que se eleva a incorporação de EVA aos concretos, reduz-se ainda mais sua resistência, conforme já visto no estudo da Etapa I, e assim, existe a possibilidade de, caso utilize teores mais elevados de EVA nos concretos, acima dos teores avaliados nessa presente etapa, podem ocorrer diferenças significativas entre as misturas com uso de EVA sem ou com imersão prévia em água, pois os ensaios demonstraram que a tendência de redução da resistência mecânica dos concretos com EVA é mais agressiva nos concretos que utilizaram EVA com imersão prévia em água. Ou seja, na verdade, o procedimento de imersão poderá vir a acelerar a redução da resistência do compósito.

Como forma de complementar as definições estudadas nesta etapa, será desenvolvido no próximo capítulo (Etapa III) o estudo das condições de durabilidade desses concretos com uso de agregados de EVA.

CAPÍTULO 6 – ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE DURABILIDADE DO CONCRETO EVA – ETAPA III

6.1 INTRODUÇÃO

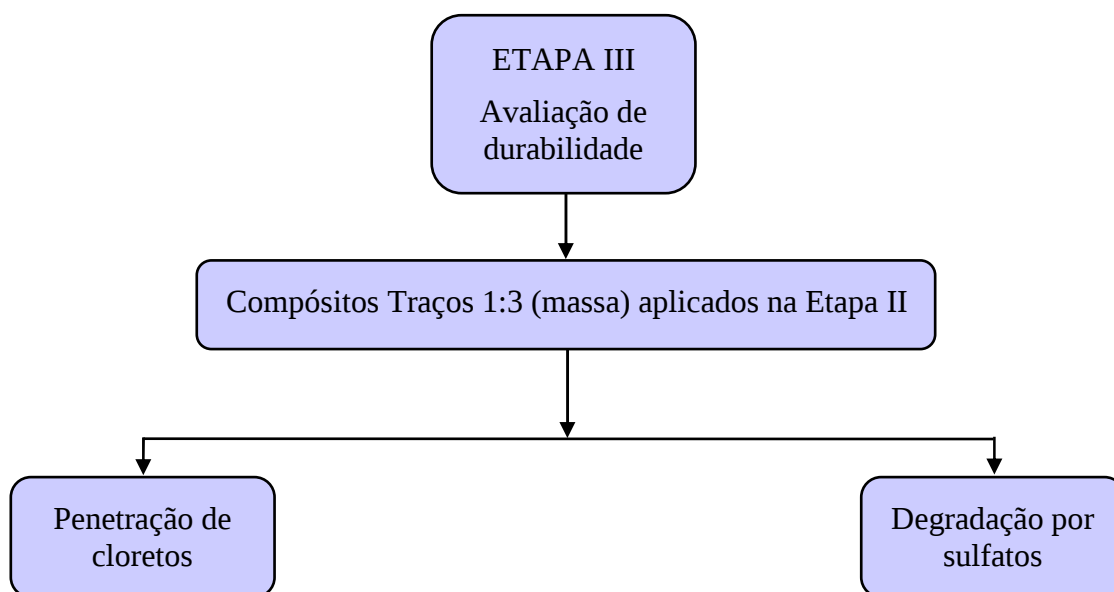
Os ataques dos agentes agressivos às estruturas de concreto podem ocorrer diretamente ao aço da estrutura, por meio, por exemplo, dos íons cloretos, provocando a despassivação da armadura, bem como podem agir no concreto, por exemplo, por sulfatos, gerando expansão e queda da resistência mecânica.

O objetivo desta etapa da pesquisa é analisar a influência da incorporação do agregado de EVA na durabilidade dos concretos de cimento Portland de consistência plástica, quanto aos ataques por agentes químicos (sulfatos e cloretos). Ou seja, estabelecer um paralelo entre a degradação dos concretos produzidos com agregados de EVA e a do concreto de referência, produzido com agregados naturais.

6.2 EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda os ataques por esses dois agentes (íons cloretos e sulfatos). A estruturação experimental da Etapa III está mostrada no Diagrama 6.1

Diagrama 6.1 – Estruturação do capítulo 6 – Etapa III.



As variáveis monitoradas nesta Etapa III nos concretos foram:

- a profundidade de penetração dos cloretos e os perfis de cloretos;
- a degradação pela ação dos sulfatos, em relação à variação dimensional, de massa e de resistência.

Foram realizados ensaios, no intuito de se analisar uma possível degradação dos concretos com uso do agregado de EVA, considerando a variação dos teores de EVA incorporados e o uso do agregado sem e com imersão prévia em água. Os ensaios foram:

- ataque acelerado por cloreto de sódio em corpos-de-prova cilíndricos (5cm x 10cm). São analisados: a profundidade de penetração dos cloretos - sendo quatro exemplares de corpos-de-prova por traço; e o teor de cloretos totais a distintas profundidades (perfis) (ASTM C1152-94) - sendo dois corpos-de-prova por traço.

- ataque acelerado por sulfato de sódio em corpos-de-prova cilíndricos (5cm x 10 cm) e prismáticos (4cmx4cmx16cm e 2,5cmx2,5cmx28,5cm). São analisados: a determinação da variação dimensional e de massa (NBR 13583, ABNT 1996) - sendo quatro exemplares de corpos-de-prova 2,5cmx2,5cmx28,5cm por traço para condição submetida ao ataque e a outros quatro corpos-de-prova que ficaram fora da solução, protegidos dentro de sacos plásticos; a resistência à compressão (NBR 5739, ABNT 2007) - sendo nove exemplares dos corpos-de-prova cilíndricos 5cm x10cm por traço para condição submetida ao ataque e doze corpos-de-prova que ficaram fora da solução; a resistência à tração na flexão (NBR 13279, ABNT, 2005) – sendo nove exemplares dos corpos-de-prova 4cmx4cmx16cm por traço para condição submetida ao ataque e outros nove corpos-de-prova que ficaram fora da solução;

Dada a ampla variação das metodologias dos ensaios de durabilidade acelerada pelas pesquisas anteriores, é escrita, a seguir, a metodologia adotada neste trabalho.

6.2.1 Ação acelerada dos cloretos (cloreto de sódio, NaCl)

No dia seguinte após a moldagem, seis amostras de cada concreto (corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 5 cm e altura 10 cm) foram retiradas dos moldes e encaminhadas à câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de 20 ± 2 °C). Aos 28 dias de idade, as amostras foram retiradas da cura e colocadas em ambiente de laboratório para secar por 1 dia. Depois de secos ao ar, fez-se a pintura da superfície lateral dos corpos-de-prova com epóxi, e esperou-se a secagem por 1 dia (Obs: o epóxi utilizado foi Sika-Dur de alta viscosidade - tixotrópico). Em seguida, os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 40° C até completarem 5 dias

depois da retirada da amostra da cura. Com isso, as amostras foram submetidas ao ataque por cloretos, por meio da imersão dos corpos-de-prova na solução agressiva por um período de 2 dias, completando, assim, o primeiro ciclo de secagem e molhagem.

Ou seja, o ciclo compreende: 5 dias de secagem em estufa a 40° C mais 2 dias imersos na solução de cloreto, conforme seguinte esquema:

Secagem estufa 40°C	NaCl
Secagem 5 dias	Imersão 2 dias

O procedimento de ensaio com a realização de ciclos de molhagem e secagem tem como objetivo intensificar a concentração de sais no interior das amostras, conforme explicado pela literatura (NEVILLE, 1997). No total, foram 16 ciclos, sendo realizados dois momentos de sondagem:

- o primeiro, quando se completou o quarto ciclo (28 dias de ensaio);
- a segunda sondagem, com o décimo sexto ciclo (112 dias de ensaio).

A solução agressiva de cloretos - NaCl (PM58,44) foi de 1 mol/l preparada em água deionizada e renovada a cada quatro ciclos. O recipiente com essa solução foi coberto com lona plástica, e o volume da solução obedeceu à relação de 1 volume de corpo-de-prova por 3 volumes de líquido.

A sala em que os corpos-de-prova sofreram o ataque era climatizada com controle temperatura e UR, sendo 20° C e UR = 70%.

Para cada momento de sondagem, três corpos-de-prova por traço foram retirados da solução, e, em seguida, fez-se a secagem por 1 dia. Dos corpos-de-prova retirados, são duas amostras para ensaio de medição da profundidade de transporte de cloreto, que será descrito a seguir – letra *a*; e uma amostra para ensaio da determinação do teor de cloretos totais, que será descrito - letra *b*.

a) Medição da profundidade de transporte de cloreto:

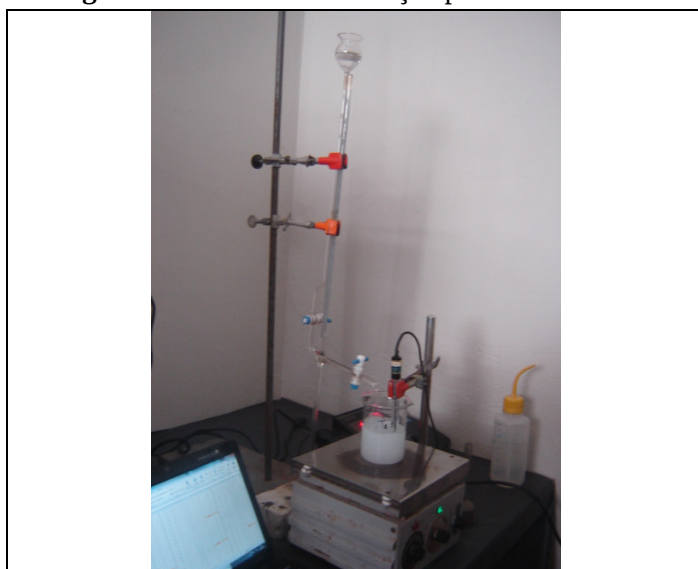
Esta análise é obtida por meio do corte dos corpos-de-prova longitudinalmente e da aplicação de uma solução de nitrato de prata (AgNO₃ com 0,1M). Então, a profundidade de transporte de cloretos é verificada com a constatação da variação de coloração na superfície do concreto, sendo a região incolor classificada como área com cloretos livres presentes, e a região de cor marrom, área sem cloretos livres. O resultado foi determinado pelas médias obtidas em três posições na superfície interna, que foi cortada para cada corpo-de-prova, sendo dois corpos-de-prova por amostra.

A aplicação do AgNO_3 foi realizada tanto na base como no topo dos corpos-de-prova, como forma de verificar algum comportamento diferenciado nessas duas posições.

b) Teor de cloretos totais:

Determinado por meio de análise química obtida pelo procedimento da ASTM C1152 (1994). Foi encontrado o teor de cloretos totais por massa de cimento a cada profundidade, para cada traço, com a análise por titulação potenciométrica, empregando-se solução de nitrato de prata (Figura 6.1). Esse ensaio foi realizado em laboratório do IFPB, em João Pessoa-PB.

Figura 6.1 – Ensaio de titulação potenciométrica.



Para obtenção das amostras, fez-se a extração, em forma de pó, em diferentes profundidades alinhadas em relação à base e ao topo dos corpos-de-prova que estavam imersos em solução com cloretos. Na extração do pó, foi usada uma furadeira, empregando-se brocas de vídea com diferentes diâmetros, reduzindo a bitola da broca conforme se aprofundava a penetração para coleta do pó nas profundidades estabelecidas. A coleta foi obtida com um coletor de pó.

No primeiro momento da análise do teor de cloretos (final do quarto ciclo), foram coletadas amostras em quatro profundidades distintas (0-5mm; 5-10mm; 10-15mm e 15-20mm). No segundo momento da análise (final do décimo sexto ciclo), as amostras foram coletadas em cinco profundidades distintas (0-5mm; 5-10mm; 10-15mm; 15-20mm e 20-25mm). Em ambos os momentos, as amostras foram retiradas da base e do topo dos corpos-de-prova.

6.2.2 Ação acelerada dos sulfatos (sulfato de sódio, Na_2SO_4)

As etapas de execução do ensaio seguem o roteiro abaixo e foram definidas conforme adaptação dos procedimentos da norma NBR 13583 (ABNT, 1996), que tratam dos testes com ataque em solução de sulfatos para argamassas de cimento Portland.

No dia seguinte após a moldagem, as amostras foram retiradas dos moldes e encaminhadas à câmara úmida ($\text{UR} \geq 95\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$). Aos 28 dias de idade, as amostras foram retiradas da cura e submetidas a uma série de ciclos de secagem e molhagem em solução. Para isso, foram colocadas em estufa a 40°C até completarem 5 dias. Depois desse período de secagem, foram imersas em solução de sulfato de sódio por 2 dias, completando assim o primeiro ciclo. O ciclo compreende 5 dias de secagem em estufa a 40°C mais 2 dias imersos na solução, conforme esquema abaixo. No total, foram 22 ciclos.

Secagem estufa 40°C	Na_2SO_4
Secagem 5 dias	Imersão 2 dias

O recipiente utilizado com a solução foi de vidro, e os corpos-de-prova colocados e apoiados em filetes de vidro, para deixar sua superfície o máximo possível em contato com a solução (Figura 6.2).

Figura 6.2 – Corpos-de-prova imersos em solução de sulfato, apoiados em filetes de vidro.



Seguindo metodologia da norma NBR 13583 (ABNT, 1996), as amostras foram imersas em solução contendo 100g de Na_2SO_4 por litro. A solução de sulfato foi preparada um dia anterior ao uso, coberta e armazenada. O pH da solução deve ser determinado antes do uso, rejeitando a solução se o pH estiver abaixo de 6 ou acima de 8. As soluções preparadas neste experimento tiveram, em média, pH de 6,3. A solução foi preparada dissolvendo o

sulfato em 800 ml de água destilada, e, em seguida, adicionando-se mais água destilada até obter 1 litro de solução. No total, foi preparado um volume de solução para manter a proporção entre o volume da solução agressiva e volume de corpo-de-prova na relação 4:1 (NBR 13583, 1996).

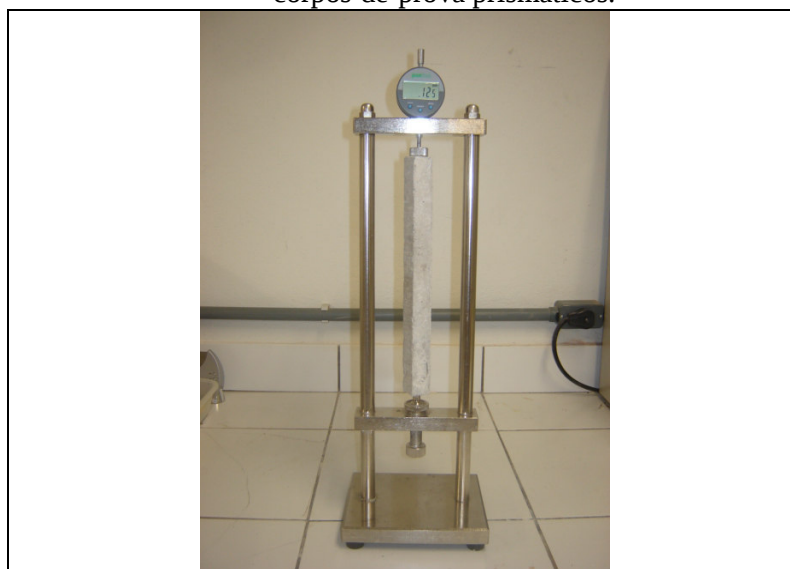
Apesar de a norma não relatar sobre a necessidade de renovação da solução de sulfato, adotou-se esse procedimento a cada 4 ciclos. Além disso, fez-se, a cada ciclo, a medição do pH da solução e sua correção para valores entre 6 e 8, com uso de gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4), seguindo sugestão de Mehta e Monteiro (2008). Com esse procedimento, buscou-se superar as críticas descritas na literatura para as metodologias adotadas nas normas na realização dos ensaios acelerados, em que não prescrevem critérios para manter o pH da solução baixo durante o período da realização do ensaio (BROWN, 1981; FERRARIS *et al.*, 1997).

Todas as amostras passaram por uma leve escovação de suas superfícies após cada ciclo, antes do procedimento de sondagem. Os procedimentos de sondagem se deram por meio de análise da variação dimensional e de massa, variação da resistência à compressão e à tração na flexão e observações visuais, conforme as seguintes descrições:

a) Determinação da variação dimensional:

Esta análise foi obtida com a leitura das dimensões dos corpos-de-prova prismáticos (2,5x2,5x28,5)cm, com uso de pinos em seus eixos principais para encaixe no extensômetro (Figura 6.3), conforme NBR 13583 (ABNT, 1996).

Figura 6.3 – Aparelho comparador de comprimento (extensômetro) para leitura das dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.



As medições da variação dimensional das barras foram realizadas a cada ciclo. Também foram medidos os comprimentos de amostras que ficaram fora da solução (chamadas de amostras brancas), guardadas envolvidas em sacos plásticos, para comparação entre elas. Para cada tipo de concreto, foram testados quatro corpos-de-prova das amostras brancas e quatro corpos-de-prova das amostras submetidas em imersão com solução agressiva.

A expansão de cada barra, em porcentagem, é dada pela diferença entre o valor medido (em milímetros) na idade correspondente a cada ciclo, e a leitura relativa à medida inicial (em milímetros) ocorrida antes da barra entrar em contato com a solução de sulfato é dividida pelo seu comprimento efetivo (em milímetros) e multiplicada por 100, considerando-se que, quando o sinal for negativo, implica uma retração. O resultado é obtido pela média aritmética das expansões individuais, em porcentagem, dos quatro corpos-de-prova ensaiados. O ensaio seguiu adaptação da NBR 13583 (ABNT, 1996).

b) Determinação da variação de massa:

Esta análise foi realizada a cada ciclo do ensaio e obtida nas mesmas amostras prismáticas (2,5x2,5x28,5)cm utilizadas na determinação da variação dimensional, tanto para as amostras atacadas por sulfatos, como para as chamadas amostras brancas. O resultado é obtido pela média aritmética dos quatro corpos-de-prova ensaiados.

c) Determinação da variação da resistência à compressão:

As determinações da resistência foram realizadas em três momentos de sondagem, sendo: no ciclo 4 (aos 28 dias de ensaio=56 dias desde a moldagem); no ciclo 9 (aos 63 dias de ensaio=91 dias desde a moldagem); no ciclo 22 (aos 154 dias de ensaio=182 dias desde a moldagem). Após cada período de sondagem, fez-se a retirada dos corpos-de-prova (10x20)cm da solução, e realizou-se o ensaio de compressão.

Para cada momento de sondagem, foram testados quatro corpos-de-prova das amostras brancas em cada tipo de concreto e três corpos-de-prova das amostras submetidas em imersão com solução agressiva para cada tipo de concreto. O ensaio para determinação da resistência à compressão seguiu a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo as bases dos corpos-de-prova capeadas com pasta de enxofre (Figura 6.4).

Figura 6.4 – Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova expostos à solução de sulfato.



Os resultados foram comparados aos de outros corpos-de-prova dos mesmos concretos, com a mesma idade, que ficaram fora da solução, em processo de cura, na câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$).

d) Determinação da variação da resistência à tração na flexão:

As determinações das resistências à tração foram realizadas nas mesmas etapas da realização do ensaio de compressão (ciclos 4; 9 e 22), sendo também determinadas as resistências em amostras dos mesmos concretos, com a mesma idade, que ficaram fora da solução, em processo de cura, na câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$).

O ensaio para determinação da resistência à tração na flexão (Figura 6.5) seguiu ao procedimento da norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 6.5 – Ensaio resistência à tração na flexão em corpos-de-prova expostos à solução de sulfato.



Esta análise foi obtida em corpos-de-prova prismáticos (4x4x16)cm, sendo, para cada momento de sondagem, testados três corpos-de-prova das amostras brancas em cada tipo de concreto e três corpos-de-prova das amostras submetidas em imersão com solução agressiva para cada tipo de concreto), calculado o valor da resistência à tração na flexão pela equação 6.1, apresentada pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005):

$$RF = \frac{1,5 \times Ff \times L}{40^3} \quad (\text{Equação 6.1})$$

onde: RF = resistência à tração na flexão, em megapascals;

Ff = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L = distância entre os suportes, em milímetros.

e) Difratometria de Raios-X:

As mostras foram obtidas aos 154 dias do ensaio (ciclo 22) e retiradas da região localizada a 2cm da face em corpos-de-prova prismático, com uso de uma furadeira e um coletor de pó. O material obtido passou na peneira com a abertura de 0,075mm e foi colocado em um porta-amostra apropriado para o equipamento de ensaio de DRX.

Os parâmetros do ensaio seguiram os mesmos adotados nas demais determinações, conforme descrição do subitem 5.2, letra c. A identificação das substâncias foi conseguida utilizando-se o banco de dados do programa MDI Jade5.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Ação dos cloretos

6.3.1.1 Medição da profundidade de transporte de cloreto

As médias dos resultados das profundidades de transporte de cloretos, determinadas por meio de aspersão da solução de nitrato de prata, estão mostradas na Tabela 6.1. Os comprimentos foram obtidos na direção diametral, medidos a partir do topo e da base dos corpos-de-prova, e assim se pôde analisar de forma qualitativa a influência do EVA nas profundidades de transporte dos cloretos.

Tabela 6.1 – Resultados das profundidades de transporte de cloretos, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação para os concretos nas datas 28 e 112 dias imersão.

Nomenclatura da mistura			Profundidades de transporte de cloretos							
			Aos 28 dias (ciclo 4)				Aos 112 dias (ciclo 16)			
			Topo dos CP's		Base dos CP's		Topo dos CP's		Base dos CP's	
EVA40:SI	MÉDIA(mm)	10,92		8,60		20,68		17,22		
	Desvio Padrão	Coef. Var.	1,03	9,40	2,13	24,7	1,95	9,43	3,49	20,24
EVA40:CI	MÉDIA(mm)	9,47		7,50		21,54		14,58		
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,44	4,61	0,40	5,31	1,06	4,92	3,13	21,5
EVA100:SI	MÉDIA(mm)	8,32		7,95		22,34		15,54		
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,63	7,56	1,10	13,9	0,68	3,05	0,66	4,26
EVA100:CI	MÉDIA(mm)	8,00		8,75		18,12		17,13		
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,60	7,55	0,72	8,22	2,38	13,16	4,12	24,1
EVA0	MÉDIA(mm)	10,10		8,30		20,92		16,60		
	Desvio Padrão	Coef. Var.	1,54	15,3	1,13	13,6	1,52	7,28	1,57	9,44

De acordo com os dados da Tabela 6.1, as médias das medidas de profundidades de transporte de cloretos para a data de 28 dias de imersão ficaram com relativas pequenas diferenças entre si em todas as amostras, devido ao processo de ataque ainda se encontrar no início, e assim não foram verificadas relações de causa e efeito que permitissem uma análise confiável. Percebe-se apenas que os valores obtidos no TOPO dos corpos-de-prova são maiores que os da BASE em, praticamente, todas as amostras.

No estudo estatístico, analisaram-se, primeiramente, de forma separada, as situações de ataque no topo e na base dos corpos-de-prova.

Os resumos dos resultados estatísticos na posição do topo aos 28 dias de imersão estão apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3.

Tabela 6.2 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	3,87	4,44	4,35	0,0478	*
Fator2 – Teores de EVA	1	20,60	23,65	8,10	<0,001	**
Int. F1xF2	1	1,62	1,86	4,35	0,1871	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	3,45	3,97	4,35	0,0599	Ns
Erro	20	0,87				
Total	24					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 = p < 0,05$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.3 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	10,91 aA	8,31 aB
Com	9,46 bA	8,00 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base na ANOVA, verifica-se que (Tabela 6.2):

- o fator tratamento de imersão é significativo ao nível de 5% de significância, porém com o valor ($p=0,0478$) quase superior a 0,05. Pode-se, assim, julgá-lo, praticamente, como efeito não significativo;

- o fator teores de EVA, apesar de apresentar-se significativo nos resultados, apresenta, na interação com os resultados dos concretos convencionais e na interação com o fator imersão prévia em água, um efeito não significativo.

Pela análise das médias com o Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 6.3):

- para o fator tratamento de imersão, somente na média das misturas EVA40 há diferença significativa, sendo menor a profundidade de transporte de cloretos nas misturas EVA40:CI em relação às misturas EVA40:SI.

- para o fator teores de EVA, as médias das profundidades de penetração de cloretos nas amostras EVA40 apresentam-se maiores, estatisticamente, que quando se utiliza EVA100.

Os resumos dos resultados estatísticos na posição da base aos 28 dias de imersão estão apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 – Análise de variância para profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	0,11	0,07	0,001	>0,050	Ns
Fator2 – Teores de EVA	1	0,45	0,29	0,001	>0,050	Ns
Int. F1xF2	1	4,51	2,93	4,35	0,1024	Ns
Fatores x Concreto Convencional	1	0,04	0,02	0,001	>0,050	Ns
Erro	20	1,54				
Total	24					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.5 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 28 dias de imersão (ciclo 4), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	8,60 aA	7,95 aA
Com	7,50 aA	8,75 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

Com base na ANOVA, verifica-se que (Tabela 6.4):

- o fator tratamento de imersão e o fator teores de EVA apresentam-se como não significativos .

Ainda assim, fez-se o teste de Tukey que confirmou que todas as médias, de fato, mostram não ter diferenças significativas (Tabela 6.5). Ou seja, por esses resultados, a presença do EVA e o procedimento de imersão não são fatores que interferem na medida de transporte de cloretos.

Com os valores da Tabela 6.1, verifica-se que os resultados do ensaio para a data mais avançada do ataque (112 dias - ciclo 16) apresentam uma diferenciação mais acentuada dos valores da penetração de cloreto entre as amostras na posição do topo e da base.

Os resumos dos resultados estatísticos na posição do topo aos 112 dias de imersão estão apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7.

Tabela 6.6 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	14,12	5,26	4,35	0,0327	*
Fator2 – Teores de EVA	1	3,87	1,44	4,35	0,2433	Ns
Int. F1xF2	1	32,26	12,03	8,09	0,0024	**
Fatores x Concreto Convencional	1	0,25	0,09	0,001	>0,050	Ns
Erro	20	2,68				
Total	24					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.7 – Teste de Tukey para as médias das profundidade de transporte de cloretos no TOPO do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	20,68 aA	22,34 aB
Com	21,54 aA	18,12 bB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base na ANOVA, verifica-se que (Tabela 6.6):

- o fator tratamento de imersão é significativo ao nível de 5% de significância;

- o fator teores de EVA apresenta-se como efeito não significativo. Sendo uma situação diferente do que se apresentou na idade de 28 dias do ensaio.

Pela análise das médias com o Teste de Tukey, tem-se que (Tabela 6.7):

- para o fator tratamento de imersão, somente na média das profundidades de penetração de cloretos nas amostras EVA100 há diferença significativa, sendo menor estatisticamente nas misturas EVA100:CI em relação às misturas EVA100:SI. Essa situação é diferente da análise realizada para a idade de 28 dias do ensaio.

- para o fator teores de EVA, as médias das profundidades de penetração de cloretos nas amostras EVA40 apresentam-se maiores, estatisticamente, que quando se utiliza EVA100.

Os resumos dos resultados estatísticos na posição da base aos 112 dias de imersão estão apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9.

Tabela 6.8 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Tratamento imersão	1	1,38	0,1647	0,001	>0,050	ns
Fator2 – Teores de EVA	1	0,94	0,1131	0,001	>0,050	ns
Int. F1xF2	1	22,36	2,6727	4,3512	0,1176	ns
Fatores x Concreto Convencional	1	0,93	0,1113	0,001	>0,050	ns
Erro	20	8,37				
Total	24					

ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 6.9 – Teste de Tukey para a profundidade de transporte de cloretos na BASE do corpo-de-prova aos 112 dias de imersão (ciclo 16), entre as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

Tratamento imersão	Teores de EVA	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	17,22 aA	15,54 aA
Com	14,58 aA	17,13 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Na análise dos resultados para a posição da base dos corpos-de-prova, os estudos estatísticos para a idade de 112 dias são coerentes ao momento anterior do ensaio e demonstram que tanto os fatores imersão prévia em água e teores de EVA são não significativos para a profundidade de transporte de cloretos, pela ANOVA (Tabela 6.8) e confirmado pelo teste de Tukey (Tabela 6.9).

Esses resultados discrepantes do estudo estatístico para a posição do topo dos corpos-de-prova entre as duas datas de ensaio são demonstrações que, na verdade, não há uma forte correlação da profundidade de transporte de cloretos com os fatores avaliados.

O que está mais interferindo nos resultados da profundidade de transporte de cloretos é a condição de adensamento, pois, no topo dos corpos-de-prova, há uma maior variação das

condições de adensamento dos moldes, devido às dificuldades naturais de adensamento nesta região (topo), e isso não ocorre na posição das bases dos moldes.

Na posição da base dos corpos-de-prova, pode-se tirar conclusões mais claras sobre possível interferência do EVA na profundidade de transporte de cloretos, pois, nessas condições, o adensamento é mais homogêneo. Para esses, verifica-se, de forma mais significativa, que não há de fato interferência do teor de EVA e do seu procedimento de imersão prévia em água nos resultados das profundidades de transporte de cloretos.

Em todas as amostras, houve uma maior profundidade de transporte de cloretos a partir da superfície dos topos dos corpos-de-prova, se comparado às bases. Esse fato demonstra que a permeabilidade dos concretos situados nas bases e topos é diferente, devido, provavelmente, à diferenciação das condições de vibração durante o lançamento das misturas nos moldes, que apresenta ter maior facilidade de adensamento na base. Portanto, o adensamento insatisfatório dos concretos na região do topo deixa-os mais porosos. Consequentemente, ao ser imerso na solução de cloretos, sofreu uma maior penetração pelo agente agressivo.

Os estudos estatísticos corroboram com a afirmação de que houve uma maior profundidade de transporte de cloretos no topo dos corpos-de-prova, se comparado às bases. Ao se fazer a análise dos resultados apresentados das medidas de penetração em cada um dos concretos com EVA, para os fatores posição no corpo-de-prova e idade do ensaio, verifica-se que, com a evolução das idades analisadas, o ataque do cloreto continua e que o fator posição do corpos-de-prova interfere, significativamente, nos resultados da profundidade de transporte de cloretos em praticamente todos os traços (Tabelas 6.10 a 6.17).

Tabela 6.10 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA40:SI, variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Posição no corpo-de-prova	1	41,61	7,7328	4,494	0,0134	*
Fator2 – Idade do ensaio	1	422,74	78,5507	8,531	<0,001	**
Int. F1xF2	1	1,65	0,3072	0,001	>0,050	ns
Erro	16	5,38				
Total	19					

Tabela 6.11 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA40:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Posição no corpo-de-prova	Idade do ensaio	
	28 dias (ciclo 4)	112 dias (ciclo 16)
Topo	10,91 aB	20,68 aA
Base	8,60 aB	17,22 bA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.12 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Posição no corpo-de-prova	1	99,46	35,3416	8,531	<0,001	**
Fator2 – Idade do ensaio	1	458,88	163,0602	8,531	<0,001	**
Int. F1xF2	1	31,25	11,1044	8,531	0,0042	**
Erro	16	2,81				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

Tabela 6.13 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Posição no corpo-de-prova	Idade do ensaio	
	28 dias (ciclo 4)	112 dias (ciclo 16)
Topo	9,46 aB	21,54 aA
Base	7,50 aB	14,58 bA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.14 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Posição no corpo-de-prova	1	64,08	102,1634	8,531	<0,001	**
Fator2 – Idade do ensaio	1	584,28	931,4954	8,531	<0,001	**
Int. F1xF2	1	51,84	82,6497	8,531	0,0042	**
Erro	16	0,63				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 6.15 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Posição no corpo-de-prova	Idade do ensaio	
	28 dias (ciclo 4)	112 dias (ciclo 16)
Topo	8,31 aB	22,34 aA
Base	7,95 aB	15,54 bA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.16 – Análise de variância para a profundidade de transporte de cloretos no concreto EVA100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Posição no corpo-de-prova	1	0,07	0,0122	0,001	>0,050	ns
Fator2 – Idade do ensaio	1	427,81	72,5752	8,531	<0,001	**
Int. F1xF2	1	3,78	0,6420	0,001	>0,050	ns
Erro	16	5,89				
Total	19					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

ns = não significativo ($p > 0,05$).

Tabela 6.17 – Teste de Tukey para as médias das profundidades de transporte de cloretos no concreto EVA100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Posição no corpo-de-prova (topo e base) e Idade do ensaio (28 e 112 dias).

Posição no corpo-de-prova	Idade do ensaio	
	28 dias (ciclo 4)	112 dias (ciclo 16)
Topo	8,00 aB	18,12 aA
Base	8,75 aB	17,13 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com o Teste de Tukey, em todos os concretos, os resultados das médias da profundidade de transporte de cloretos são iguais para a idade de 28 dias, pois, como já foi comentado, neste momento do ensaio, a penetração encontra-se em condições iniciais, e não há diferenças entre as amostras. Já na idade mais avançada do ensaio, pode-se comprovar, estatisticamente, que, no topo dos corpos-de-prova, o transporte do cloreto avançou mais que na base, com exceção do EVA100:CI, e que não houve diferença estatística entre as médias.

Em suma, dos resultados obtidos pela profundidade de transporte de cloretos, temos:

- as medidas obtidas no topo e na base das amostras são significativamente diferentes, sendo que, no topo, o cloreto penetrou mais pela existência de concentrar nesta região camada de pasta mais permeável devido às condições diferenciais de adensamento entre o topo e a base dos corpos-de-prova;
- o efeito predominante que intervém nas condições de transporte de cloretos nos concretos estudados é o adensamento, não havendo assim nenhuma correlação significativa com o teor de EVA incorporado nas misturas.

Esses resultados, por se tratar de ensaio qualitativo, obtidos através de medição da variação colorimétrica ocorrida devido à aspersão da solução de nitrato de prata, merecem ser analisados com prudência. O ensaio é sujeito a imprecisões, influenciadas pelo intervalo de tempo do momento da aspersão até a leitura, da dificuldade de visualização do efeito da aspersão, entre outros. Portanto, para melhor interpretação, no próximo subitem apresentam-se as análises quantitativas do teor de cloretos totais presentes para variáveis profundidades.

6.3.1.2 *Análise do teor de cloretos totais*

Os percentuais de cloretos totais (CI) em relação à massa de cimento, determinadas por meio da análise por titulação potenciométrica, estão mostrados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Resultados dos percentuais de cloretos totais (Cl⁻ em relação à massa de cimento) para os concretos nas datas 28 e 112 dias de imersão.

Nomenclatura da mistura	Profundidade (mm)	% Cl / (massa de cimento)			
		Aos 28 dias (ciclo 4)		Aos 112 dias (ciclo 16)	
		Topo dos CP's	Base dos CP's	Topo dos CP's	Base dos CP's
EVA40:SI	0 a 5	2,0190	2,5036	2,9303	2,6688
	5 a 10	1,2804	1,8759	1,4064	0,9441
	10 a 15	0,3334	0,7550	2,0090	0,4841
	15 a 20	0,1462	0,0892	1,4570	0,5368
	20 a 25	-	-	0,4002	0,1176
EVA40:CI	0 a 5	2,3331	2,5103	3,3394	2,8823
	5 a 10	1,3368	1,8250	3,2231	2,3538
	10 a 15	0,2994	0,8052	2,1856	1,2400
	15 a 20	0,2004	0,1624	1,3855	0,7378
	20 a 25	-	-	0,6028	1,0350
EVA100:SI	0 a 5	1,7445	1,5610	4,0765	2,8823
	5 a 10	0,9106	0,4483	2,4773	2,0770
	10 a 15	0,4023	0,1465	2,2205	1,1094
	15 a 20	0,3946	0,0759	1,0963	0,5142
	20 a 25	-	-	0,5315	0,1777
EVA100:CI	0 a 5	1,9912	2,0209	4,6105	3,2271
	5 a 10	0,9986	0,7969	2,6963	2,0521
	10 a 15	0,4735	0,1554	2,0402	1,4930
	15 a 20	0,3276	0,2523	1,3100	0,5199
	20 a 25	-	-	0,6607	0,1329
EVA0	0 a 5	2,3527	1,2072	3,0970	2,1248
	5 a 10	1,3636	0,5885	1,9041	0,8165
	10 a 15	0,5892	0,2466	1,6874	0,5410
	15 a 20	0,2235	0,2389	1,2006	0,5376
	20 a 25	-	-	0,2658	0,4161

Ao se fazer uma análise entre os valores apresentados na Tabela 6.18, comparando a posição Topo e Base para o primeiro momento de sondagem (ciclo 4), observam-se inversões de valores entre os percentuais de cloretos da base e do topo ao longo da profundidade.

Porém, na segunda sondagem, quando o período de ataque estava mais avançado (ciclo 16), praticamente todos os valores dos percentuais de cloretos totais nos topos dos corpos-de-prova são maiores que os determinados em suas bases. Isso pode estar acontecendo devido à diferença de aplicação do adensamento dos corpos-de-prova entre a posição topo e base, que deixa mais vazios permeáveis na região do topo e mais densa a região da base.

Com os valores da Tabela 6.18, foram traçados os gráficos do perfil de cloretos nas camadas superficiais do topo e da base dos corpos-de-prova de todos os concretos para os dois momentos de sondagens.

Os perfis para a primeira etapa da sondagem (ciclo 4) estão nas Figuras 6.6 e 6.7.

Figura 6.6 – Perfis de cloretos totais no TOPO dos corpos-de-prova para os concretos aos 28 dias de ensaio (ciclo 4).

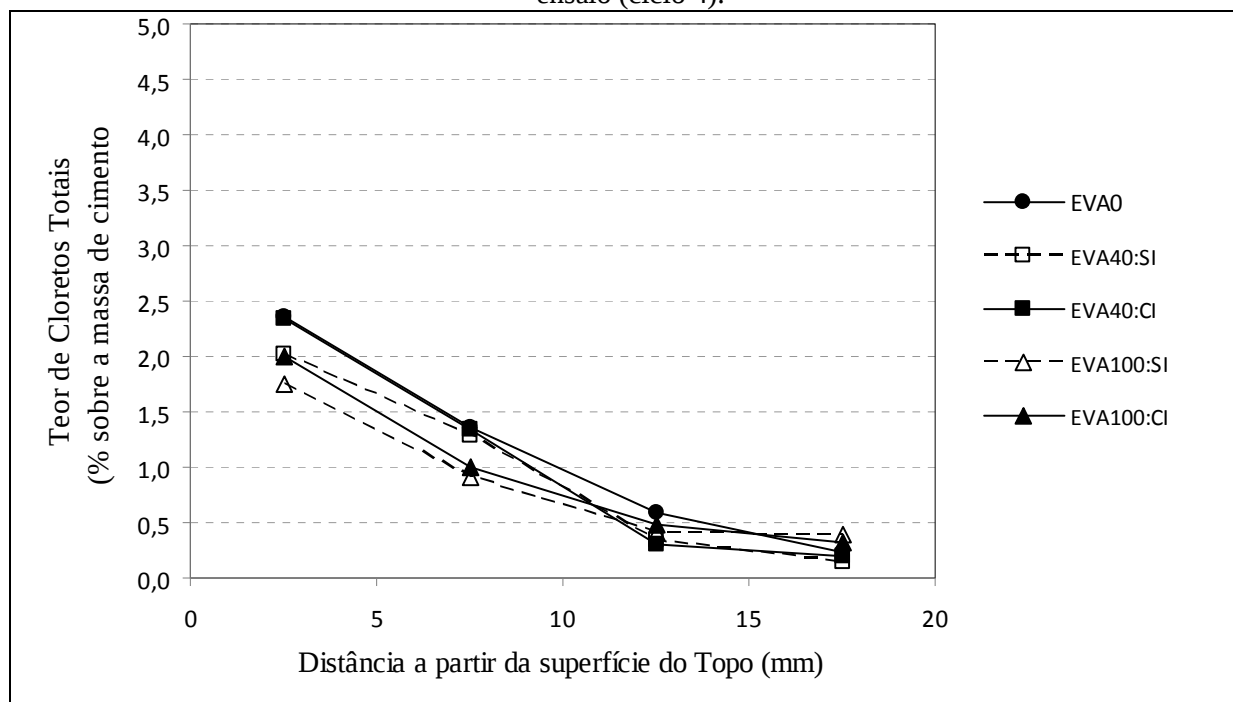
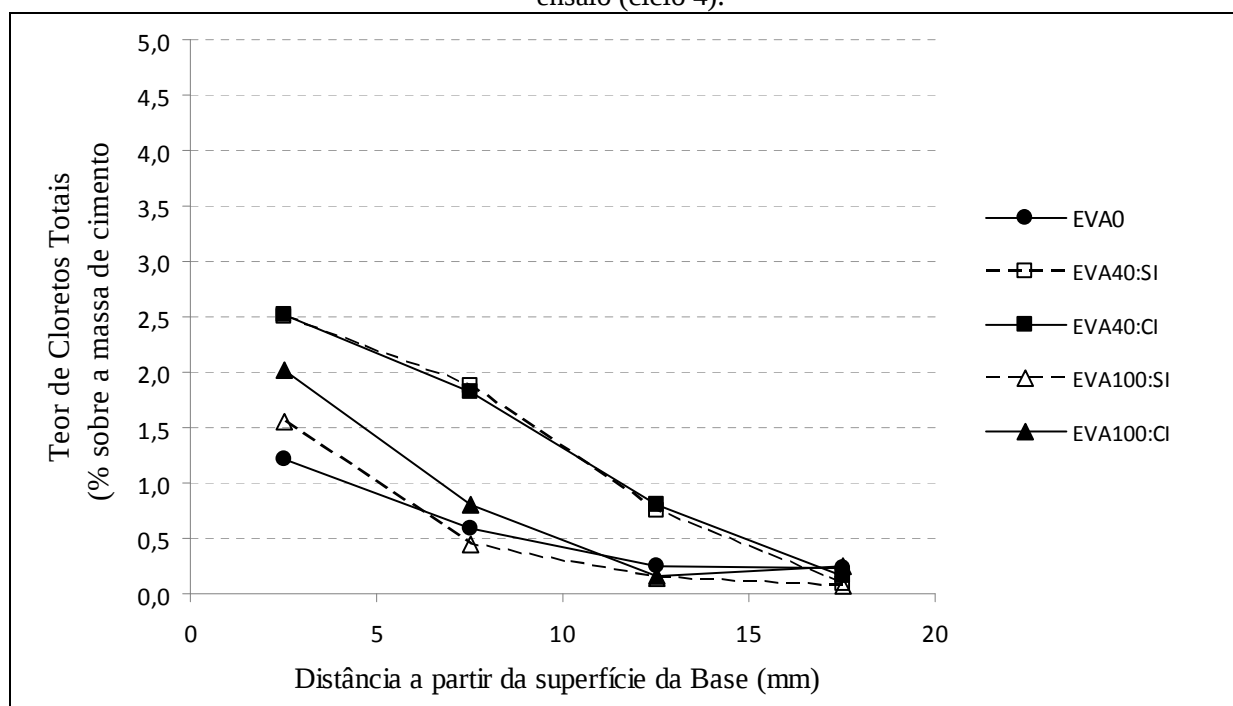


Figura 6.7 – Perfis de cloretos totais na BASE dos corpos-de-prova para os concretos aos 28 dias de ensaio (ciclo 4).



Na primeira etapa da sondagem (ciclo 4), os valores de cloretos totais obtidos em relação ao topo dos corpos-de-prova possuem valores próximos entre os concretos avaliados e, na maioria dos pontos dos concretos com EVA, manteve-se abaixo dos valores do concreto sem EVA, ou seja, não se percebe que a presença do EVA esteja influenciando de forma

negativa nos valores de cloretos presentes (Figura 6.6). Quanto à análise na base dos corpos-de-prova, apenas os valores das amostras EVA40:SI e EVA40:CI apresentaram-se maiores, sendo que os demais concretos (EVA 100:SI; EVA100:CI e EVA0) tiveram comportamentos aproximados (Figura 6.7).

Como já explicado anteriormente, neste momento, o tempo de ataque por cloretos não foi suficiente para provocar interveniências significativas devido à presença do EVA para se fazer uma análise segura, e o fator mais preponderante é a condição de adensamento.

Os perfis para o segundo momento da sondagem estão nas Figuras 6.8 e 6.9

Na análise do segundo momento da sondagem (ciclo 16), pode-se perceber melhor uma maior influência nos resultados, por causa da presença do EVA. As curvas dos perfis de cloretos dos concretos EVA40:CI e EVA100:CI se situaram ligeiramente acima das demais, principalmente nos perfis da Base. Nesse momento, a variável teor de EVA torna-se mais forte, principalmente ao analisar os resultados da Base, em que o adensamento é mais homogêneo (Figura 6.9).

Figura 6.8 – Perfis de cloretos totais no TOPO dos corpos-de-prova para os concretos aos 112 dias de ensaio (ciclo 16).

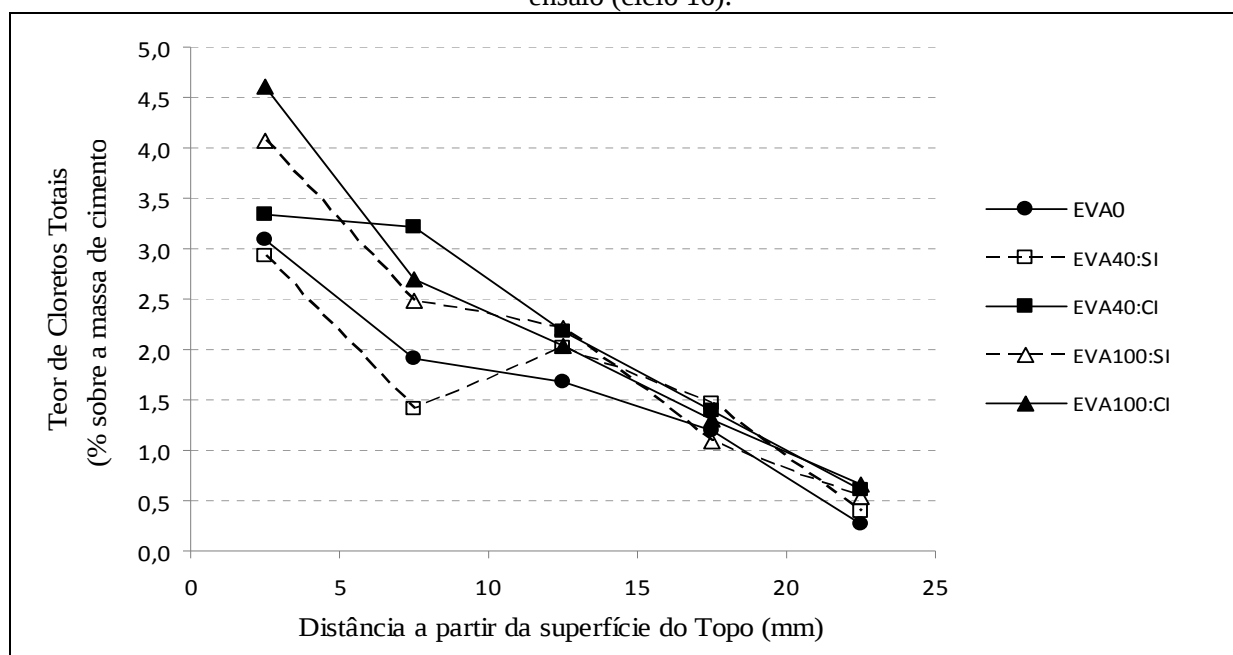
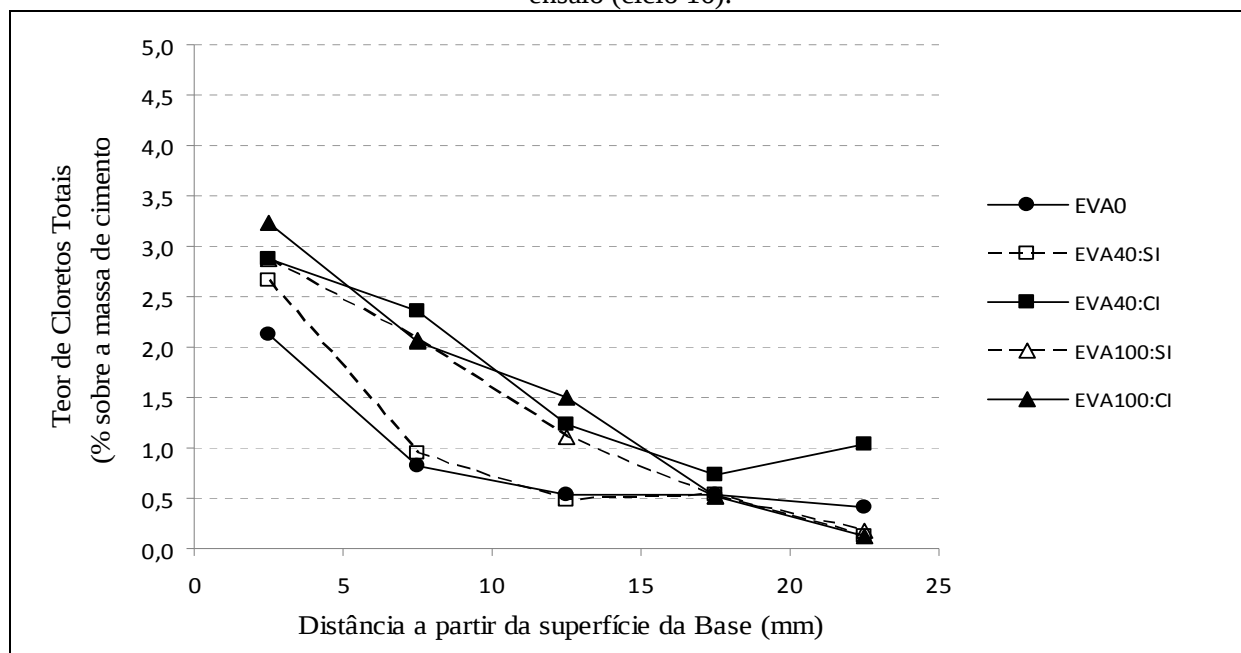


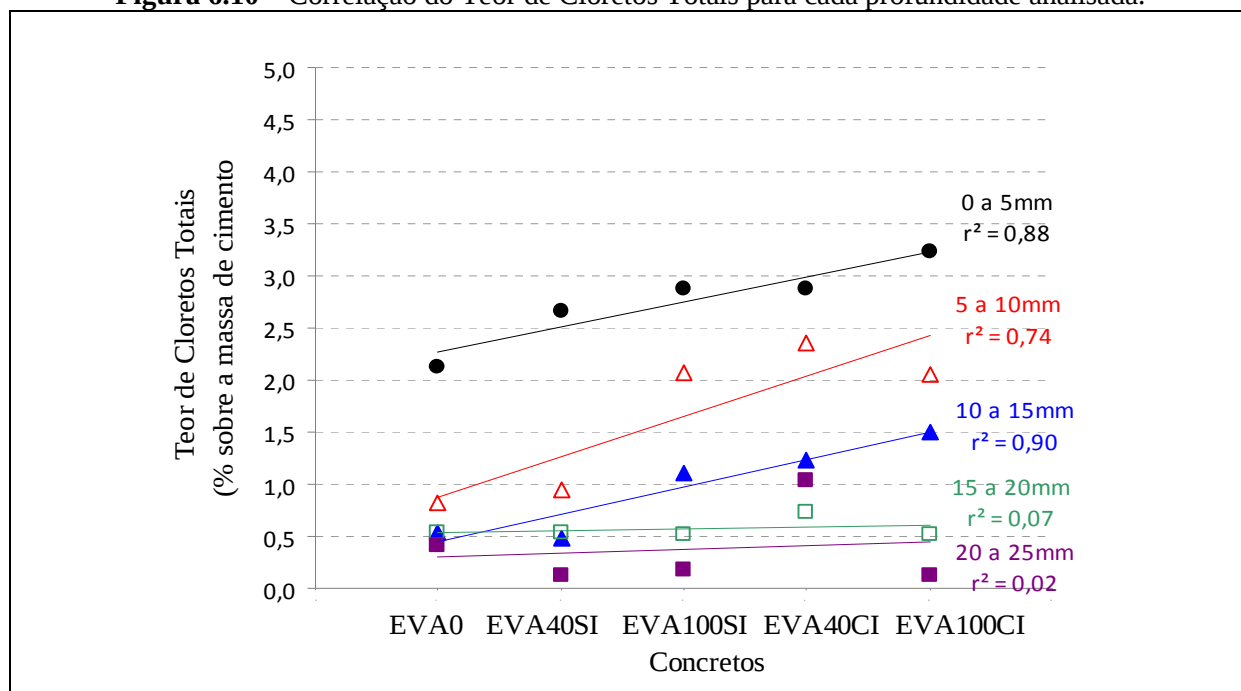
Figura 6.9 – Perfis de cloretos totais na BASE dos corpos-de-prova para os concretos aos 112 dias de ensaio (ciclo 16).



Os valores mais elevados de cloretos nos concretos EVA:CI, na maioria das profundidades analisadas, podem ser explicados devido à pasta desses concretos possuírem maior quantidade de poros nas regiões próximas aos agregados de EVA previamente saturados, conforme conclusão apresentada no capítulo 5 (Etapa II da tese).

Esse maior volume de vazios torna-se um facilitador para acumular maior concentração de sais deixados pelo procedimento cíclico de umedecimento e secagem, que provocam a evaporação da água pura durante a secagem e deixam os sais cristalizados nos poros do concreto.

Os valores de cloretos totais são mais afetados até a profundidade de 15mm, e, para camadas mais internas do concreto, os valores de todos os concretos tornam-se parecidos. Na Figura 6.10, é apresentada uma sequência crescente dos concretos que mais obtiveram cloretos (EVA0; EVA40SI; EVA100SI; EVA40CI; EVA100CI), demonstrando que somente nas curvas até 15mm há uma correlação crescente da presença de cloretos com os teores de EVA e condições de imersão prévia (alto coeficiente de determinação), e, nas curvas das camadas mais profundas, os valores se igualam (desprezível coeficiente de determinação).

Figura 6.10 – Correlação do Teor de Cloretos Totais para cada profundidade analisada.

Dos resultados obtidos nos percentuais de cloretos totais, tem-se que:

- no topo dos corpos-de-prova, há maior concentração de cloretos que em sua base, devido à maior permeabilidade do topo pela sua condição mais desfavorável de adensamento;
- a maior porosidade na pasta próxima ao grão de EVA deixado pelo procedimento de pré-molhagem desses agregados e os teores mais elevados de EVA tornam-se um facilitador para acumulação de cristais de sais de cloretos no interior do concreto;
- a influência do procedimento de pré-molhagem e do teor de EVA é significativa até uma profundidade de aproximadamente 15mm. Sendo que, para camadas mais internas, como o volume de cloretos totais presentes é reduzido, essa influência provoca variações pequenas nessas concentrações, e assim, tornam-se pouco expressivas para provocar consequências diferenciadas na durabilidade dos concretos.

6.3.2 Ação dos sulfatos

6.3.2.1 Análise da variação dimensional

Com os dados apresentados no Apêndice B.7 - Tabela B7.1, são apresentados na Figura 6.11 os valores médios da variação dimensional das barras, em percentagem em

seja, com o surgimento de dois estágios (SAHMARAN, COHEN e OLECK, 2002; SCHMIDT *et al.*, 2009).

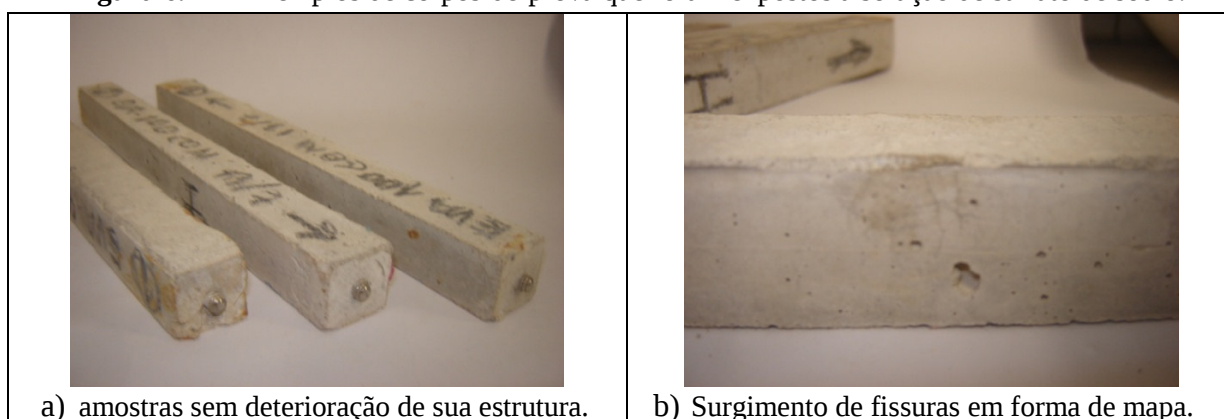
Verifica-se pelos perfis da Figura 6.11 que:

- as maiores expansões ocorreram nos concretos EVA100:SI e EVA100:CI. Sendo que, nesses concretos com maiores teores de EVA, a passagem do estágio de crescimento mais lento para o estágio de indução mais rápida ocorreu aos 56 dias de imersão (ponto a);
- para os demais concretos, EVA40:SI e EVA40:CI e EVA0, a passagem do primeiro estágio para o segundo demorou mais a acontecer, ocorrendo com 84 dias de ensaio (ponto b);
- ao comparar os concretos com teores iguais de EVA, tem-se que o concreto EVA100:SI sofreu mais expansão do que o EVA100:CI, e, quando se compara os concretos EVA40, a situação se inverte, ou seja, o EVA40:CI tem maior expansão que o EVA40:SI. Essa situação pode indicar que as expansões ocorreram nos concretos, independentemente de ser com agregado EVA sem ou com imersão prévia em água.

A presença do EVA deixou o concreto mais suscetível a sofrer expansão devido à rugosidade do agregado EVA, que permitiu um maior acúmulo de sulfatos em seus poros superficiais, além da ocorrência de uma secagem mais rápida nos concretos com EVA. E assim, intensificou a presença da cristalização deste sal, que consequentemente, provocou uma expansão mais rápida e mais intensa.

Apesar da expansão sofrida pelas amostras, não ocorreu a deterioração com desprendimentos de partes dos corpos-de-prova, havendo o surgimento de algumas fissuras em forma de mapa em praticamente todas as amostras submetidas ao sulfato (Figura 6.12). Provavelmente, caso o ensaio fosse prolongado por um período maior, essas fissuras iriam aumentar a um ponto tal que pudessem comprometer a resistência do concreto. Nos concretos com maior quantidade de EVA, esse efeito poderia ocorrer de modo mais acelerado.

Figura 6.12 – Exemplos de corpos-de-prova que foram expostos à solução de sulfato de sódio.



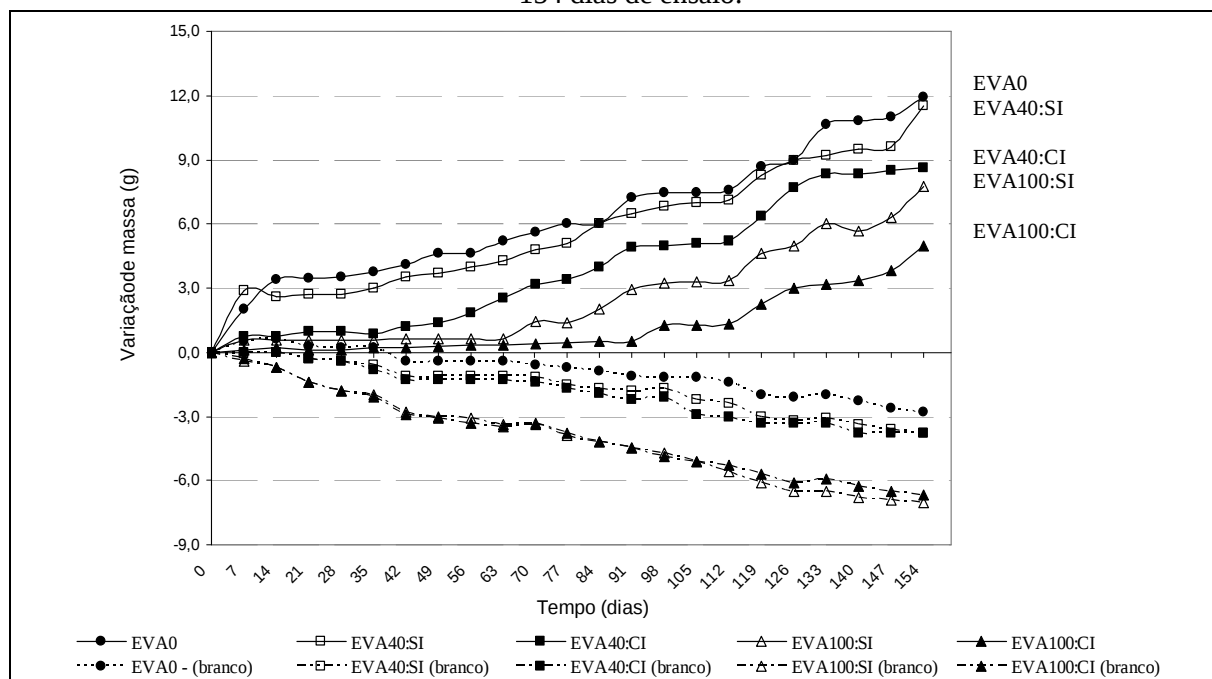
Ainda pelo perfil da variação dimensional (Figura 6.11), observa-se que os concretos que não passaram pela imersão em solução de sulfato tiveram comportamentos semelhantes entre si, havendo pequena retração em seus volumes, dada a saída natural da água. Esse comportamento é típico de concretos normais.

Nos concretos com EVA, a evaporação da água foi mais acelerada, possivelmente devido à presença de grãos de EVA próximos à superfície do concreto, que facilitaram a saída da água, e isso provocou uma maior retração nos concretos com maiores teores de EVA. O EVA não provocou resistência às forças de retração.

6.3.2.2 Análise da variação de massa

Com os dados apresentados no Apêndice B.7 -Tabela B7.2, são apresentados na Figura 6.13 os valores médios da variação de massa das barras, em gramas em relação ao valor na data antes da imersão na solução com sulfatos. São mostradas também as médias da variação de massa das amostras, chamadas de brancas.

Figura 6.13 – Variação de massa em gramas dos concretos avaliados, das amostras imersas em solução de sulfato de sódio e das amostras sem submeter ao sulfato (amostras brancas) pelo período de 154 dias de ensaio.



Os concretos imersos em solução de sulfato ganharam massa ao longo do ensaio, por causa do acúmulo de cristais de sal em seu interior. O processo de secagem na estufa não

consegue secar totalmente as amostras, e isso faz com que a massa do corpo-de-prova aumente devido à presença da solução que não é totalmente retirada.

Nas amostras com maior incorporação de EVA, quando passam pelo momento da secagem em estufa, a saída da água acontece mais facilmente, e, por isso, nessas amostras, o ganho de massa é menor.

Verifica-se pela Figura 6.13 que:

- os maiores ganhos de massa ocorreram nos concretos EVA0, EVA40:SI e EVA40:CI. Nessas amostras, há uma maior dificuldade de secagem, e assim seu interior fica com mais umidade, e isso os deixa com maior incorporação de massa.

A literatura tem demonstrado que, dependendo do tipo de ataque e do momento, uma das consequências do ataque por sulfato é a perda de massa (BONAKDAR e MOBASHER, 2010). Portanto, o fato de as amostras analisadas nesta pesquisa estarem ganhando massa, demonstra que não houve uma deterioração significativa nesses concretos.

Não se pode concluir sobre os efeitos do ataque por sulfato somente com o parâmetro da variação de massa. As análises aqui estudadas se referem até o período de realização do ensaio (154 dias), sendo que as propriedades das amostras podem sofrer alterações à medida que aumentam ainda mais a quantidade de ciclos de secagem e molhagem.

Quanto às amostras brancas (que não passaram pela imersão em solução de sulfato, foram protegidas em plásticos), pode-se verificar a maior perda de água nas amostras com maiores teores de EVA, independentemente de se usar agregados sem ou com imersão prévia em água.

Como já explicado, isso ocorre devido à presença de grãos de EVA próximos a superfície do concreto, que proporcionam uma maior facilidade de expulsão da água de seus poros e ainda criam uma passagem de água pelos poros externos de seus grãos, facilitando assim sua saída.

6.3.2.3 *Análise da variação da resistência à compressão*

Na Tabela 6.19, são apresentados os valores médios das resistências à compressão dos concretos, quando submetidos ao ataque em solução com sulfatos de sódio, e os resultados das amostras que ficaram fora da solução, para as três datas de sondagem (ciclo 4 - aos 28 dias de ensaio; ciclo 9 - aos 63 dias de ensaio; ciclo 22 - aos 154 dias de ensaio).

Tabela 6.19 – Resultados da resistência à compressão axial das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos nos estudos - Etapa III.

Traços			Resistência à compressão											
			Ciclo 4 (28 dias)				Ciclo 9 (63 dias)				Ciclo 22 (154 dias)			
			Sem sulfato		Com sulfato		Sem sulfato		Com sulfato		Sem sulfato		Com sulfato	
EVA40:SI	MÉDIA(MPa)		31,7		36,1		32,9		36,2		33,5		33,7	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	1,4	4,4	0,1	0,4	2,5	7,5	0,1	0,4	6,3	18,8	0,6	1,7
EVA40:CI	MÉDIA(MPa)		31,0		33,6		31,9		34,1		31,8		34,9	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	1,3	4,2	0,2	0,7	1,3	4,2	0,9	2,6	4,0	12,5	3,2	9,2
EVA100:SI	MÉDIA(MPa)		18,3		17,4		18,3		18,0		17,7		20,2	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,5	2,7	0,4	2,3	0,5	2,9	1,1	5,9	1,7	9,8	1,6	7,9
EVA100:CI	MÉDIA(MPa)		16,1		12,8		16,4		12,9		16,2		17,5	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,2	1,4	0,1	0,8	0,4	2,2	0,1	1,1	1,7	10,8	2,0	11,7
EVA0	MÉDIA(MPa)		47,4		47,5		50,4		47,5		53,2		59,9	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	2,8	5,9	0,5	1,0	3,6	7,0	0,5	1,0	4,6	8,6	5,1	8,4

De acordo com os dados da Tabela 6.19, verifica-se que ao se comparar as amostras submetidas ao ataque em solução com sulfatos de sódio às amostras isentas de sulfatos possuem valores de resistências à compressão bem próximas. Inclusive, em alguns casos, o maior valor de resistência corresponde às amostras que sofreram ataque pelo sulfato.

O estudo estatístico para todas as misturas, por meio da ANOVA e teste de Tukey estão apresentados nas tabelas 6.20 a 6.29. Os dados estatísticos completos estão mostrados no Apêndice B (Tabelas B6.1 a B6.5).

Tabela 6.20 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	10,97	0,9762	0,001	>0,050	ns
Fator2 – Idade de ensaio	2	190,16	16,9110	6,0129	<0,001	**
Int. F1xF2	2	48,97	4,3548	3,5546	0,0287	*
Erro	18	11,24				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 = p < 0,05$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.21 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	47,37 aA	50,42 aA	53,16 bA
Com	47,53 aB	47,53 aB	59,95 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.22 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 40:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	52,08	6,4148	4,4139	0,0208	*
Fator2 – Idade de ensaio	2	0,85	0,1054	0,0254	>0,050	ns
Int. F1xF2	2	5,87	0,7241	0,0254	>0,050	ns
Erro	18	8,12				
Total	23					

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.23 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 40:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	31,67 bA	32,90 aA	33,53 aA
Com	36,14 aA	36,17 aA	34,62 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.24 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 40:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	42,77	9,5053	8,2854	0,0064	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	2,27	0,5046	0,0254	>0,050	ns
Int. F1xF2	2	0,42	0,0935	0,0254	>0,050	ns
Erro	18	4,49				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.25 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 40:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	30,97 aA	31,94 aA	31,79 aA
Com	33,65 aA	34,15 aA	34,91 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.26 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 100:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	1,02	1,0055	4,4139	0,3291	ns
Fator2 – Idade de ensaio	2	2,59	2,5531	3,5546	0,1057	ns
Int. F1xF2	2	6,40	6,3057	6,0129	0,0084	**
Erro	18	1,01				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.27 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 100:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	18,29 aA	18,27 aA	17,71 bA
Com	17,39 aB	17,97 aB	20,16 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

Tabela 6.28 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA 100:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	P	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	20,75	20,5446	8,2854	< 0,001	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	14,45	14,3065	6,0129	< 0,001	**
Int. F1xF2	2	14,54	14,4011	6,0129	< 0,001	**
Erro	18	1,01				
Total	23					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$).

Tabela 6.29 – Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão axial no concreto EVA 100:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	16,05 aA	16,44 aA	16,23 aA
Com	12,79 bB	12,86 bB	17,48 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados estatísticos, verifica-se que:

- as misturas que não passaram pelo ataque por sulfato não apresentaram variação de resistências estatisticamente significativas ao longo do tempo, para as datas aqui averiguadas. Isso ocorreu devido às datas avançadas de realização dos ensaios, e, portanto, as resistências dos concretos já estão praticamente estabilizadas (Tabelas 6.21, 6.23, 6.25, 6.27, e 6.29);

- nas amostras submetidas ao ataque por sulfato, as misturas EVA0, EVA100:SI e EVA100:CI apresentaram crescimento de suas resistências, expondo as médias do último ciclo como estatisticamente superior às médias dos outros dois ciclos da mesma amostra, conforme demonstrado pelo Teste de Tukey (Tabelas 6.21, 6.27 e 6.29);

- nas misturas EVA40:SI e EVA:40CI, os resultados não diferem estatisticamente entre si (Tabelas 6.23 e 6.25).

A presença dos cristais de sal no interior das amostras, até o momento analisado do ensaio, está preenchendo os poros, deixando o concreto mais denso e sem provocar pressões internas que possam interferir na perda da resistência.

A variação estatisticamente significativa no aumento da resistência, ao longo do tempo, de algumas amostras pode ser explicada por uma possível continuação da hidratação do cimento, que melhorou, considerando a continuação da cura ao imergir os corpos-de-prova na solução, mesmo na presença do agente agressivo. Esse fenômeno também ocorreu com outros trabalhos com ensaios acelerados imersos em solução de sulfatos, por exemplo, na pesquisa de Sahmaran *et al.* (2007), em que as amostras que utilizaram cimentos resistentes a sulfatos continuaram ganhando resistência até o final do experimento.

O crescimento de resistência à compressão das amostras é um comportamento típico de um ambiente em ensaios de solução de sulfato. Várias pesquisas anteriores com outros tipos de concretos também observaram esse ganho de resistência (MOUKWA, 1990; GONZÁLEZ e IRASSAR, 1998; SAHMARAN *et al.*, 2007).

Foi realizado ainda o estudo estatístico da interação do efeito do tratamento de imersão prévia do agregado de EVA em água. A aplicação desta análise foi feita para o ciclo 22, por se tratar da etapa em que as amostras estão mais tempo submetidas aos efeitos da solução de sulfato (Tabelas 6.30 e 6.31). No Apêndice B (Tabelas B6.6 e B6.7), são apresentados os dados estatísticos detalhados.

Tabela 6.30 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	P	Efeito
Tratamento imersão	1	0,12	0,0214	0,0011	>0,050	Ns
Erro	4	5,74				
Total	5					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.31 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	P	Efeito
Tratamento imersão	1	10,80	3,2064	7,7086	0,1477	ns
Erro	4	3,37				
Total	5					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Os resultados estatísticos demonstram que o efeito do tratamento de imersão prévia do EVA em água não é significativo entre as médias das resistências à compressão dos concretos para as condições submetidas ao sulfato.

6.3.2.4 Análise da variação da resistência à tração na flexão

Na Tabela 6.32, são apresentados os valores médios das resistências à tração na flexão para as misturas submetidas ao ataque em solução com sulfatos de sódio e as misturas que ficaram fora da solução para as três datas de sondagem.

Tabela 6.32 – Resultados da tração na flexão das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação para os concretos - Etapa III.

Traços			Resistência à TRAÇÃO NA FLEXÃO											
			Ciclo 4 (28 dias)				Ciclo 9 (63 dias)				Ciclo 22 (154 dias)			
			Sem sulfato		Com sulfato		Sem sulfato		Com sulfato		Sem sulfato		Com sulfato	
EVA40:SI	MÉDIA(MPa)		8,2		9,8		7,0		10,3		7,6		9,7	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,5	7,0	0,1	1,2	1,2	17,3	1,4	14,1	0,1	1,3	3,2	33,3
EVA40:CI	MÉDIA(MPa)		7,0		10,5		7,4		10,6		6,6		7,9	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,1	1,6	0,7	6,7	0,6	7,7	0,9	9,1	0,3	5,3	1,5	18,8
EVA100:SI	MÉDIA(MPa)		4,9		7,7		5,4		7,1		4,5		5,8	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,1	2,4	1,3	16,1	0,4	8,1	0,5	6,5	0,1	2,6	0,1	2,6
EVA100:CI	MÉDIA(MPa)		5,9		7,1		6,1		6,3		5,4		5,9	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,1	1,9	0,2	3,2	0,5	8,3	0,7	10,8	0,3	6,4	0,7	11,5
EVA0	MÉDIA(MPa)		9,0		10,4		10,6		10,2		10,6		11,3	
	Desvio Padrão	Coef. Var.	0,2	2,6	1,5	14,4	1,4	13,4	0,2	12,5	1,2	11,2	0,7	6,1

De acordo com os dados da Tabela 6.32, verifica-se que, assim como ocorreu com a resistência à compressão, também nos ensaios da resistência à tração, houve um valor maior de resistências para as amostras imersas em solução com sulfato, se comparados com os mesmos concretos que ficaram fora da solução de sulfato de sódio. Isso acontece devido, provavelmente, à ocorrência da melhora da hidratação do cimento dada à cura imersa dessas amostras (MOUKWA, 1990; GONZÁLEZ e IRASSAR, 1998; SAHMARAN *et al.*, 2007).

O estudo estatístico para todas as misturas por meio da ANOVA e teste de Tukey está apresentado nas tabelas 6.33 a 6.42. Os dados estatísticos completos estão mostrados no Apêndice B (Tabelas B6.8 a B6.12).

Tabela 6.33 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	1,345	1,2448	4,747	0,286	ns
Fator2 – Idade de ensaio	2	2,355	2,1784	3,885	0,156	ns
Int. F1xF2	2	1,275	1,1790	3,885	0,341	ns
Erro	12	1,081				
Total	17					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.34 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA-0, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	8,98 aA	10,59 aA	10,63 aA
Com	10,41 aA	10,18 aA	11,25 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.35 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 40:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	24,36	10,2233	9,3302	0,0077	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	0,21	0,0906	0,0254	>0,050	ns
Int. F1xF2	2	1,14	0,4808	0,0254	>0,050	ns
Erro	12	2,38				
Total	17					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.36 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 40:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	8,16 aA	7,01 bA	7,59 aA
Com	9,78 aA	10,32 aA	9,66 aA

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.37 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 40:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	32,41	47,0898	9,3302	<0,001	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	5,25	7,6375	6,9266	0,0072	**
Int. F1xF2	2	1,92	2,7794	3,8853	0,1019	ns
Erro	12	0,69				
Total	17					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.38 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 40:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	7,01 bA	7,39 bA	6,57 aA
Com	10,46 aA	10,61 aA	7,95 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

Tabela 6.39 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 100:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	16,81	48,9305	9,3302	<0,001	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	2,55	7,4244	6,9266	0,008	**
Int. F1xF2	2	0,80	2,328	3,8853	0,1399	ns
Erro	12	0,34				
Total	17					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.40 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 100:SI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	4,93 bA	5,39 bA	4,49 bA
Com	7,69 aA	7,13 aA	5,81 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 6.41 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA 100:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato de sódio (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Fator1 – Ataque por sulfato	1	2,20	9,5105	9,3302	0,0095	**
Fator2 – Idade de ensaio	2	0,97	4,1758	3,8853	0,042	*
Int. F1xF2	2	0,39	1,6882	3,8853	0,2259	ns
Erro	12	0,23				
Total	17					

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$);

* = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 = p < 0,05$);

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.42 – Teste de Tukey para as médias das resistências à tração na flexão no concreto EVA 100:CI, aplicando as variáveis: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22).

Ataque por sulfato	Idade do ensaio		
	28 dias (ciclo 4)	63 dias (ciclo 9)	154 dias (ciclo 22)
Sem	5,86 bA	6,09 aA	5,41 aA
Com	7,12 aA	6,35 aAB	5,98 aB

Para colunas: classificação com letras minúsculas; Para linhas: classificação com letras maiúsculas.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com os resultados estatísticos, verifica-se que:

- as misturas que não passaram pelo ataque por sulfato não apresentaram variação de resistências estatisticamente significativas ao longo do tempo, para as datas aqui averiguadas (Tabelas 6.34, 6.36, 6.38, 6.40 e 6.42);

- nas amostras submetidas ao ataque por sulfato, nas misturas EVA40:CI, EVA100:SI e EVA100:CI, há um decréscimo de suas resistências, apresentando as médias do último ciclo como estatisticamente inferior às médias dos outros dois ciclos da mesma amostra, conforme demonstrado pelo Teste de Tukey (Tabelas 6.38, 6.40 e 6.42);

- nas misturas EVA0 e EVA40:SI, os resultados não diferem estatisticamente entre si ao longo do tempo (Tabelas 6.34 e 6.36).

O efeito do sulfato surgiu mais rapidamente nas amostras com quantidades maiores de EVA, demonstrando uma influência negativa da presença do EVA em grande quantidade para a resistência à tração na flexão dos concretos, quando submetidos à presença de sulfatos.

O fato de se ter percebido os efeitos do ataque do sulfato neste ensaio e não se ter percebido diferenças comportamentais dos concretos com ou sem EVA nas análises para resistência à compressão é um demonstrativo da maior sensibilidade da durabilidade dos concretos nos ensaios de resistência à tração com uso de amostras atacadas por sulfato, conforme mencionado na literatura (IRASSAR, 1998).

O estudo estatístico da interação do efeito do tratamento de imersão prévia em água do agregado de EVA foi realizado para o ciclo 22 (Tabelas 6.43 e 6.44). No Apêndice B (Tabelas B6.13 e B6.14), são apresentados os dados estatísticos detalhados.

Tabela 6.43 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamento imersão	1	4,34	0,6898	0,0011	>0,050	ns
Erro	4	6,29				
Total	5					

ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 6.44 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato de sódio aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Variável do Teste F	F crítico	p	Efeito
Tratamento imersão	1	0,04	0,1810	0,0011	>0,050	ns
Erro	4	0,25				
Total	5					

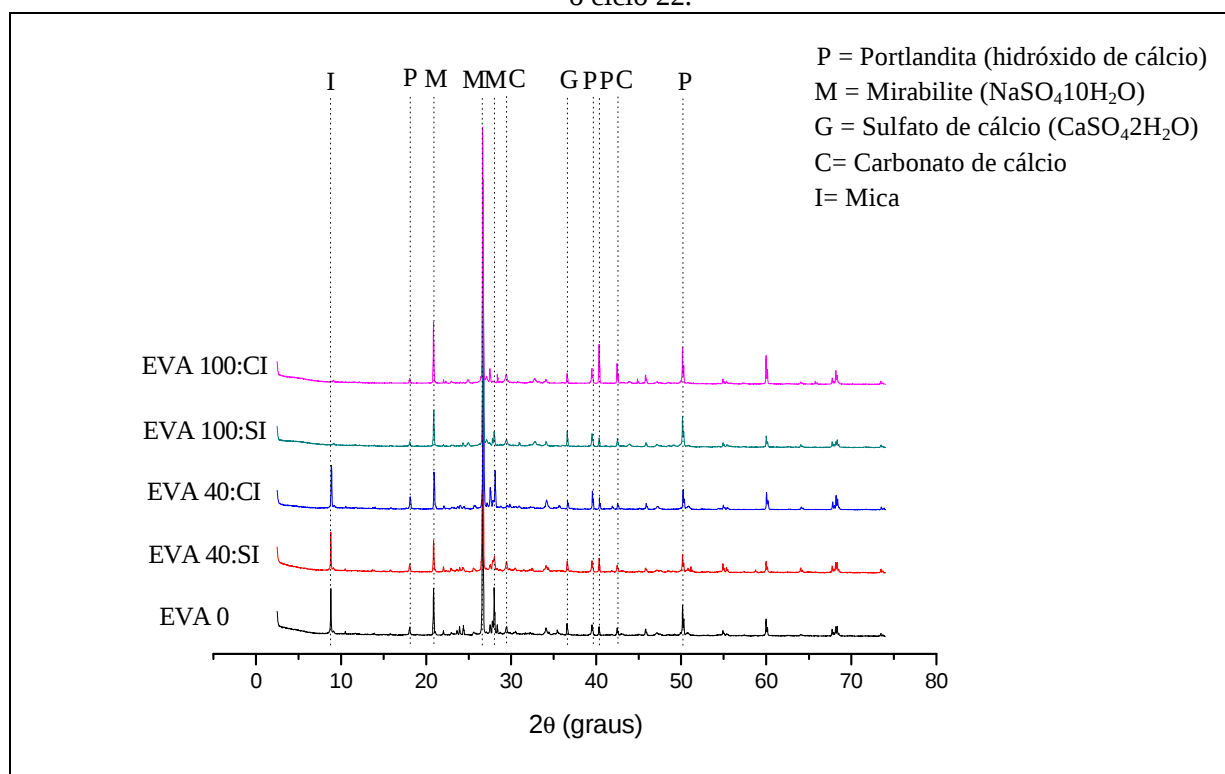
ns = não significativo ($p \geq 0,05$).

Com esse estudo estatístico pode se demonstrar que o efeito é não significativo entre as médias das resistências à tração na flexão para as condições submetidas ao sulfato.

6.3.2.5 Estudo do ataque por sulfato por meio das fases identificadas nos difratogramas

Os difratogramas (DRX) obtidos para as amostras de concreto submetidas ao ataque em solução com sulfatos de sódio estão apresentados na Figura 6.14.

Figura 6.14 – Difratograma de Raios-X das amostras imersas em solução com sulfatos de sódio, para o ciclo 22.



Os resultados do DRX indicam a presença de sulfato de sódio na forma de mirabilite (picos $2\theta=20,89^\circ$; $26,66^\circ$ e $28,01^\circ$) como o principal produto originado do ataque por sulfato de sódio. A presença representativa da mirabilite está demonstrando que o mecanismo de ataque do sulfato foi predominantemente físico (NEVILLE, 2004).

A ação do sulfato fez ainda surgir sulfato de cálcio, em um pico de baixa intensidade ($2\theta= 36,55^\circ$). Houve pouca formação de gipsita que se formou provavelmente ao consumir o CH, que se encontrava já em pouca quantidade nas pastas.

Não foi detectada a presença de etringita nos concretos atacados por sulfato, devido, de fato, a pouca ou a nenhuma formação desta, pois, como já apresentado anteriormente, as características da pasta de cimento, utilizada nos concretos, não são propícias para a sua formação, devido à pouca presença do C_3A . Assim, o mecanismo de ataque foi pouco influenciado pelos elementos de formação da pasta de cimento e se pode analisar a variável agregado, ou seja, a possível influência da presença do agregado de EVA no concreto.

E pelo fato de todas as amostras expostas à solução de sulfato de sódio não terem demonstrado sinais de deterioração e nenhum produto de degradação, do tipo etringita, ter sido encontrado na análise de DRX dessas amostras, pode-se concluir que a pouca presença de sulfato de cálcio e a destacável presença da mirabilite comprovam ter ocorrido predominantemente um ataque físico, mantendo os comportamentos semelhantes entre todos os concretos. Ou seja, a semelhança existente nas intensidades dos picos dos espectos de DRX dos concretos demonstra que as alterações microestruturais no concreto são análogas entre os compósitos sem EVA e com teores variáveis de EVA. Esse ensaio permitiu comprovar que a presença do EVA isoladamente não é um fator decisivo no comprometimento da qualidade do concreto em relação ao ataque por sulfato.

Os fatores de maior influência nas condições do ataque estão relacionados ao nível de agressividade do ambiente e das condições de permeabilidade do concreto, que, por sua vez, dependem do teor e tipo de sulfatos do meio; do pH da solução; da temperatura do meio; do tipo e o consumo de cimento; da relação água/cimento, do tempo e o tipo de cura (FERRARIS *et al.*, 1997).

Como neste ensaio tais condições foram mantidas constantes entre as misturas, e apenas a variável teor de EVA foi alterada, os efeitos da presença do EVA na permeabilidade do concreto não foram suficientemente significativos para serem percebidos nos difratogramas. De fato, o EVA provocou um maior volume de poros na pasta próxima aos grãos, principalmente quando foram utilizados agregados com imersão prévia em água,

entretanto são poros sem conectividade entre si, e assim não estão interferindo substancialmente na permeabilidade do concreto que permita uma maior penetração da solução de sulfato.

6.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com os resultados obtidos nesta Etapa III, em que foram avaliadas a incorporação do EVA e suas condições de absorção prévia em água na durabilidade dos concretos de cimento Portland de consistência plástica, quanto aos ataques por agentes químicos (sulfatos e cloretos), foram detectados os seguintes comportamentos nos concretos produzidos com agregados de EVA, comparados ao concreto com uso de apenas agregados naturais:

• *Quanto à ação dos cloretos:*

Pela análise dos resultados através da aplicação de uma solução de nitrato de prata na região atacada por cloretos, tem-se que as profundidades de transporte de cloretos no interior dos concretos não sofreram alterações entre os concretos analisados. Ou seja, as medidas da “frente de alcance dos cloretos” foram praticamente iguais para os concretos com variados teores de EVA e uso de agregados sem ou com imersão prévia em água (Misturas EVA40SI e EVA40:CI, uso de teor de 18% de EVA em volume em relação ao total de agregados; Misturas EVA100SI e EVA100:CI, uso de teor de 44% de EVA em volume em relação ao total de agregados; e Mistura EVA0, sem incorporação de EVA).

Essa análise difere dos resultados apresentados nos perfis de cloretos, obtidos através da titulação potenciométrica, isso devido à leitura da profundidade do ataque pela aspersão de nitrato de prata ser mais suscetível à ambiguidade nos resultados. Assim, devido a essas diferenças nos resultados apresentadas nos dois ensaios, as conclusões deste estudo serão aceitas pelo ensaio por titulação potenciométrica, do procedimento da ASTM C1152 (1994).

Desse estudo, verifica-se que no transporte para o interior do concreto, nas misturas que utilizam agregados de EVA com imersão prévia em água, houve uma maior porcentagem de cloretos totais, devido à pasta próxima aos grãos do EVA ser mais porosa, e assim acumularam maior quantidade de sais de cloretos com a saída da água durante o processo de secagem. Entretanto, para distâncias acima de 15mm, a faixa de variação torna-se menor, devido a menor concentração de cloretos.

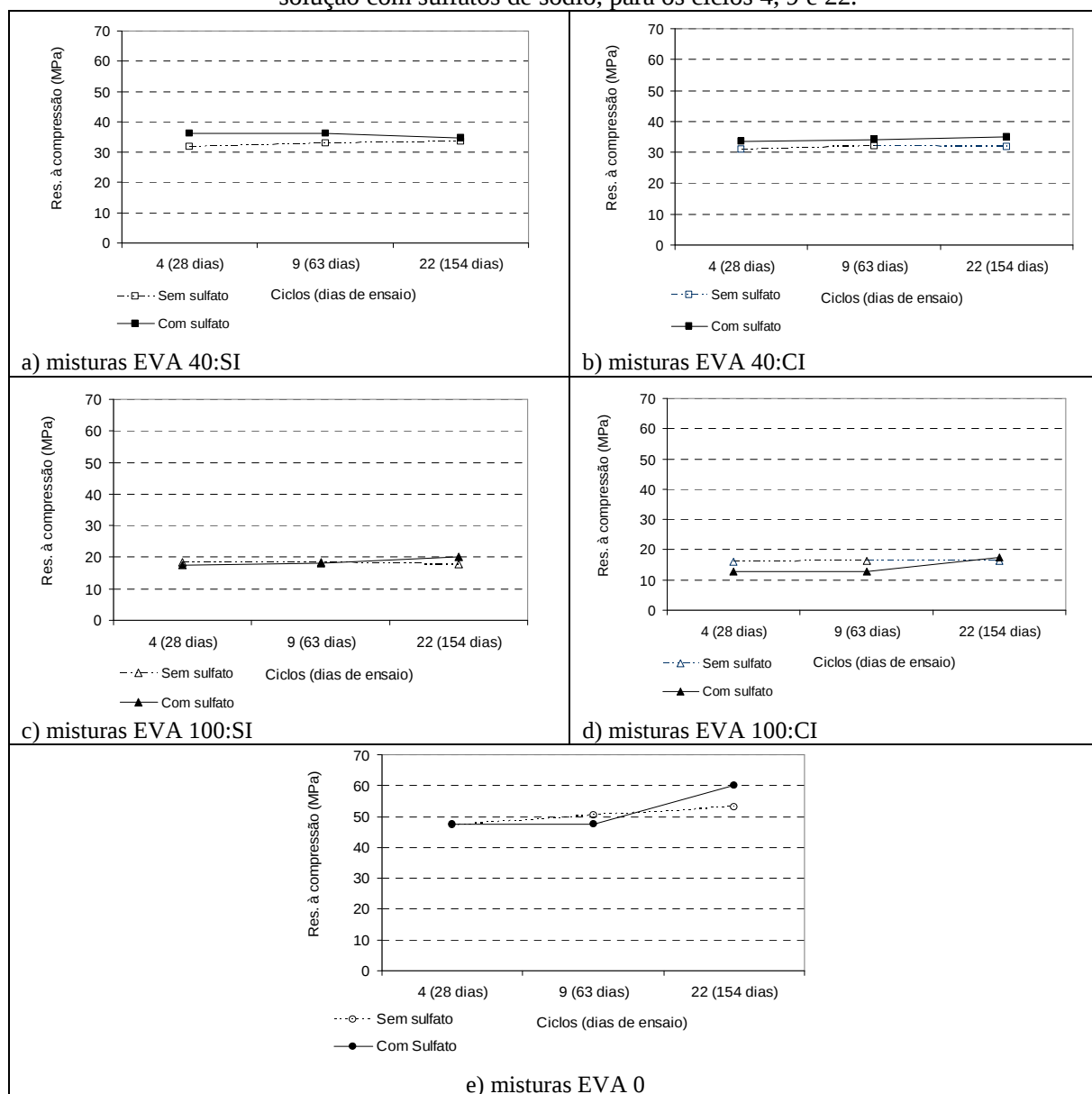
Houve um transporte de cloreto mais aprofundado e maior concentração de cloretos totais no topo dos corpos-de-prova do que nas camadas da base, pois, naquela região, o procedimento de adensamento ficou mais permeável na pasta, pelas condições do vibração.

Conclui-se que, para as concentrações de ataque analisadas nesta pesquisa, a ação dos cloretos na posição das armaduras (recobrimento de aproximadamente 25mm) terão variações próximas de intensidade entre os concretos com uso de EVA e com uso de agregados naturais para as mesmas condições de moldagem. Entretanto, poderão ocorrer diferenças significativas caso aumente a intensidade do ataque ou caso se prolongue o tempo do ensaio.

• **Quanto à ação dos sulfatos de sódio:**

Concretos com traços iguais, ao comparar amostras submetidas ou não a ataques com sulfato de sódio, obtiveram resistências à compressão semelhantes (Figura 6.15).

Figura 6.15 – Relação entre as resistências à compressão axial das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, para os ciclos 4, 9 e 22.

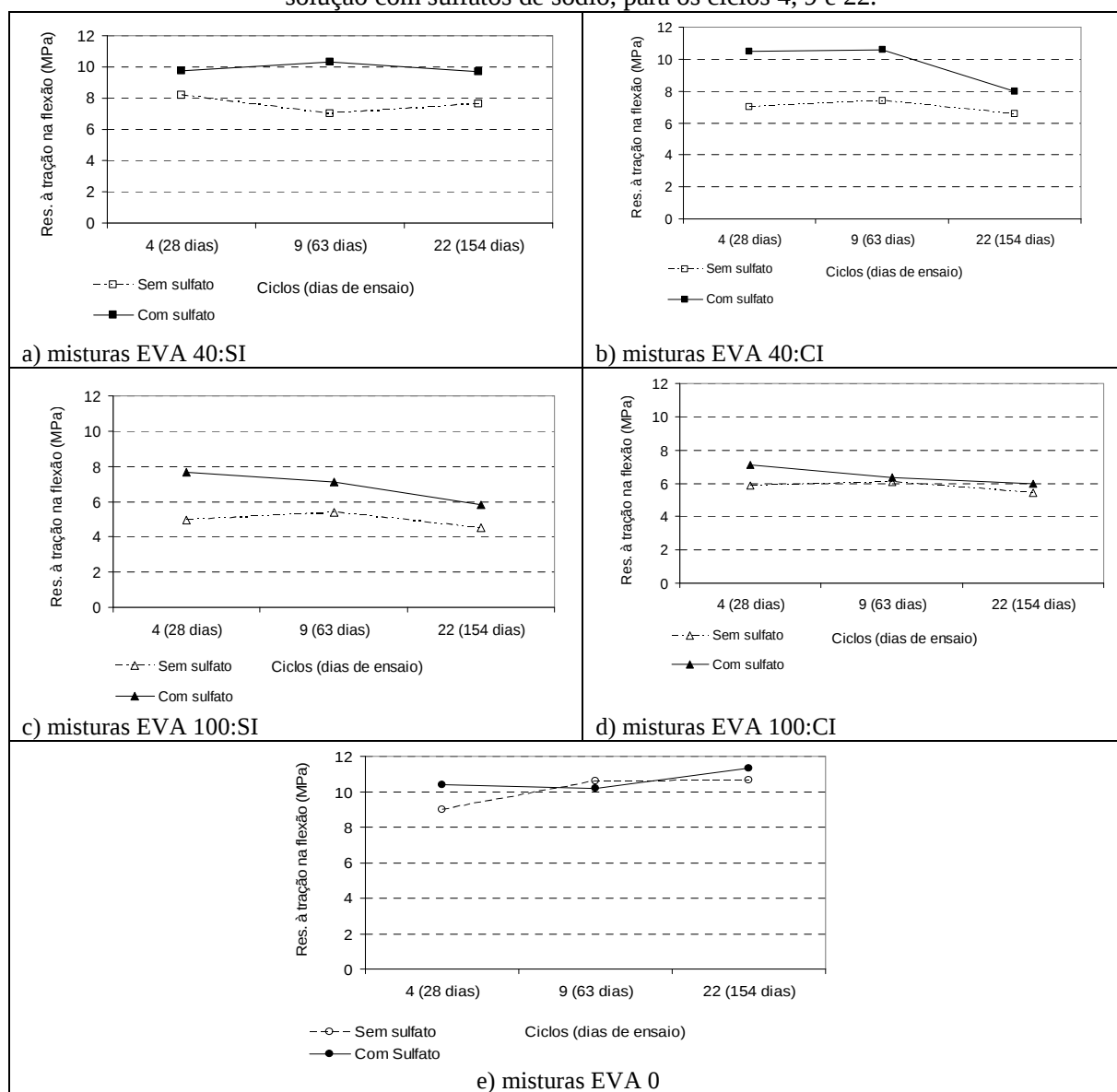


Os concretos que utilizaram agregados de EVA sofreram maior expansão e de forma mais precipitada. Surgiram dois estágios de expansão, a primeira mais lenta e a última mais acelerada, sendo que, nos concretos com maior presença de EVA, o estágio acelerado ocorre de forma mais antecipado.

Entretanto, essas expansões não causam deterioração nem perda de massas nos concretos e não surtiram efeitos no valor de suas resistências. Ocorre que as pastas dos concretos possuem comportamentos de permeabilidade similares, e assim, a intensidade do ataque foi a mesma entre os compósitos.

Os valores das resistências à tração na flexão estão apresentados na Figura 6.16.

Figura 6.16 – Relação entre as resistências à tração na flexão das amostras imersas e não imersas em solução com sulfatos de sódio, para os ciclos 4, 9 e 22.



Na resistência à tração na flexão é que a presença do EVA nos teores mais elevados de incorporação provoca um decréscimo nas resistências dos concretos. Tal situação se deu devido às resistências à tração dos concretos serem bastante sensíveis à presença dos sulfatos, e por terem sido acumulados mais sulfatos nos concretos com teores de EVA mais elevados, esses são atacados mais rapidamente.

Nos concretos que ficaram fora da solução de sulfato, o valor da resistência manteve-se constante. Entretanto, ao aplicar o ataque, tem-se, nas amostras com EVA, com exceção da amostra EVA40SI, um decréscimo mais acentuado da resistência para os valores do 22º ciclo. Os valores das resistências nas amostras com sulfato continuam sendo mais elevados ou iguais em relação às condições sem sulfato, porém as curvas dessas amostras com sulfato decrescem consideravelmente em relação à leitura anterior.

Esse comportamento é indício de que essas amostras com EVA podem estar começando a sentir os efeitos do ataque.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos capítulos anteriores, foram apresentadas as respectivas conclusões obtidas para cada etapa realizada. Assim, esse capítulo consta de uma síntese das conclusões obtidas nesta tese, ressaltando os temas mais relevantes na busca de se cumprir os objetivos propostos:

7.1 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica da utilização do agregado de resíduo de EVA da indústria de calçados nos concretos de cimento Portland de consistência plástica, sendo avaliadas além das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, as possíveis influências na durabilidade desses novos concretos.

Para a formação dos traços dos concretos, foi adotada uma metodologia de ajustes granulométricos entre os componentes da mistura compostas por Cimento Portland tipo CP V-ARI, e os agregados sendo duas areias com granulometrias distintas (areia fina $D_{máx}=2,4\text{mm}$ e areia grossa $D_{máx}=4,8\text{mm}$), brita ($D_{máx}=9,5\text{mm}$) e o agregado de EVA ($D_{máx}=9,5\text{mm}$).

Para a obtenção do agregado reciclado de EVA, é preciso apenas um simples processo de trituração do resíduo para aquisição do formato e granulometria desejada ao agregado.

O agregado de EVA possui baixa densidade e grande absorção de água. O efeito de absorver água fez com que a maioria das pesquisas adotasse a prática de se fazer uma imersão em água do agregado antes de usá-lo na mistura. Tal medida era justificada para evitar que a absorção da água da mistura pelo agregado acabasse reduzindo a quantidade dessa água para níveis muito baixos e pudesse prejudicar a hidratação das partículas de cimento. Isso poderia provocar vazios na zona de transição matriz-agregado. Porém, ao se utilizar agregado de EVA previamente saturado, a água poderia promover uma cura interna no concreto, como ocorre com outros tipos de agregados leves. Apesar de ser adotado por muitas pesquisas, não há, na literatura, uma comprovação da ocorrência desse fenômeno quando se utiliza agregado de EVA.

Com os estudos desenvolvidos por este trabalho, pôde-se perceber que, na zona de transição pasta-agregado de EVA com imersão prévia em água, surgiu maior quantidade de poros devido à exsudação interna da água do EVA que se fez acumular nesta região,

consequentemente, provocando maior porosidade da pasta, se comparada à pasta de EVA sem imersão prévia em água. Aliada a isso, há ainda a vedação dos poros dos grãos de EVA pela água, o que provocou a redução da capacidade de aderência do resíduo, intensificando a ocorrência do efeito parede. Tais efeitos contribuíram para o enfraquecimento da interface pasta-agregado, quando comparado com uso de EVA sem imersão prévia em água. Portanto, torna-se desaconselhável a imersão previa em água dos agregados de EVA.

O uso do agregado de EVA, conforme seu teor de substituição provoca alterações nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, sendo:

- no estado fresco, a incorporação do EVA garante uma mistura com melhor trabalhabilidade, pois, devido a sua textura esponjosa e porosa, há um aumento do ar incorporado naturalmente, promovendo, assim, uma maior facilidade de deslizamento da mistura e melhor trabalhabilidade.
- no estado endurecido, os principais efeitos são redução da massa específica, das resistências e do módulo estático de elasticidade à compressão. Há uma correlação inversa entre teores de EVA e valores das resistências. Porém, a queda da resistência do concreto com a incorporação do EVA pode ter incrementações de valores diferenciados, conforme os arranjos entre as partículas dos elementos que compõem o compósito, ou seja, conforme as combinações das proporções dos agregados naturais com os agregados de EVA. E são indiferentes os resultados das resistências mecânicas para os mesmos concretos, quando se utilizam agregados de EVA sem ou com imersão prévia em água.

Entre os vários traços analisados nesta pesquisa, estão sendo propostos dois traços distintos, os quais apresentaram as melhores distribuições granulométricas entre seus elementos, com boa compacidade para misturas de consistência plástica. Sendo os seguintes teores de EVA (teores em volume, em relação a todos os agregados) obtidos para uso em concretos para fim estrutural e para fim não estrutural:

- Teor de até 18% de EVA – para concreto estrutural de 30MPa;
- Teor de até 44% de EVA – para concreto não estrutural de 15MPa.

Com esses teores, considerando os materiais aqui utilizados são propostos os traços 1:0,7:0,58:0,41:0,61 (cim: AF: AG:EVA:B0, a/c=0,49-em volume) e 1:0,7:0,58:1,02 (cim: AF: AG:EVA, a/c=0,49-em volume), respectivamente.

Essas proporções garantiram, entre os concretos que utilizaram agregados de EVA, um ganho de desempenho, com aumento do fator de eficiência, comparado a outros traços similares com EVA apresentados na literatura. Isso devido à presença de uma areia de granulometria fina, que, nas proporções ideais com os demais agregados, proporciona bom empacotamento entre eles.

Quanto à influência do uso do agregado de EVA na microestrutura da pasta, foi mantida a formação dos compostos constituídos da pasta de cimento hidratada, indicando que não houve reação significativa do polímero com o aglomerante, o que caracteriza de fato o EVA como um agregado. Nas misturas com uso de EVA com imersão prévia em água, foi constatada uma maior formação de hidróxido de cálcio, devido ao acúmulo de água na zona de transição ter proporcionado maior porosidade e, assim, mais facilidade de formação de grandes cristais hidróxido de cálcio.

Quanto à influência do uso do agregado de EVA na durabilidade dos concretos (ataque por cloretos de sódio e sulfatos de sódio), têm-se as seguintes conclusões:

1. apesar de ser um agregado poroso, os vazios internos presentes nos grãos do EVA não interferem no transporte de cloretos, pois o agregado de EVA mantém a fase reticulada característica do material polimérico original, com a estrutura composta por células do tipo fechada;
2. a presença do agregado de EVA, quando utilizado sem o procedimento de imersão prévia em água, não interferiu nos valores do transporte de cloretos se comparado ao concreto sem o uso de EVA. No entanto, quando se utiliza agregado de EVA com imersão prévia em água, há uma maior porosidade na pasta próxima ao grão de EVA, e isso facilita a acumulação de cristais de sal nessa região e faz aumentar a porcentagem de cloretos totais presentes. Ou seja, a maior presença de cristais de cloretos ocorre nas misturas com uso de agregados de EVA imersos previamente em água, que interfere na porosidade da pasta;
3. há uma variação nos perfis de cloretos nas superfícies atingidas das amostras, que são diferentes no topo e na base dos corpos-de-prova, influenciada pelas condições diferenciadas de adensamento entre essas duas posições;

4. quanto à influência em relação ao ataque por sulfato, a presença do EVA provoca uma maior expansão e de forma mais acelerada, à medida que se aumenta o teor de EVA incorporado. No entanto, não foram observadas deteriorações, perda de massas e quedas de resistências à compressão significativas nos concretos com a presença do EVA, após as amostras serem atacadas por sulfatos.
5. nos concretos com teor de 44% de EVA (em volume, em relação ao total de agregados), após serem atacados por sulfatos, houve uma maior tendência de diminuição da resistência à tração na flexão, comparado aos concretos com menores teores de EVA.

Entre os esforços solicitados, a resistência à tração dos concretos é a mais sensível ao ataque por sulfatos. Assim, com base nessa análise, o uso de concreto com agregado de EVA deve ser evitado em aplicações propícias ao contato com sulfatos de sódio, por exemplo, em caso de contato com solo ou águas dos lençóis freáticos contaminados, ou em contato com água do mar.

Enfim, com os resultados obtidos, pode-se concluir que o uso do resíduo de EVA como agregado leve em concretos de consistência plástica apresenta-se como uma alternativa viável; ao mesmo tempo, pode contribuir com benefícios econômicos e ambientais, ao evitar gastos e riscos de contaminação com a deposição do resíduo no meio ambiente, podendo também se tornar algo interessante para a indústria da construção civil nas microrregiões fabricantes de calçados, ao aproveitar a facilidade e a grande produção do resíduo a ser utilizado como agregado em concretos para os diversos fins, não estruturais e/ou estruturais até limite de 30MPa.

De modo geral, esses concretos podem apresentar condições de durabilidade semelhantes aos concretos convencionais face às ações ambientais agressivas, em especial, quando há proporções ideais entre os elementos da mistura que garantam melhor arranjo entre si. Entretanto, deve-se ter ressalva com seu uso em condições severas de presença de sulfatos.

Espera-se que este trabalho tenha contribuído para o avanço dos estudos sobre a utilização do resíduo de EVA como agregado leve. As conclusões elaboradas nesse estudo ampliam os potenciais de aplicação do material, porém, por se tratar de um material alternativo, sem normas específicas e de abordagem relativamente recente, necessita-se ainda realizar outros experimentos com maiores aprofundamentos, que possam complementar os estudos sobre esse tema. Sendo assim, a seguir, serão apresentadas algumas propostas para pesquisas futuras.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ataque por carbonatação e as possíveis influências na durabilidade dos concretos com EVA;
- avaliação dos gases expelidos de concretos com EVA numa situação de incêndio e seus efeitos na saúde humana;
- avaliação do uso de EVA em pó, em várias idades de hidratação do cimento, para verificar a sua influência na formação do hidróxido de cálcio;
- avaliação da aplicação de concreto com EVA numa estrutura em condições reais (protótipo) em peças de viga, laje e pilar.
- viabilidade econômica do uso do agregado de EVA, quanto à produção do concreto e da aplicação na estrutura, pelo alívio de cargas, devido à redução de seu peso próprio;
- compatibilidade dos agregado de EVA com outros materiais alternativos, como metacaulim;
- avaliação da utilização em argamassas de revestimento (paredes, forros e contra-piso); em painéis não-estruturais em concreto; em estruturas pré-moldadas.;
- avaliação da estabilidade dimensional do compósito.

REFERÊNCIAS

- ACI 213R-87. **Guide for structural lightweight aggregate concrete.** ACI Manual of Concrete Practice, part 2: Construct The Institution of Structural Engineers and the concrete Society, Guide: Structural Use of Lightweight Aggregate Concrete, p. 58 London, oct. 1987
- AL-AMOUDI, O. S. B.; MASLEHUDDIN, M.; ABDUL-AL, Y. A. B. Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments. **Construction and Building Materials**, v.9, p. 25-33. 1995.
- ALENCAR, A. E. V. de. **Avaliação do uso de polímero EVA, resíduo da indústria de calçados (EVAR) e aditivos no desempenho reológico de ligante asfáltico de petróleo.** 2009. 158p. Tese (Doutorado em química orgânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** ASTM C1202. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.
- _____. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.** ASTM C 114. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1994.
- _____. **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.** ASTM C 1012. In: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2004.
- _____. **Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.** ASTM C 1152. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1994.
- _____. **Standard test method for potential expansion of Portland-cement mortars exposed to sulfate.** ASTM C 452. In: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABICALÇADOS) **Resenha Estatística 2012.** Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br>> acesso em out/2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS (ABIPLAST). **Perfil 2012 Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico.** Novo Hamburgo, 2013. Disponível em: <<http://www.abicalcados.com.br>> acesso em out/2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** NBR NM 45. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

____. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003.

____. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

____. **Cimento Portland de alta resistência inicial.** NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.

____. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

____. **Rochas e solos.** NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995.

____. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

____. **Poliestireno expandido para isolamento térmica - Determinação de absorção de água.** NBR 7973. Rio de Janeiro, 1983.

____. **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação.** NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

____. **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** NBR 8953. Rio de Janeiro, 2009.

____. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

____. **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** NBR 9833. Rio de Janeiro, 2008.

____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005.

____. **Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.** NBR 13583. Rio de Janeiro, 1996.

BEZERRA, A. J. V. **Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA – Etileno Acetato de Vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural.** 2002. 115p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002.

BONAKDAR, A.; MOBASHER, B. Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials. **Construction and Building Materials**, v.24, p. 61-70. 2010.

BRETANHA, A. M. **Resistência à sulfatos de concretos contendo diferentes tipos de cimento e adição de CCA.** 2000. 150p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BROWN, P. W. An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment. **Cement and Concrete Research**. v. 11, p. 719-727, 1981.

BROWN, P. W. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**. v. 24, p. 301-303, 2002.

CALLISTER JR., W. D., **Materials science and engineering: an introduction**. 7^a ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CAMERINI, N. L. **Análise de variáveis ambientais em modelos reduzidos de instalações agropecuárias com forro de resíduo de EVA**. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CARDELLO, M. A. **Diretrizes na reticulação e expansão do EVA no processo de injeção direta**. [Matéria Técnica]: Borracha Atual. Disponível em: <http://www.borrachaatual.com.br>. Acesso em: 02 mar. 2012.

CHÁVEZ, M. A. **Influência do carbonato de cálcio nas propriedades físicas da espuma de EVA**. 2007. 109p. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

COLLEPARDI, M. A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete, **Cement and Concrete Composites**. v. 25, p.401-407, 2003.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 225p. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CTCCA - Centro Tecnológico do Couro Calçados e Afins. **Cartilha do EVA**, Novo Hamburgo, 2002.

FERRARIS, C. F.; CLIFTON, J. F.; STUTZMAN, P. E.; GARBOCZI, E. J. Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack. In: L. L. SCRIVENER; J. F. YOUNG (Ed.). **Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems**. London: F & FN Spon, 1997. p. 185-192.

FIGUEIREDO, E. J. P. Ação dos cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap 25. v.1, p. 887-902.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 26, v.1, p. 903-931.

GARCÍA-MORALES, M.; PARTAL, P.; NAVARRO, F.J.; MARTÍNEZ-BOZA, F.; GALLEGOS, C. Linear viscoelasticity of recycled EVA modified bitumens. **Energy and Fuels**, v.18, p.357-364, 2004.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. 1998. 146p. Dissertação (Mestrado em

engenharia civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

GONZÁLEZ, M. A.; IRASSAR, E. F. Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low C₃A Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n.11, p. 1655-1667, 1998.

GONZÁLEZ, O.; MUÑOZ, M. E.; SANTAMARÍA, A.; GARCÍA-MORALES, M.; NAVARRO, F. J.; PARTAL, P. Rheology and stability of bitumen/EVA blends. **European Polymer Journal**, v. 40, p.2365-2372, 2004.

ESTEARATO de Zinco. **Haisun**. Disponível em: <http://www.tianyichemical.com.pt/2-zinc-strarate.html>. Acesso em: 17 mar. 2012.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOLM, T. A., BREMNER, T. W. **State of the art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments**. US Army Corps of Engineers – Engineer Research and Development Center: ERDC/SL, 2000, 116p.

HSU, C. F.; CHOU, R. L.; WHELCHE, W. C.; OU, Y. T. **Crosslinked foam of ethylene vinyl acetate copolymer and acid copolymer**. U.S. Patent 6 797 737, 2004.

HULL, T. R.; PRICE, D.; LIU, Y.; WILLS, C. L.; BRADY, J. - **Polymer Degradation and Stability**, 82, p.365-371, 2003 apud ZATTERA, A.J.; BIANCHI, O.; ZENI, M.; FERREIRA, C.A. Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila – EVA. São Carlos, 2005.

IRASSAR, E. F. Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength. **Cement and Concrete Research**. v. 20, p. 209-218, 1990.

JIN J.; CHEN, S.; ZHANG, J. UV aging behaviour of ethylene-vinyl acetate copolymers (EVA) with different vinyl acetate contents. **Polymer Degradation and Stability**. v. 95, p. 725-732, 2010.

KAYYALI, O. A. Porosity and compressive strength of cement paste in sulphate solution. **Cement and Concrete Research**. v. 19, p. 423-433, 1989.

KARL, S. Shrinkage and creep of very lightweight concrete. **Darmstadt Concrete**. n.4, p.97-105, 1989 (apud Neville, 1997).

KJELSEN, K.O., WALLEVIK, O.H., FJÄLLBERG, L. Microstructure and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high performance concrete. **Advances in Cement Research**, v.10, n.1, pp.33-40, 1998.

KLEMPNER, D.; FRISCH, K. C. (Editors). **Handbook of polymeric foams and foam technology**. Câncer, Munic.: Gardner Publications. 1997. 456p.

LACHOWSKI, E.E., MOHAN, K., TAYLOR, H.F.W. Analytical electron microscopy of cement pastes: II, pastes of Portland cements and clinkers. **Journal of American Ceramic Society**, v.63, n.6-7, pp.447-452, 1980.

LEAL, A. F. **Utilização de resíduos das indústrias de cerâmicas e de calçados na elaboração de materiais e produtos à base de cimento portland reforçados com fibras de sisal visando à produção de componentes habitacionais**. 2004. 128p. Tese (Doutorado em engenharia de processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270p. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA FILHO, M.R.F. **Avaliação do desempenho mecânico de protótipo executado com blocos EVA: estudo de impactos horizontais em alvenarias e suas interações com outros elementos da construção**. 2008. 143p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B.; SANTIAGO, E. Q. R. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. **Elsevier**, v.30, p.1107-1113, 2010.

LYRA, M. L de. **Blocos intertravados de concreto com resíduos de copolímero de etileno-acetato de vinila – EVA – para pavimentação de calçadas e passeios públicos**. 2007. 118p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

LO, T. Y., CUI, H. Z. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete. **Materials Letters**, n.58, pp.916-919, 2004.

LO, T. Y., GAO, X. F., JEARY, A. P. Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. **Building and Environment**, n.34, pp.759-764, 1999.

MANSUR, A. A. P. **Mecanismos Físico-Químicos de Aderência na Interface Argamassa Modificada com Polímeros/Cerâmica de Revestimento**. 2007. 355p. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, BH, 2007.

MARCILLA, A.; GÓMEZ-SIURANA, A.; MENARGUES, S. Qualitative study of the evolution of the composition of the gas evolved in the thermal and HY-catalytic oxidative degradation of EVA copolymers. **Thermochimica Acta**. p.155-163, 2005.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com a proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 218p. Tese (Doutorado em engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674p.

MELO, A. B. de; ROCHA, F. M. D., ROSA, D. C. D., SILVA, H. V., LIMA FILHO, M. R. F. Otimização da moldagem de blocos leves de vedação com aproveitamento de resíduos da

indústria de calçados. In: **Conferência Brasileira sobre Materiais e Tecnologias não-convencionais na Construção Ecológica e Sustentável**. BRASIL NOCMAT 2006 – Salvador, 2006.

MONTAGNOLI, R.M.; PRESTES, S.M.D.; MANCINI, S.D. **Resíduos industriais: quem pagará a conta?** Jornal Cruzeiro do Sul, 01/06/2010. Disponível em: <http://www.cruzeirosul.inf.br/materia.php?editoria=44&id=301282>. Acesso em: 04 jun. 2010.

MONTAGNOLI, R.M.; PRESTES, S.M.D.; MANCINI, S.D.; JÚNIOR, A.R. Análise termogravimétrica de resíduos de EVA provenientes da indústria calçadista visando a reciclagem química. In: SIMPÓSIO DOS PÓS GRADUANDOS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNESP, 1, 2010, Sorocaba. **Anais...** Sorocaba: UNESP, 2010. p. 5-9.

MOUKWA, M. Characteristics of the attack of cement paste by MgSO_4 and MgCl_2 from the pore structure measurements. **Cement and Concrete Research**. v. 20. p.148-158, 1990.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 207p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MURPHY, M.; O'MAHONY, M.; LYCETT, C.; JAMIESON, I. Bitumens modified with recycled polymers, **Materials and Structures**. v. 33, n. 7, p.438-444, 2000.

NEVILLE, A. M. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p.1275–1296, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997. Trad. Salvador E. Giamusso.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S.; **Advanced Concrete Technology - Processes**. Ed. Butterworth Heinemann - Elsevier. 2003.

OLIVEIRA, M. P. **Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (etileno acetato de vinila) e vermiculita**: otimização de misturas e propriedades termomecânicas. 2009. 197p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

OSBORNE, G. L. The effect of a carbonated outer layer to concrete in the prevention of sulphate attack. In: **International Conference Protection of Concrete**. 1990. UK. Proceedings...University of Dundee, 1990, p.75-91.

PEREIRA, L. F. L. C.; CINCOTTO, M. A. Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo: EPUSP, n. 294, 19p., 2001.

PIMENTEL, U. H. O. **Utilização de resíduos da indústria de calçados em blocos de vedação com novas geometrias – Bloco EVANG**. 2005. 139p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

POLARI FILHO, R.S. **Contribuição ao processo de reciclagem dos resíduos da indústria de calçados na construção civil: Bloco EVA – uma alternativa às alvenarias das construções.** 2005. 89p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

ROCHA, F. M. D. **Aproveitamento de resíduos sólidos industriais em materiais alternativos na perspectiva da construção seca: bloco EVA – intertravamento e racionalização das alvenarias.** 2008. 107p. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** 2003. 211p. Tese (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 42, v.2, p. 1531-1568.

SAHMARAN, M.; COHEN, M. D.; OLECK, J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look. Part 1: Summary of experimental results. **Cement and Concrete Research.** v. 32. p.915-921, 2002.

SAHMARAN, M.; KASAP, K.; DURU, K.; YAMAN, I. O. Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. **Cement and Concrete Composites.** v. 29. p.159-167, 2007.

SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves.** 2008. 168p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia civil e ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

SAOULA, S.; AIT MOKHTAR K.; HADDADI, S.; GHORBEL, E. Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste. **Physics Procedia** 2, v. 2, p. 1319-1326, 2009.

SARKAR, S.L.; CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites,** v.14, p.239-248, 1992,.

SCHMIDT, T., LOTHENBACH, B.; ROMER, M.; NEUENSCHWANDER, J. SCRIVENER, K. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements, **Cement and Concrete Research,** v.39 p.1111-1121, 2009.

SHORT, A.; KINNIBURG, W. **Concreto leveiro.** São Paulo: Editora Limusa, 1978.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland.** 2001. 263p. Tese (Doutorado em engenharia de materiais) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SILVA JUNIOR, F. P. da. **Avaliação da capacidade de absorção acústica de compósitos fabricados com resíduos de eva.** 2007. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação (Mestrado em engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996. 139p.

SOARES, M. K. Políticas Públicas para Resíduos Industriais. In.: Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – Outubro/2007. (apud Santiago, 2008).

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado.** 2006. 139 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SPITZNER, J. **High-Strength LWA Concrete.** High-Strength Concrcte. Rilem, Cap. II – Aggregates, 1994.

SPRATT, B. H. An introduction to lightweight concrete. **Cement and Concrete Association.** London, 1960 (apud Garlet, 1998).

STAEL, G. C.; ROCHA, M. C. G.; MENEZES, S. M. C. de; D'ALMEIDA, J. R. M.; RUIZ, N. M. S. ULLIVAN, P. J. E. Analysis of the mechanical properties and characterization by solid state C NMR of recycled EVA copolymer/silica composites. **Materials Research.** v. 8, n.3, p. 269-273, 2005.

SWAMY, R. N., LAMBERT, G. H. The microstructures of Lytag aggregate, **Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v4, n.3, p.273-281, 1981.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997, 475p.

TAYLOR, H.F.W, NEWBURY, D.E., An electron microprobe study of a mature cement paste, **Cement and Concrete Research**, v.14, n.4, 1984, p.565-573, 1984.

VEDOY, D. R. L. **Compostos de EVA modificados com resinas hidrocarbônicas.** 2006. 92p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VEIGA, K. K.; GASTALDINI, A. L. G. Sulfate attack on a white Portland cement with activated slag, **Construction and Building Materials.** v.34, p.494-503, 2012.

VIEIRA, M. G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves: durabilidade e microestrutura.** 2000. 199p. Dissertação (Mestrado em construção) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

WASSERMAN, R., BENTUR, A., Interfacial interactions in lightweight aggregate concrete and their influence on the concrete strength, **Cement and Concrete Composites.** v.18, p.67-76, 1996.

YOUSEFI, A. A.; AIT-KADI, A.; ROY, C. Composite asphalt binders; addition of toughened recycled polyethylene's into asphalt, **Journal of Materials in Civil Eng.** v. 12, p.113-123, 2000.

ZATTERA, A.J.; BIANCHI, O.; ZENI, M.; FERREIRA, C.A. Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila – EVA. **Polímeros: Ciências e Tecnologia**, São Carlos, v. 15, n.1, p.73-78, 2005.

ZHANG, M. H., GJORV, O.E., Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete, **ACI Materials Journal**, v.88, n.3, p.240-247, mai 1991a.

ZHANG, M. H., GJORV, O.E., Mechanical properties of high strength lightweight concrete, **ACI Materials Journal**, v.88, n.3, p.150-158, mai 1991b.

APÊNDICE A - Ensaios no Estado Fresco

A.1 Experimentos Estatísticos dos Resultados das Densidades

Tabela A1.1 – Análise de variância para densidade do concreto no estado fresco aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%). Etapa II

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	19401.04348	19401.04348	35.1506	**
Fator2(F2)	1	2530506.13043	2530506.13043	4584.7427	**
Int. F1xF2	1	11801.78261	11801.78261	21.3823	**
Tratamentos	3	2561708.95652	853902.98551	1547.0919	**
Resíduo	88	48570.78261	551.94071		
Total	91	2610279.73913			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão previa em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1		Médias do fator 2	
Sem	1987.78300 a	18% (EVA40)	2139.10900 a
Com	1958.73900 b	44% (EVA100)	1807.41300 b
dms =	9.73675	dms =	9.73675

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	2142.3040 aA	1833.2610 aB	
Com	2135.9130 aA	1781.5650 bB	

dms para colunas = 13.7699 dms para linhas = 13.7699

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

A.2 Experimentos Estatísticos dos Resultados do Ar incorporado

Tabela A2.1 – Análise de variância para o ar incorporado naturalmente no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%). Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	8.20086	8.20086	19.1376	**
Fator2(F2)	1	460.43372	460.43372	1074.4740	**
Int. F1xF2	1	2.19446	2.19446	5.1210	*
Fat x Testemun	1	304.43407	304.43407	710.4313	**
Tratamentos	4	775.26311	193.81578	452.2910	**
Resíduo	110	47.13721	0.42852		
Total	114	822.40032			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão prévia em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS			
Médias do fator 1		Médias do fator 2	
Sem	4.26903 b	18% (EVA40)	2.33047 b
Com	4.86616 a	44% (EVA100)	6.80472 a
dms =	0.27051	dms =	0.27051

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2		
Fator 1	Fator 2	
	18% (EVA40)	44% (EVA100)
Sem	2.1864 aB	6.3517 bA
Com	2.4746 aB	7.2577 aA

dms para colunas = 0.3826 dms para linhas = 0.3826

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

APÊNDICE B - Ensaios no Estado Endurecido

B.1 Experimentos Estatísticos dos Resultados das Resistências

Tabela B1.1 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 70+(30) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	775.59962	155.11992	84.0020	**
Resíduo	18	33.23918	1.84662		
Total	23	808.83880			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS				DADOS			
Médias de tratamento							
1	41.06750	a		40.47	42.90	42.00	38.90
2	38.92500	a		40.60	39.50	36.50	39.10
3	35.68000	b		36.82	33.00	37.00	35.90
4	30.97500	c		30.50	32.00	30.50	30.90
5	28.95000	c		28.50	29.00	30.10	28.20
6	24.81500	d		25.00	24.10	24.66	25.50
dms = 3.05074							

Tabela B1.2 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 60+(40) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	1074.05645	214.81129	122.7813	**
Resíduo	18	31.49180	1.74954		
Total	23	1105.54825			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS				DADOS			
Médias de tratamento							
1	41.46250	a		43.80	40.50	39.55	42.00
2	34.77250	b		36.11	33.00	33.98	36.00
3	30.07500	c		30.70	28.60	30.90	30.10
4	27.20000	cd		28.40	25.80	25.70	28.90
5	24.78250	d		25.56	24.50	24.67	24.40
6	21.09250	e		21.77	20.20	20.90	21.50
dms = 2.96947							

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Tabela B1.3 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 50+(50) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	1206.38649	241.27730	110.0506	**
Resíduo	18	39.46358	2.19242		
Total	23	1245.85006			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	38.32500	a
2	31.50000	b
3	24.84500	c
4	22.59000	cd
5	21.37500	d
6	16.77250	e

dms = 3.32413

DADOS

39.70	37.90	38.00	37.70
32.80	31.00	33.30	28.90
26.08	24.70	27.00	21.60
22.86	21.00	23.40	23.10
21.10	22.00	22.40	20.00
17.59	16.90	16.00	16.60

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Tabela B1.4 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 40+(60) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	1340.42347	268.08469	144.7150	**
Resíduo	18	33.34503	1.85250		
Total	23	1373.76850			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	39.11750	a
2	31.27250	b
3	30.35000	b
4	25.16500	c
5	20.21500	d
6	16.53750	e

dms = 3.05559

DADOS

40.47	38.00	38.90	39.10
32.89	29.90	31.80	30.50
30.40	27.90	32.00	31.10
23.96	24.60	26.10	26.00
19.36	18.00	21.00	22.50
16.85	17.00	16.40	15.90

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Tabela B1.5 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 30+(70) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	2043.51519	408.70304	235.2859	**
Resíduo	18	31.26687	1.73705		
Total	23	2074.78206			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	40.97500	a				42.00	42.00	38.90	41.00
2	32.47000	b				35.78	31.00	31.00	32.10
3	21.97250	c				20.69	21.70	22.50	23.00
4	20.80000	c				22.00	21.00	19.20	21.00
5	16.91500	d				17.16	16.00	16.70	17.80
6	14.58000	d				15.02	14.00	14.50	14.80

dms = 2.95885

DADOS

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Tabela B1.6 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 28 dias aplicando a variável: Teores EVA. Mistura 20+(80) – Etapa I.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	5	2168.18895	433.63779	829.8361	**
Resíduo	18	9.40605	0.52256		
Total	23	2177.59500			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	39.06500	a				39.16	39.60	39.00	38.50
2	29.24000	b				30.56	29.00	28.50	28.90
3	23.42000	c				24.68	23.00	23.00	23.00
4	15.80000	d				15.20	17.00	16.10	14.90
5	13.97750	e				14.39	13.00	14.16	14.36
6	12.29750	f				12.19	12.60	12.00	12.40

dms = 1.62287

DADOS

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Tabela B1.7 – Análise de variância para a resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias) – Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	27.60223	27.60223	5.6674	*
Fator2(F2)	1	4228.21891	4228.21891	868.1538	**
Fator3(F3)	4	589.81093	147.45273	30.2755	**
Int. F1xF2	1	18.03154	18.03154	3.7023	ns
Int. F1xF3	4	4.10517	1.02629	0.2107	ns
Int. F2xF3	4	29.03801	7.25950	1.4905	ns
Int.F1x2x3	4	14.13066	3.53267	0.7253	ns
Tratamentos	19	4910.93746	258.47039	53.0701	**
Resíduo	60	292.22142	4.87036		
Total	79	5203.15888			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão previa em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%); Fator 3 = Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias).

MÉDIAS E MEDIDAS					
Médias do fator 1		Médias do fator 2		Médias do fator 3	
Sem	23.54110 a	18% (EVA40)	30.22370 a	07	17.66750 b
Com	22.36632 b	44% (EVA100)	15.68372 b	28	23.15098 a
				56	24.24567 a
				91	24.88754 a
				182	24.81688 a
dms =	0.98750	dms =	0.98750	dms =	2.19585

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2			
Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	30.3363 aA	16.7459 aB	
Com	30.1111 aA	14.6216 bB	
dms para colunas =	1.3965	dms para linhas =	1.3965
Classific.c/letras minúsculas		Classific.c/letras maiúsculas	

Fator 1 x Fator 3					
Fator 1	Fator 3				
	07	28	56	91	182
Sem	18.1888 aB	23.3263 aA	24.9812 aA	25.5856 aA	25.6238 aA
Com	17.1463 aB	22.9757 aA	23.5102 aA	24.1895 aA	24.0100 aA
dms para colunas = 2.2081 dms para linhas = 3.1054					
Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas					

Fator 2 x Fator 3					
Fator 2	Fator 3				
	07	28	56	91	182
18% (EVA40)	23.8513 aB	30.8638 aA	31.3202 aA	32.4208 aA	32.6625 aA
44% (EVA100)	11.4838 bB	15.4382 bA	17.1712 bA	17.3543 bA	16.9713 bA
dms para colunas = 2.2081 dms para linhas = 3.1054					
Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas					

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B1.8 – Análise de variância para o Fator de Eficiência da resistência à compressão do concreto, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com); Teores de EVA (18% e 44%) e Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias) – Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	7.10658	7.10658	5.6323	*
Fator2(F2)	1	619.03061	619.03061	490.6134	**
Fator3(F3)	4	174.16419	43.54105	34.5085	**
Int. F1xF2	1	5.31762	5.31762	4.2145	*
Int. F1xF3	4	0.99686	0.24922	0.1975	ns
Int. F2xF3	4	3.72061	0.93015	0.7372	ns
Int.F1x2x3	4	4.25369	1.06342	0.8428	ns
Tratamentos	19	814.59016	42.87317	33.9792	**
Resíduo	60	75.70490	1.26175		
Total	79	890.29506			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão prévia em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%); Fator 3 = Idade (7, 28, 56, 91, 182 dias).

MÉDIAS E MEDIDAS					
Médias do fator 1		Médias do fator 2		Médias do fator 3	
-----		-----		-----	
Sem	12.60834 a	18% (EVA40)	15.09200 a	07	9.44101 b
Com	12.01225 b	44% (EVA100)	9.52859 b	28	12.39627 a
-----		-----		-----	
dms =	0.50262	dms =	0.50262	56	13.03595 a
				91	13.36696 a
				182	13.31128 a

				dms =	1.11766

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2			

		Fator 2	

Fator 1		18% (EVA40)	44% (EVA100)

Sem		15.1322 aA	10.0845 aB
Com		15.0518 aA	8.9727 bB

dms para colunas =		0.7108	dms para linhas = 0.7108
Classific.c/letras minúsculas			Classific.c/letras maiúsculas

Fator 1 x Fator 3						

		Fator 3				

Fator 1		07	28	56	91	182

Sem		9.7539 aB	12.4768 aA	13.4068 aA	13.7070 aA	13.6972 aA
Com		9.1281 aB	12.3157 aA	12.6651 aA	13.0269 aA	12.9254 aA

dms para colunas =		1.1239		dms para linhas =		1.5806
Classific.c/letras minúsculas				Classific.c/letras maiúsculas		

Fator 2 x Fator 3						
		Fator 3				
Fator 2		07	28	56	91	182
18% (EVA40)		11.9104 aB	15.4119 aA	15.6394 aA	16.1889 aA	16.3094 aA
44% (EVA100)		6.9717 bB	9.3806 bA	10.4325 bA	10.5450 bA	10.3132 bA
dms para colunas =		1.1239	dms para linhas =		1.5806	
Classific.c/letras minúsculas			Classific.c/letras maiúsculas			

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B1.9 – Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%) – Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	0.06639	0.06639	0.8234	ns
Fator2(F2)	1	4.13389	4.13389	51.2671	**
Int. F1xF2	1	0.07468	0.07468	0.9262	ns
Fat x Testemun	1	4.14324	4.14324	51.3830	**
Tratamentos	4	8.41820	2.10455	26.0999	**
Resíduo	15	1.20952	0.08063		
Total	19	9.62772			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão prévia em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%);

MÉDIAS E MEDIDAS			
Médias do fator 1		Médias do fator 2	
Sem	2.02112 a	18% (EVA40)	2.59383 a
Com	2.14995 a	44% (EVA100)	1.57723 b
dms =	0.30219	dms =	0.30219

MÉDIAS DE INTERAÇÃO			
Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	2.5977 aA	1.4445 aB	
Com	2.5899 aA	1.7100 aB	
dms para colunas =	0.4274	dms para linhas =	0.4274
Classific.c/letras minúsculas		Classific.c/letras maiúsculas	

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B1.10 – Análise de variância do Fator de Eficiência para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%) – Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	0.03179	0.03179	1.2980	ns
Fator2(F2)	1	0.45051	0.45051	18.3915	**
Int. F1xF2	1	0.03262	0.03262	1.3317	ns
Fat x Testemun	1	0.39179	0.39179	15.9942	**
Tratamentos	4	0.90671	0.22668	9.2538	**
Resíduo	15	0.36743	0.02450		
Total	19	1.27415			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão previa em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%);

MÉDIAS E MEDIDAS			
Médias do fator 1		Médias do fator 2	
Sem	1.08284 a	18% (EVA40)	1.29522 a
Com	1.17199 a	44% (EVA100)	0.95961 b
dms =	0.16656	dms =	0.16656

MÉDIAS DE INTERAÇÃO			
Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	1.2958 aA	0.8699 aB	
Com	1.2946 aA	1.0493 aB	
dms para colunas =	0.2355	dms para linhas =	0.2355
Classific.c/letras minúsculas		Classific.c/letras maiúsculas	

B.2 Experimentos estatísticos dos resultados absorção de água por imersão

Tabela B2.1 – Análise de variância para a absorção de água por imersão no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%). Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	0.45332	0.45332	3.3291	ns
Fator2(F2)	1	5.32151	5.32151	39.0799	**
Int. F1xF2	1	0.54514	0.54514	4.0034	ns
Fat x Testemun	1	5.95501	5.95501	43.7322	**
Tratamentos	4	12.27498	3.06874	22.5362	**
Resíduo	15	2.04255	0.13617		
Total	19	14.31753			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão prévia em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS			
Médias do fator 1		Médias do fator 2	
Sem	7.57632 a	18% (EVA40)	7.16793 b
Com	7.91297 a	44% (EVA100)	8.32135 a
dms =	0.39270	dms =	0.39270

MÉDIAS DE INTERAÇÃO			
Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	7.1842 aB	7.9684 bA	
Com	7.1517 aB	8.6743 aA	

dms para colunas = 0.5554 dms para linhas = 0.5554

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

B.3 Experimentos estatísticos dos resultados do índice de vazios

Tabela B3.1 – Análise de variância para índice de vazios no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	0.54586	0.54586	1.2582	ns
Fator2(F2)	1	0.30330	0.30330	0.6991	ns
Int. F1xF2	1	1.15611	1.15611	2.6648	ns
Fat x Testemun	1	0.03206	0.03206	0.0739	ns
Tratamentos	4	2.03733	0.50933	1.1740	ns
Resíduo	15	6.50759	0.43384		
Total	19	8.54492			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão previa em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS					
Médias do fator 1			Médias do fator 2		
	1	13.63699 a		1	13.95938 a
	2	14.00640 a		2	13.68401 a
dms =	0.70095		dms =	0.70095	

MÉDIAS DE INTERAÇÃO					
Fator 1 x Fator 2					
		Fator 2			
Fator 1		18% (EVA40)		44% (EVA100)	
	Sem	14.0435 aA		13.2305 aA	
	Com	13.8753 aA		14.1375 aA	

dms para colunas = 0.9913 dms para linhas = 0.9913

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

B.4 Experimentos estatísticos dos resultados da massa específica

Tabela B4.1 – Análise de variância para massa específica seca no concreto aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%). Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE					
FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	1242.86214	1242.86214	7.0577	*
Fator2(F2)	1	511409.12908	511409.12908	2904.0727	**
Int. F1xF2	1	715.78989	715.78989	4.0647	ns
Fat x Testemun	1	410322.85573	410322.85573	2330.0472	**
Tratamentos	4	923690.63684	230922.65921	1311.3106	**
Resíduo	15	2641.50993	176.10066		
Total	19	926332.14677			

** significativo ao nível de 1% de significância ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de significância ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão prévia em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS			
Médias do fator 1		Médias do fator 2	
1	1832.65600 a	1	2002.62500 a
2	1815.02900 b	2	1645.06100 b
dms =	14.12219	dms =	14.12219

MÉDIAS DE INTERAÇÃO			
Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	2004.7500 aA	1660.5630 aB	
Com	2000.5000 aA	1629.5580 bB	

dms para colunas = 19.9718 dms para linhas = 19.9718

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

B.5 Experimentos estatísticos dos resultados do módulo de elasticidade

Tabela B5.1 – Análise de variância do Módulo de Elasticidade aplicando as variáveis estudadas: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) e Teores de EVA (18% e 44%).. Etapa II.

QUADRO DE ANÁLISE

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	0.70083	0.70083	0.0836	ns
Fator2(F2)	1	175.56750	175.56750	20.9541	**
Int. F1xF2	1	24.94083	24.94083	2.9767	ns
Fat x Testemun	1	643.53750	643.53750	76.8067	**
Tratamentos	4	844.74667	211.18667	25.2053	**
Resíduo	10	83.78667	8.37867		
Total	14	928.53333			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Tratamento imersão previa em água (sem e com) ; Fator 2 = Teores de EVA (18% e 44%).

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1		Médias do fator 2	
1	18.91667 a	1	22.98333 a
2	19.40000 a	2	15.33333 b
dms =	3.72239	dms =	3.72239

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2			
Fator 1	Fator 2		
	18% (EVA40)	44% (EVA100)	
Sem	21.3000 aA	16.5333 aA	
Com	24.6667 aA	14.1333 aB	

dms para colunas = 5.2643 dms para linhas = 5.2643

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

B.6 Experimentos Estatísticos dos Resultados do Ataque por Sulfatos

Tabela B6.1 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-0, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	10.97685	10.97685	0.9762	ns
Fator2(F2)	2	380.33007	190.16504	16.9110	**
Int. F1xF2	2	97.93937	48.96969	4.3548	*
Tratamentos	5	489.24629	97.84926	8.7016	**
Resíduo	18	202.41044	11.24502		
Total	23	691.65673			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	50.31964 a
2	51.67222 a

dms = 2.87505

Médias do fator 2

1	47.45238 b
2	48.97917 b
3	56.55625 a

dms = 4.27999

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	47.3714 aA	50.4250 aA	53.1625 bA
Com	47.5333 aB	47.5333 aB	59.9500 aA

dms para colunas = 4.9797 dms para linhas = 6.0528

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.2 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-40:SI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	52.08460	52.08460	6.4148	*
Fator2(F2)	2	1.71079	0.85540	0.1054	ns
Int. F1xF2	2	11.75884	5.87942	0.7241	ns
Tratamentos	5	65.55424	13.11085	1.6147	ns
Resíduo	18	146.15044	8.11947		
Total	23	211.70468			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	32.70056 b
2	35.64687 a

dms = 2.44304

Médias do fator 2

1	33.90321 a
2	34.53710 a
3	34.08083 a

dms = 3.63686

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	31.6664 bA	32.9003 aA	33.5350 aA
Com	36.1400 aA	36.1740 aA	34.6267 aA

dms para colunas = 4.2315 dms para linhas = 5.1433

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.3 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	42.76787	42.76787	9.5053	**
Fator2(F2)	2	4.54032	2.27016	0.5046	ns
Int. F1xF2	2	0.84154	0.42077	0.0935	ns
Tratamentos	5	48.14973	9.62995	2.1403	ns
Resíduo	18	80.98832	4.49935		
Total	23	129.13805			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com); Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	31.56845 b
2	34.23827 a

dms = 1.81862

Médias do fator 2

1	32.31437 a
2	33.04428 a
3	33.35143 a

dms = 2.70731

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	30.9739 aA	31.9414 aA	31.7900 aA
Com	33.6548 aA	34.1471 aA	34.9129 aA

dms para colunas = 3.1499 dms para linhas = 3.8287

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.4 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	1.02111	1.02111	1.0055	ns
Fator2(F2)	2	5.18557	2.59279	2.5531	ns
Int. F1xF2	2	12.80749	6.40375	6.3057	**
Tratamentos	5	19.01417	3.80283	3.7446	*
Resíduo	18	18.27998	1.01555		
Total	23	37.29415			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	18.09312 a
2	18.50565 a
dms =	0.86401

Médias do fator 2

1	17.84246 a
2	18.11856 a
3	18.93713 a
dms =	1.28622

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	18.2959 aA	18.2709 aA	17.7125 bA
Com	17.3890 aB	17.9662 aB	20.1618 aA

dms para colunas = 1.4965 dms para linhas = 1.8190

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.5 – Análise de variância para resistência à compressão axial no concreto EVA-100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	20.74698	20.74698	20.5446	**
Fator2(F2)	2	28.89496	14.44748	14.3065	**
Int. F1xF2	2	29.08598	14.54299	14.4011	**
Tratamentos	5	78.72792	15.74558	15.5920	**
Resíduo	18	18.17734	1.00985		
Total	23	96.90526			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	16.23799 a
2	14.37847 b

dms = 0.86158

Médias do fator 2

1	14.42043 b
2	14.64995 b
3	16.85431 a

dms = 1.28260

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	16.0464 aA	16.4376 aA	16.2300 aA
Com	12.7944 bB	12.8624 bB	17.4786 aA

dms para colunas = 1.4923 dms para linhas = 1.8139

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.6 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com) - Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	1	0.12287	0.12287	0.0214	ns
Resíduo	4	22.96167	5.74042		
Total	5	23.08453			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	34.62667 a
2	34.91287 a
dms =	5.43630

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.7 – Análise de variância para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com). - Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	1	10.79899	10.79899	3.2064	ns
Resíduo	4	13.47197	3.36799		
Total	5	24.27096			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	20.16177 a
2	17.47861 a
dms =	4.16407

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.8 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA-0, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	1.34595	1.34595	1.2448	ns
Fator2(F2)	2	4.71088	2.35544	2.1784	ns
Int. F1xF2	2	2.54976	1.27488	1.1790	ns
Tratamentos	5	8.60660	1.72132	1.5919	ns
Resíduo	12	12.97545	1.08129		
Total	17	21.58204			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	10.06624 a
2	10.61314 a

dms = 1.06758

Médias do fator 2

1	9.69280 a
2	10.38257 a
3	10.94371 a

dms = 1.60043

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	8.9780 aA	10.5874 aA	10.6333 aA
Com	10.4076 aA	10.1777 aA	11.2541 aA

dms para colunas = 1.8491 dms para linhas = 2.2633

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.9 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA40:SI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	24.35747	24.35747	10.2233	**
Fator2(F2)	2	0.43159	0.21580	0.0906	ns
Int. F1xF2	2	2.29094	1.14547	0.4808	ns
Tratamentos	5	27.08000	5.41600	2.2732	ns
Resíduo	12	28.59056	2.38255		
Total	17	55.67056			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com);

Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	7.59194 b
2	9.91848 a
dms =	1.58471

Médias do fator 2

1	8.97297 a
2	8.66641 a
3	8.62626 a
dms =	2.37567

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	8.1648 aA	7.0152 bA	7.5958 aA
Com	9.7811 aA	10.3176 aA	9.6567 aA

dms para colunas = 2.7448 dms para linhas = 3.3597

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.10 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA40:CI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	32.40440	32.40440	47.0898	**
Fator2(F2)	2	10.51136	5.25568	7.6375	**
Int. F1xF2	2	3.82526	1.91263	2.7794	ns
Tratamentos	5	46.74102	9.34820	13.5847	**
Resíduo	12	8.25768	0.68814		
Total	17	54.99870			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com); Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1			Médias do fator 2		
1	6.98951	b	1	8.73190	a
2	9.67298	a	2	9.00014	a
			3	7.26169	b
dms = 0.85166			dms = 1.27675		

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	7.0084 bA	7.3916 bA	6.5685 aA
Com	10.4554 aA	10.6087 aA	7.9549 aB

dms para colunas = 1.4751 dms para linhas = 1.8056

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.11 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA100:SI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	16.81290	16.81290	48.9305	**
Fator2(F2)	2	5.10218	2.55109	7.4244	**
Int. F1xF2	2	1.59986	0.79993	2.3280	ns
Tratamentos	5	23.51494	4.70299	13.6871	**
Resíduo	12	4.12329	0.34361		
Total	17	27.63824			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com); Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	4.93664 b
2	6.86957 a

dms = 0.60181

Médias do fator 2

1	6.29857 a
2	6.26025 a
3	5.15050 b

dms = 0.90219

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	4.9289 bA	5.3887 bA	4.4923 bA
Com	7.6683 aA	7.1318 aA	5.8087 aB

dms para colunas = 1.0424 dms para linhas = 1.2759

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.12 – Análise de variância para resistência à tração na flexão no concreto EVA100:CI, aplicando as variáveis estudadas: Ataque por sulfato (sem e com) e Idade de ensaio (ciclos 4, 9, 22). – Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Fator1(F1)	1	2.20423	2.20423	9.5105	**
Fator2(F2)	2	1.93561	0.96781	4.1758	*
Int. F1xF2	2	0.78253	0.39127	1.6882	ns
Tratamentos	5	4.92238	0.98448	4.2477	*
Resíduo	12	2.78121	0.23177		
Total	17	7.70359			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Fator 1 = Ataque sulfato (sem, com); Fator 2 = Ciclos (4, 9, 22)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias do fator 1

1	5.78424 b
2	6.48412 a
dms =	0.49426

Médias do fator 2

1	6.48686 a
2	6.21862 ab
3	5.69704 b
dms =	0.74096

MÉDIAS DE INTERAÇÃO

Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2		
	Ciclo 4	Ciclo 9	Ciclo 22
Sem	5.8553 bA	6.0853 aA	5.4121 aA
Com	7.1184 aA	6.3520 aAB	5.9820 aB

dms para colunas = 0.8561 dms para linhas = 1.0479

Classific.c/letras minúsculas Classific.c/letras maiúsculas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela B6.13 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 18% de EVA (EVA 40) submetidos ao ataque por sulfato aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com). - Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	1	4.34443	4.34443	0.6898	ns
Resíduo	4	25.19276	6.29819		
Total	5	29.53718			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1 9.65672 a

2 7.95487 a

dms = 5.69429

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela C6.14 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão nos concretos com teores de 44% de EVA (EVA 100) submetidos ao ataque por sulfato aos 154 dias de imersão (ciclo 22), aplicando a variável: Tratamento imersão prévia em água (sem e com). - Etapa III.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F	Efeito
Tratamentos	1	0.04505	0.04505	0.1810	ns
Resíduo	4	0.99580	0.24895		
Total	5	1.04085			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1 5.80867 a

2 5.98198 a

dms = 1.13211

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

B.7 Resultados do Ataque por Sulfatos

Tabela C7.1 – Valores da variação dimensional percentual dos concretos avaliados. (ETAPA III).

Tempo de exposição	Variação Dimensional (porcentagem)									
	Amostras atacadas em solução com sulfato de sódio					Amostras não atacadas em solução com sulfato de sódio (BRANCAS)				
Ciclos (dias)	EVA40:SI	EVA40:CI	EVA100:SI	EVA100:CI	EVA0	EVA40:SI	EVA40:CI	EVA100:SI	EVA100:CI	EVA0
1 (7dias)	0,008	0,012	0,009	0,006	0,008	0,002	0,006	-0,002	0,002	0,009
2 (14dias)	0,008	0,010	0,013	0,012	0,008	0,002	0,003	-0,003	-0,004	0,008
3 (21dias)	0,009	0,009	0,015	0,015	0,009	0,006	0,000	-0,016	-0,012	0,006
4 (28dias)	0,010	0,009	0,016	0,017	0,010	0,006	-0,002	-0,020	-0,015	0,005
5 (35dias)	0,010	0,006	0,016	0,017	0,019	0,006	-0,006	-0,022	-0,018	0,004
6 (42dias)	0,014	0,010	0,017	0,020	0,020	0,000	-0,010	-0,031	-0,026	0,001
7 (49dias)	0,017	0,016	0,018	0,029	0,022	-0,009	-0,015	-0,040	-0,034	-0,007
8 (56dias)	0,018	0,036	0,021	0,031	0,016	-0,009	-0,017	-0,043	-0,034	-0,006
9 (63dias)	0,024	0,044	0,054	0,054	0,021	-0,010	-0,018	-0,044	-0,036	-0,006
10 (70dias)	0,034	0,055	0,082	0,082	0,028	-0,010	-0,019	-0,052	-0,036	-0,005
11 (77dias)	0,040	0,064	0,112	0,109	0,038	-0,007	-0,013	-0,050	-0,036	-0,005
12 (84dias)	0,045	0,070	0,131	0,140	0,045	-0,008	-0,014	-0,054	-0,036	-0,005
13 (91dias)	0,091	0,110	0,205	0,184	0,071	-0,012	-0,017	-0,059	-0,042	-0,006
14 (98dias)	0,114	0,146	0,255	0,231	0,087	-0,014	-0,021	-0,064	-0,046	-0,006
15 (105dias)	0,135	0,178	0,300	0,271	0,100	-0,013	-0,022	-0,068	-0,045	-0,006
16 (112dias)	0,173	0,215	0,355	0,308	0,130	-0,022	-0,031	-0,085	-0,055	-0,014
17 (119dias)	0,223	0,276	0,431	0,365	0,172	-0,021	-0,026	-0,084	-0,054	-0,010
18 (126dias)	0,300	0,355	0,500	0,420	0,200	-0,020	-0,027	-0,088	-0,057	-0,009
19 (133dias)	0,360	0,410	0,600	0,501	0,250	-0,025	-0,032	-0,092	-0,060	-0,014
20 (140dias)	0,400	0,472	0,661	0,552	0,332	-0,023	-0,032	-0,090	-0,059	-0,014
21 (147dias)	0,478	0,553	0,760	0,654	0,408	-0,024	-0,033	-0,095	-0,061	-0,012
22 (154dias)	0,529	0,610	0,812	0,720	0,464	-0,024	-0,035	-0,096	-0,061	-0,012

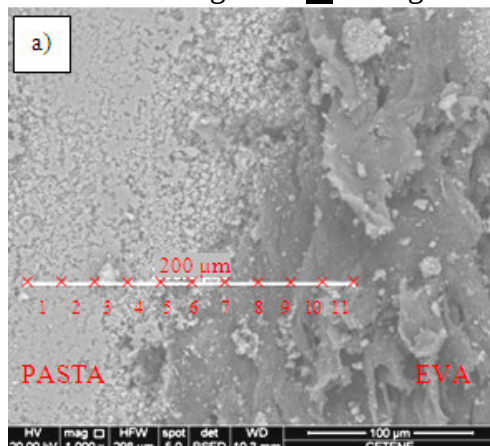
Tabela C7.2 – Valores da variação de massa dos concretos avaliados. (ETAPA III).

Tempo de exposição	Variação de massa (em gramas) (valores positivos=acrécimo; negativos=diminuição)									
	Amostras atacadas em solução com sulfato de sódio					Amostras não atacadas em solução com sulfato de sódio (BRANCAS)				
Ciclos (dias)	EVA40:SI	EVA40:CI	EVA100:SI	EVA100:CI	EVA0	EVA40:SI	EVA40:CI	EVA100:SI	EVA100:CI	EVA0
1 (7dias)	2,90	0,75	0,55	0,10	2,00	-0,10	0,00	-0,40	-0,30	0,50
2 (14dias)	2,60	0,75	0,55	0,20	3,40	0,00	0,00	-0,70	-0,70	0,60
3 (21dias)	2,70	1,00	0,57	0,10	3,45	-0,30	-0,30	-1,40	-1,40	0,30
4 (28dias)	2,70	1,00	0,56	0,10	3,50	-0,40	-0,40	-1,80	-1,80	0,20
5 (35dias)	3,00	0,85	0,57	0,22	3,75	-0,60	-0,80	-2,00	-2,10	0,20
6 (42dias)	3,50	1,20	0,60	0,24	4,10	-1,10	-1,30	-2,80	-2,90	-0,40
7 (49dias)	3,70	1,35	0,62	0,30	4,60	-1,10	-1,30	-3,00	-3,10	-0,40
8 (56dias)	4,00	1,85	0,63	0,35	4,60	-1,10	-1,30	-3,10	-3,30	-0,40
9 (63dias)	4,30	2,55	0,65	0,35	5,20	-1,10	-1,30	-3,40	-3,50	-0,40
10 (70dias)	4,80	3,15	1,45	0,40	5,60	-1,20	-1,40	-3,30	-3,40	-0,60
11 (77dias)	5,10	3,40	1,35	0,45	6,00	-1,50	-1,70	-3,90	-3,80	-0,70
12 (84dias)	6,00	4,00	2,00	0,48	6,00	-1,70	-1,90	-4,20	-4,20	-0,90
13 (91dias)	6,50	4,90	2,95	0,50	7,25	-1,80	-2,20	-4,50	-4,50	-1,10
14 (98dias)	6,80	5,00	3,25	1,25	7,45	-1,70	-2,10	-4,70	-4,90	-1,20
15 (105dias)	7,00	5,10	3,30	1,25	7,45	-2,20	-2,90	-5,10	-5,10	-1,20
16 (112dias)	7,10	5,20	3,35	1,30	7,60	-2,40	-3,00	-5,60	-5,30	-1,40
17 (119dias)	8,30	6,35	4,60	2,25	8,70	-3,00	-3,30	-6,10	-5,70	-2,00
18 (126dias)	9,00	7,70	5,00	3,00	9,00	-3,20	-3,30	-6,50	-6,10	-2,10
19 (133dias)	9,20	8,35	6,00	3,20	10,65	-3,10	-3,30	-6,50	-5,90	-2,00
20 (140dias)	9,50	8,35	5,65	3,35	10,80	-3,40	-3,80	-6,80	-6,30	-2,30
21 (147dias)	9,60	8,50	6,30	3,80	11,00	-3,60	-3,80	-6,90	-6,50	-2,60
22 (154dias)	11,50	8,65	7,75	5,00	11,90	-3,80	-3,80	-7,00	-6,70	-2,80

APÊNDICE C - Ensaios da Microestrutura

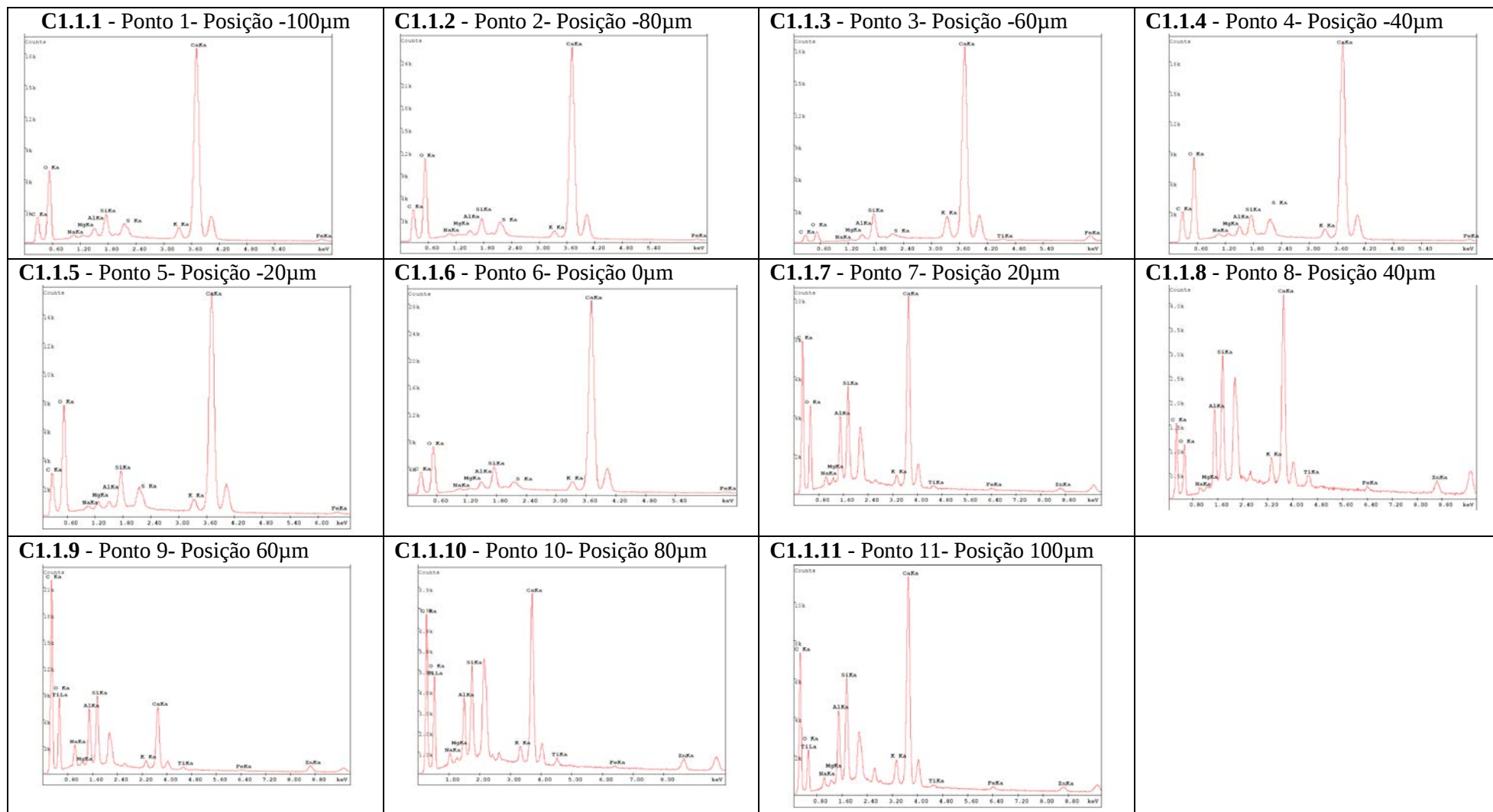
C.1 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).

C1.1 Linha Imaginária a) - imagem referente aos pontos das Figuras C1.1.1 a C1.1.11.



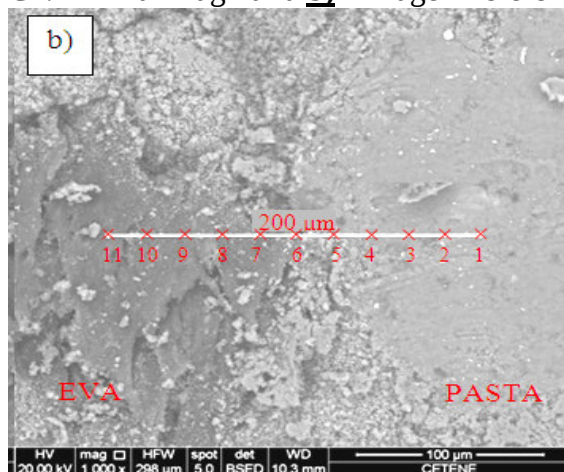
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	17,77	20,00	9,48	19,23	21,10	18,49	46,47	35,15	60,12	46,96	49,02
O	40,23	42,58	14,72	42,06	42,59	34,69	22,85	16,12	19,25	21,58	12,89
Na	1,60	1,63	0,60	1,61	1,50	1,41	0,99	0,72	1,97	1,15	1,11
Mg	1,26	1,20	0,70	1,31	1,66	1,18	0,60	0,65	0,36	0,46	0,66
Al	1,90	1,38	1,81	1,93	1,36	1,91	3,85	5,72	3,44	3,58	4,49
Si	2,85	2,17	5,14	2,53	3,23	3,23	5,16	8,68	3,93	4,78	6,06
S	0,77	0,76	1,19	0,80	0,76	0,81	-	-	-	-	-
K	1,85	1,20	6,05	1,44	1,50	1,84	0,97	2,77	0,57	1,17	2,35
Ca	30,97	28,75	54,33	28,64	25,77	35,91	16,35	19,09	5,84	13,26	19,34
Ti	-	-	1,21	-	-	-	0,38,	1,99	0,34	0,69	0,47
Fe	0,78	0,35		0,46	0,54	0,53	0,41	1,06	0,25	0,44	0,75
Zn	-	-	-	-	-	-	1,98	8,04	3,93	5,94	2,88
Figura	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.1.6	C1.1.7	C1.1.8	C1.1.9	C1.1.10	C1.1.11

Figura C1.1 – Espectros EDS para Linha Imaginária a) - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).



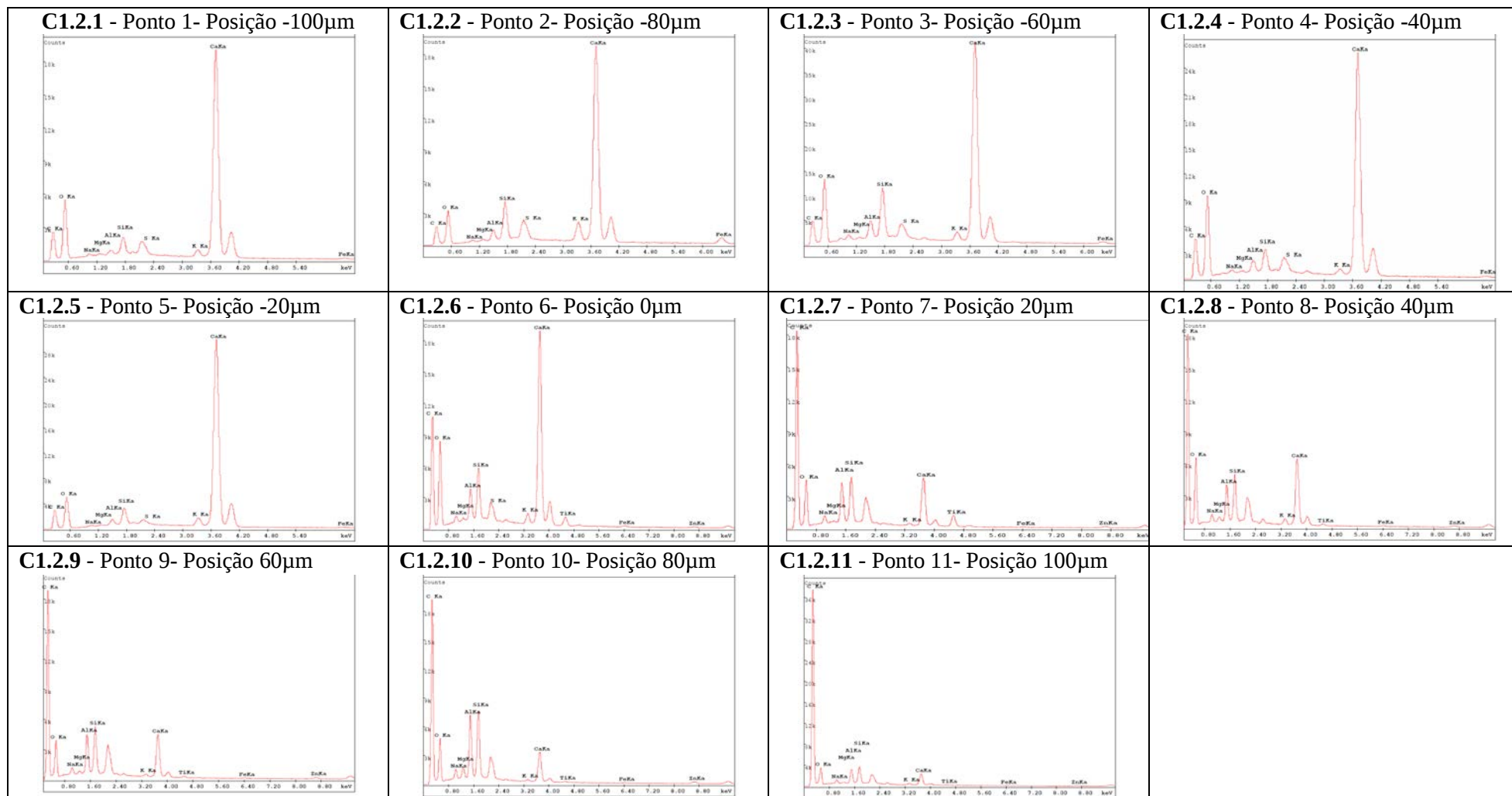
C.1 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).

C1.2 Linha Imaginária **b)** - imagem referente aos pontos das Figuras C1.2.1 a C1.2.11.



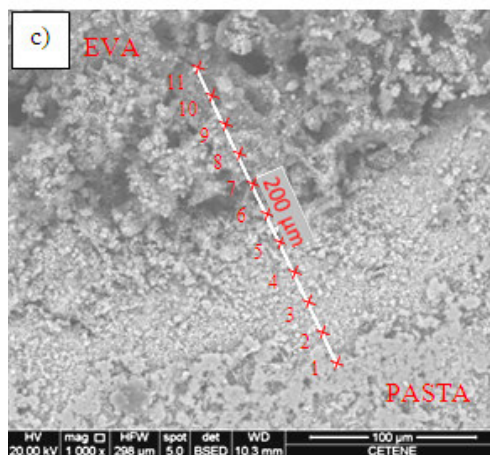
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	19,73	17,02	18,32	22,34	17,55	40,96	66,14	60,09	68,49	68,75	80,39
O	36,95	27,43	35,97	38,76	30,47	29,93	17,26	21,94	15,49	15,20	11,61
Na	1,43	1,20	2,00	1,61	1,10	0,81	0,84	1,45	1,33	0,97	1,02
Mg	1,22	1,08	1,26	1,19	0,97	0,41	0,22	0,93	0,71	1,00	0,46
Al	1,46	2,27	2,99	2,02	1,75	2,45	2,87	2,81	3,25	4,36	1,75
Si	2,40	5,13	5,47	2,51	2,98	3,20	3,19	3,22	3,59	4,66	1,94
S	0,83	1,06	0,96	0,78	0,82	0,25	-	-	-	-	-
K	1,33	3,50	1,51	0,97	1,90	0,85	0,18	0,78	0,21	0,13	0,27
Ca	34,11	38,09	30,77	29,28	41,99	18,84	5,78	7,32	5,30	3,51	2,11
Ti	-	-	-	-	-	1,30	1,86	0,33	0,19	0,04	0,10
Fe	0,53	3,22	0,74	0,53	0,47	0,38	0,23	0,27	0,13	0,00	0,00
Zn	-	-	-	-	-	0,71	1,44	0,84	1,32	1,38	0,35
Figura	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5	C1.2.6	C1.2.7	C1.2.8	C1.2.9	C1.2.10	C1.2.11

Figura C1.2 – Espectros EDS para Linha Imaginária **b)** - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).



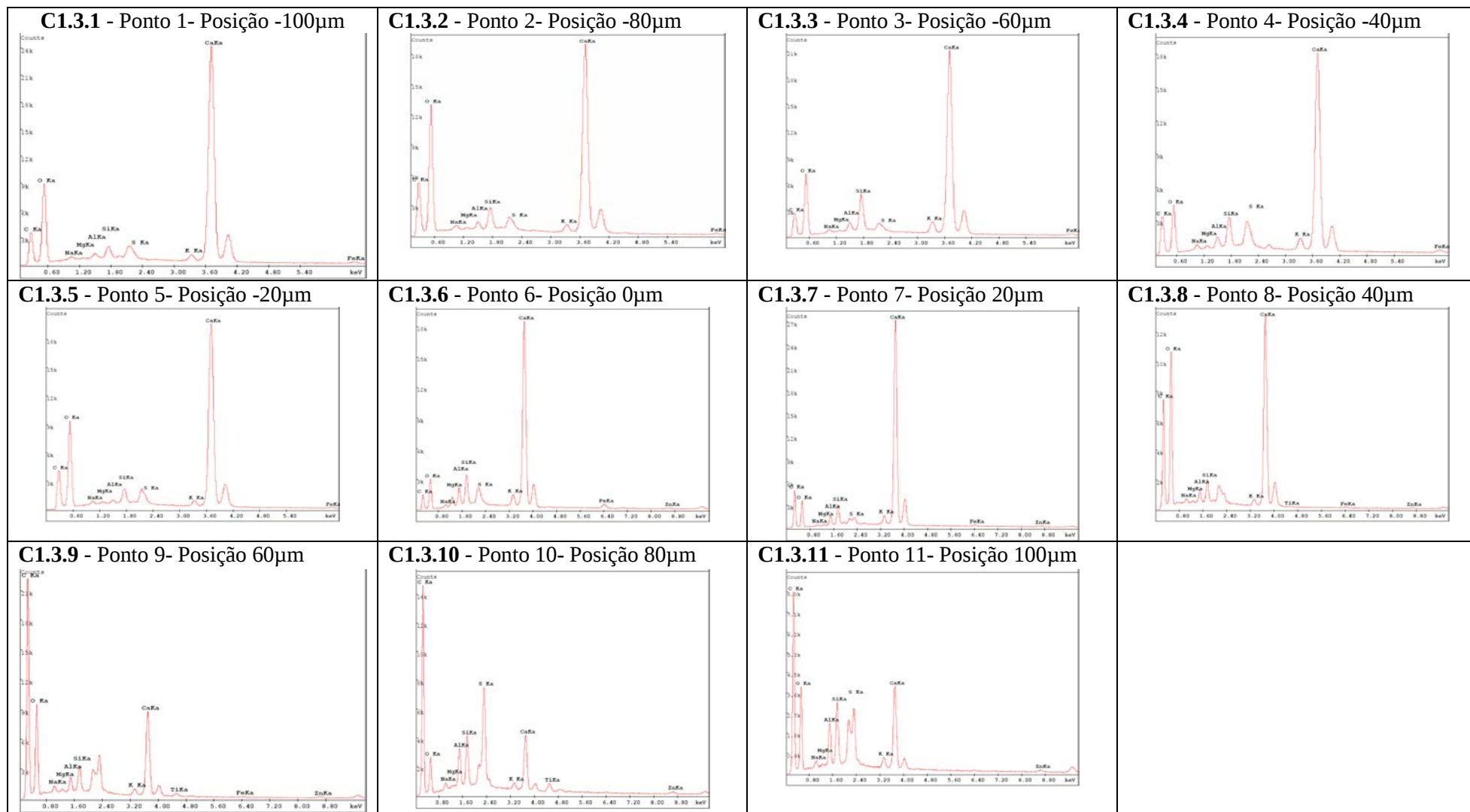
C.1 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).

C1.3 Linha Imaginária **c)** - imagem referente aos pontos das Figuras C1.3.1 a C1.3.11.



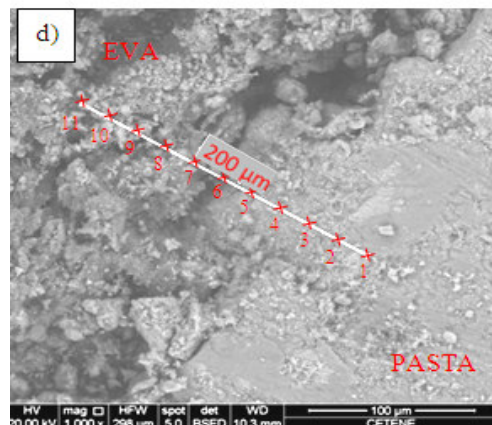
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	19,11	24,25	18,40	26,08	22,78	16,31	26,71	32,46	56,54	70,17	58,35
O	41,53	46,65	37,89	29,50	42,89	25,92	21,57	41,31	26,56	10,22	22,01
Na	1,59	1,55	1,58	1,86	1,63	1,30	0,55	1,48	1,49	0,64	0,59
Mg	1,08	0,88	1,12	1,32	1,21	2,51	0,31	0,82	0,83	0,32	0,23
Al	1,38	1,15	1,95	2,14	1,16	3,56	1,46	1,34	1,39	2,14	2,41
Si	1,70	1,92	4,46	3,64	1,92	4,63	2,62	1,76	1,93	2,58	3,25
S	0,77	0,39	0,80	1,24	0,75	1,43	1,11	-	-	6,11	3,76
K	1,05	0,75	2,02	1,94	0,92	2,47	1,52	0,90	0,91	0,68	0,92
Ca	31,26	22,08	31,16	31,16	26,47	38,07	42,25	18,51	8,35	4,95	7,28
Ti	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,69	0,97	-
Fe	0,53	0,38	0,63	1,12	0,27	2,56	0,71	0,46	0,49	-	-
Zn	-	-	-	-	-	1,25	1,19	0,56	0,82	1,22	1,21
Figura	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.3.6	C1.3.7	C1.3.8	C1.3.9	C1.3.10	C1.3.11

Figura C1.3 – Espectros EDS para Linha Imaginária c) - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).



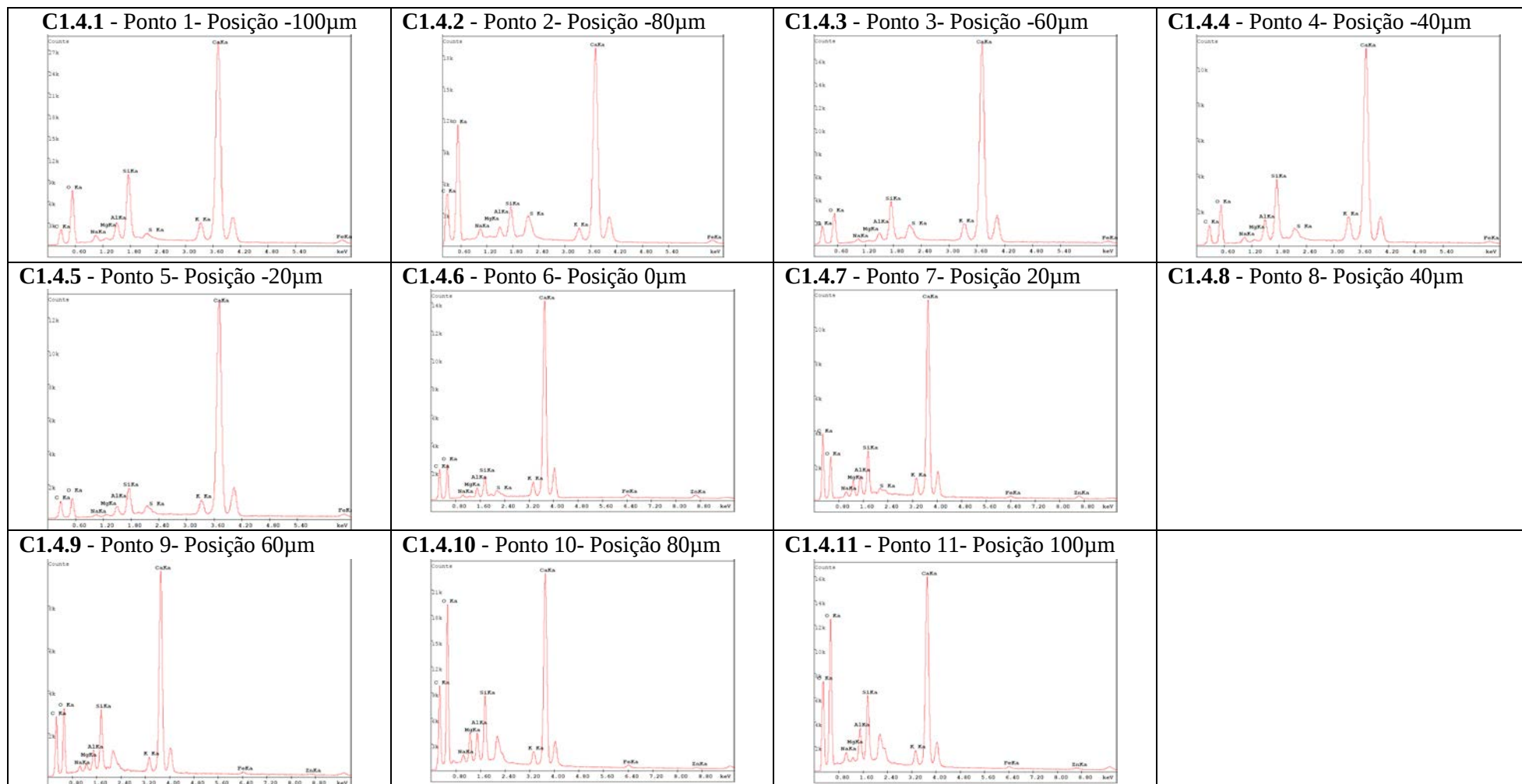
C.1 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).

C1.4 Linha Imaginária **d)** - imagem referente aos pontos das Figuras C1.4.1 a C1.4.11.



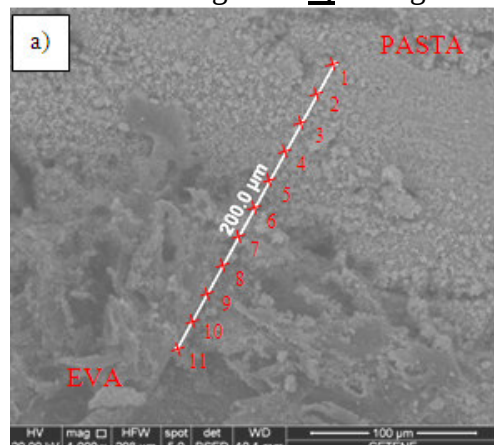
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	13,54	23,64	15,77	16,67	15,00	22,17	34,50	62,65	29,56	28,73	31,76
O	33,74	44,66	26,41	26,32	20,16	23,83	21,04	22,51	29,58	41,22	40,79
Na	2,06	1,59	1,16	1,70	0,73	1,15	1,34	0,99	1,48	0,86	1,21
Mg	1,13	0,30	0,45	0,82	0,47	0,56	2,14	0,49	1,21	2,28	0,42
Al	2,91	1,13	1,48	3,15	1,68	1,60	2,30	2,41	2,19	1,94	2,33
Si	7,44	2,36	5,54	7,55	4,29	2,83	4,15	2,75	5,31	3,95	3,71
S	0,81	0,45	0,61	0,97	0,51	0,72	0,93	1,27	-	-	-
K	3,02	1,28	3,34	4,39	3,00	2,64	2,51	0,54	1,61	1,15	1,21
Ca	33,70	23,48	44,28	37,30	52,40	38,43	27,82	5,77	27,35	18,61	17,14
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	1,65	1,10	0,97	1,13	1,76	1,86	0,76	0,10	0,85	0,76	0,55
Zn	-	-	-	-	-	4,22	2,51	0,52	0,85	0,51	0,89
Figura	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5	C1.4.6	C1.4.7	C1.4.8	C1.4.9	C1.4.10	C1.4.11

Figura C1.4 – Espectros EDS para Linha Imaginária **d)** - Mistura EVA40:SI (sem imersão prévia em água).



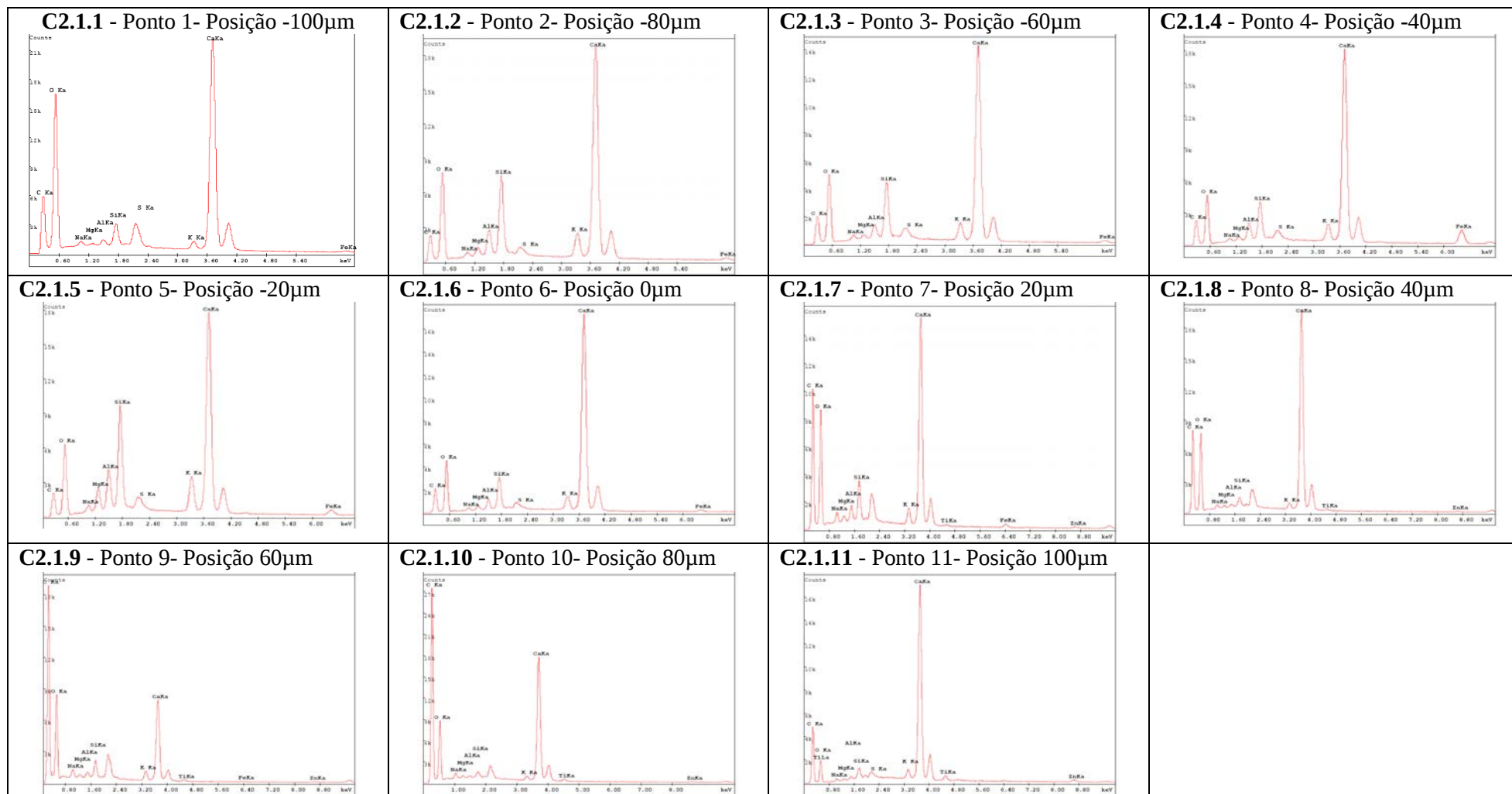
C.2 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).

C2.1 Linha Imaginária **a)** - imagem referente aos pontos das Figuras C2.1.1 a C2.1.11.



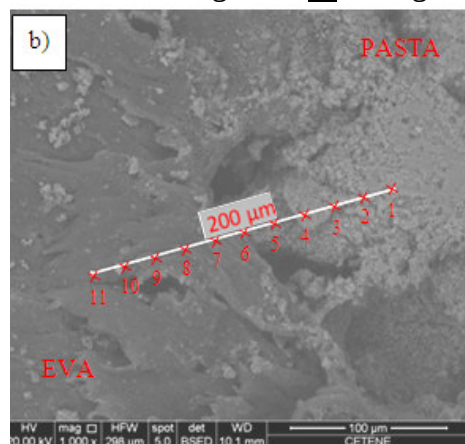
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100µm)	Ponto 2 (-80µm)	Ponto 3 (-60µm)	Ponto 4 (-40µm)	Ponto 5 (-20µm)	Ponto 6 (0µm)	Ponto 7 (20µm)	Ponto 8 (40µm)	Ponto 9 (60µm)	Ponto 10 (80µm)	Ponto 11 (100µm)
C	22,76	16,81	19,77	19,28	17,52	17,56	39,32	32,75	55,75	55,87	34,63
O	48,73	38,48	35,97	30,09	31,16	33,36	32,87	33,69	28,70	24,14	17,30
Na	1,58	1,49	1,67	1,27	1,69	1,22	1,11	1,47	1,67	1,35	0,90
Mg	0,99	1,77	1,44	1,22	3,30	1,17	0,51	0,92	0,73	0,73	0,63
Al	1,05	3,15	2,33	2,75	4,66	1,74	1,07	0,89	0,77	0,62	0,81
Si	1,79	6,70	5,77	4,33	8,84	4,12	2,33	1,36	1,36	0,83	1,77
S	0,43	0,66	0,79	0,53	0,93	0,75	-	-	-	-	0,85
K	0,72	2,98	2,48	2,53	4,26	2,55	1,32	1,10	0,91	0,63	1,94
Ca	21,64	27,24	28,78	31,56	25,79	36,58	19,61	26,60	9,05	14,89	37,10
Ti	-	-	-	-	-	-	0,12	0,55	0,26	0,39	1,50
Fe	0,31	0,74	1,00	6,54	1,84	0,94	0,90	-	0,28	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-	0,86	0,67	0,54	0,56	2,58
Figura	C2.1.1	C2.1.2	C2.1.3	C2.1.4	C2.1.5	C2.1.6	C2.1.7	C2.1.8	C2.1.9	C2.1.10	C2.1.11

Figura C2.1 – Espectros EDS para Linha Imaginária **a)** - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).



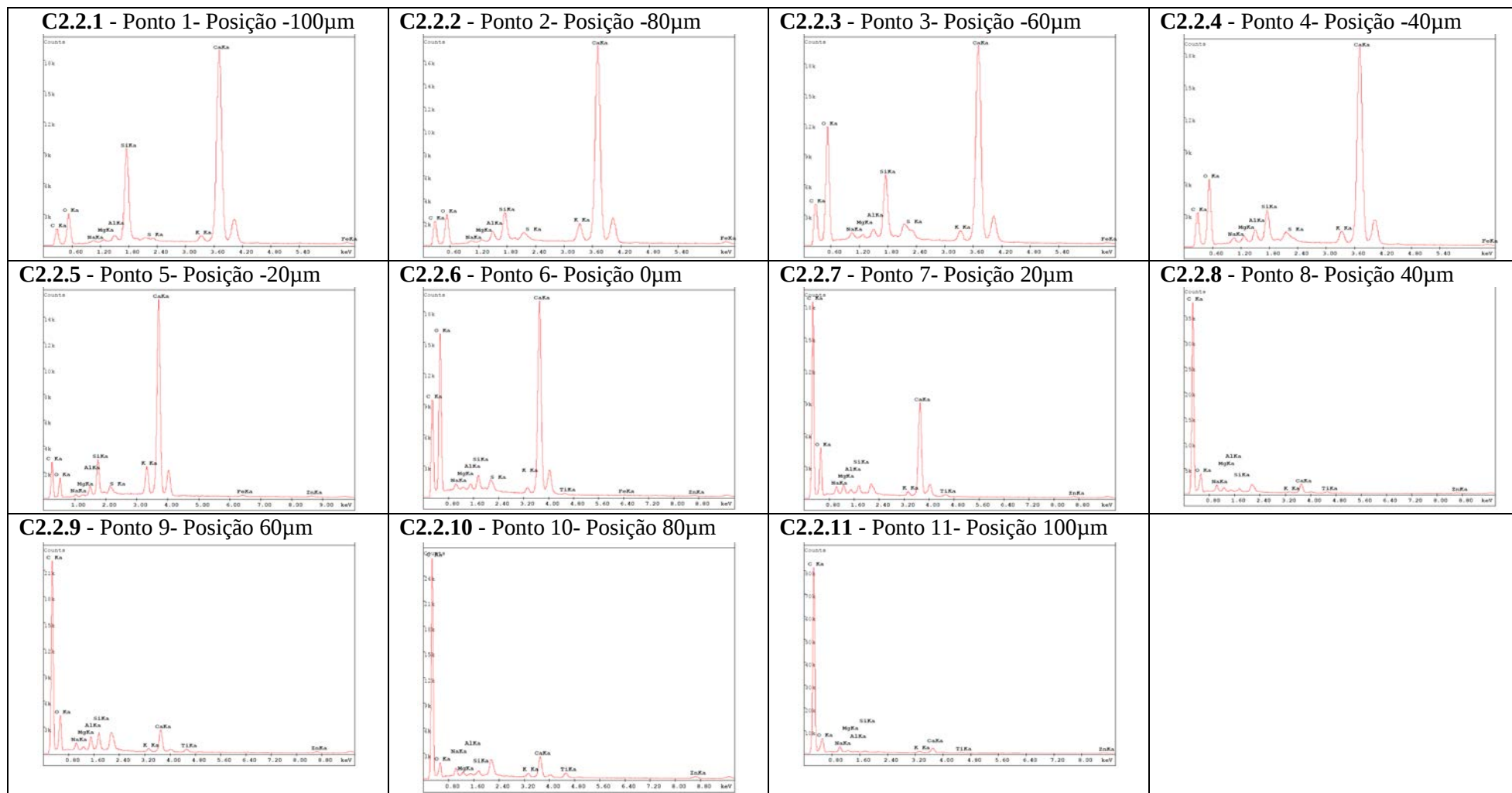
C.2 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).

C2.2 Linha Imaginária **b)** - imagem referente aos pontos das Figuras C2.2.1 a C2.2.11.



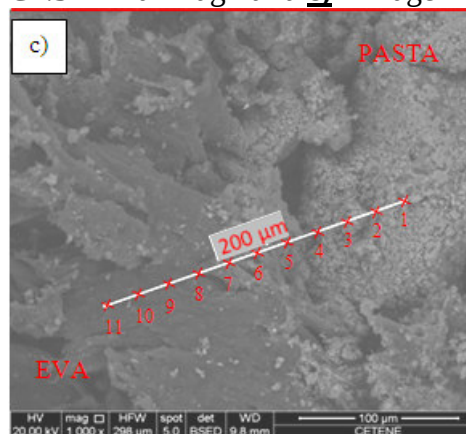
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	17,75	20,86	21,55	22,10	27,03	31,86	60,60	79,01	70,72	79,22	82,12
O	25,60	26,39	44,60	36,29	16,41	44,04	20,93	13,91	18,64	9,74	12,82
Na	1,13	1,09	1,01	1,71	0,78	1,62	1,55	1,63	1,40	1,66	1,44
Mg	0,99	1,02	0,47	1,56	0,51	0,99	1,33	0,89	0,50	0,75	0,51
Al	1,52	2,09	0,93	2,02	1,56	1,00	0,73	0,44	1,28	0,49	0,30
Si	11,42	4,13	4,82	3,39	4,74	1,22	0,98	0,51	1,49	0,68	0,29
S	0,92	0,82	0,92	0,92	0,72	0,47	-	-	-	-	-
K	1,44	3,30	1,16	1,90	5,19	0,67	0,63	0,18	0,45	0,55	0,35
Ca	38,39	39,02	24,22	29,59	40,39	17,34	12,03	1,85	3,48	3,59	1,17
Ti	-	-	-	-	-	0,27	0,46	0,44	0,72	1,18	0,22
Fe	0,84	1,28	0,32	0,53	0,80	0,15	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	1,87	0,36	0,76	1,14	1,33	2,14	0,77
Figura	C2.2.1	C2.2.2	C2.2.3	C2.2.4	C2.2.5	C2.2.6	C2.2.7	C2.2.8	C2.2.9	C2.2.10	C2.2.11

Figura C2.2 – Espectros EDS para Linha Imaginária **b)** - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).



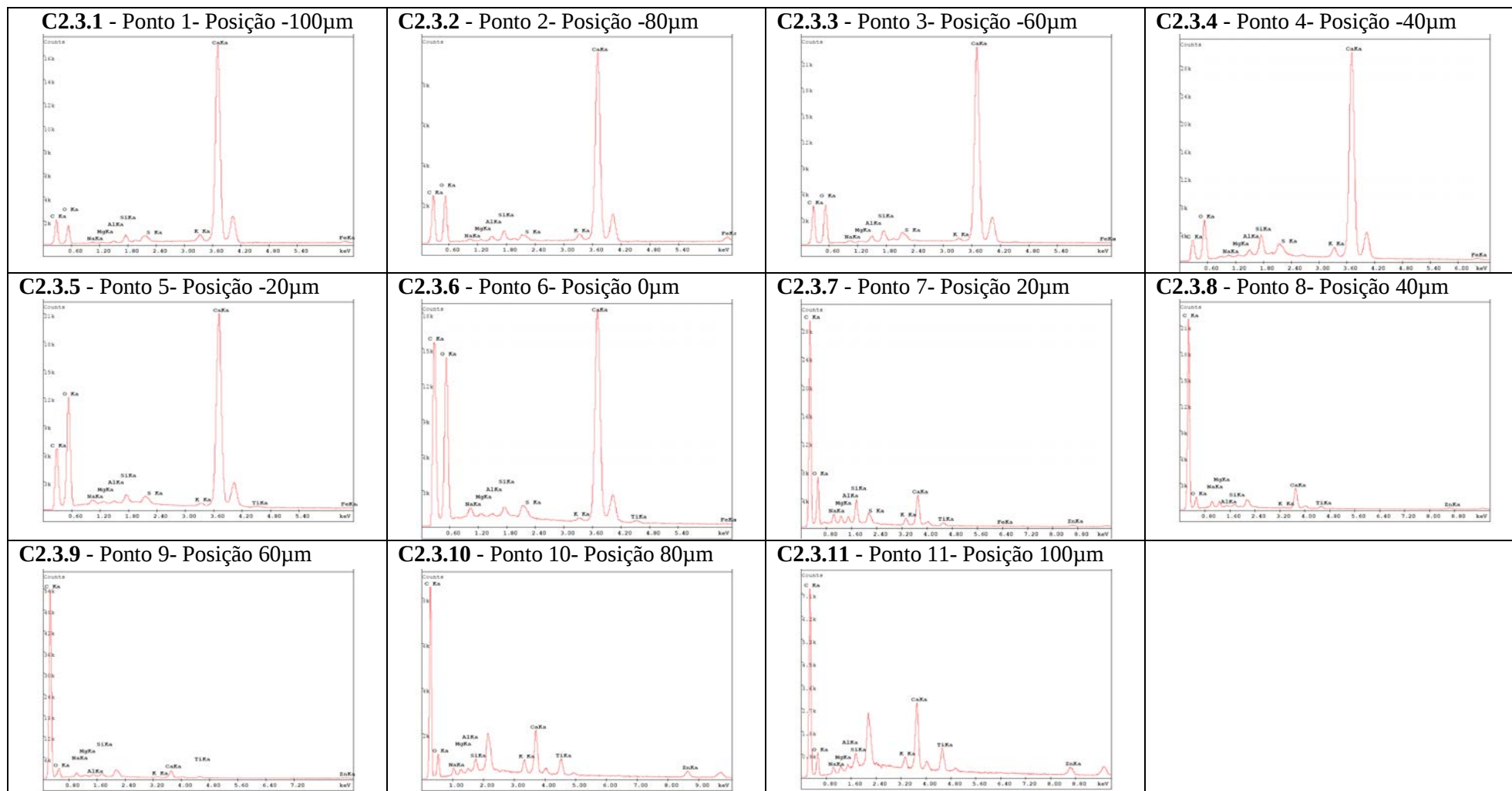
C.2 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).

C2.3 Linha Imaginária **c)** - imagem referente aos pontos das Figuras C2.3.1 a C2.3.11.



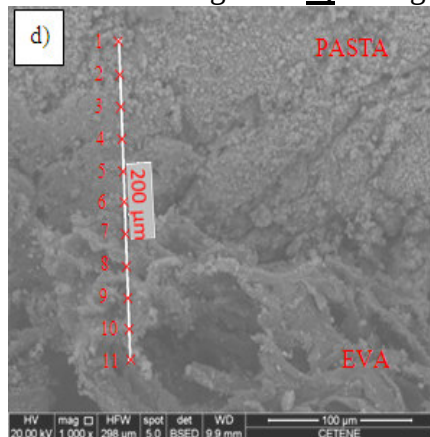
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	20,84	27,54	24,49	17,64	26,02	42,05	68,07	80,66	84,97	68,68	64,65
O	20,64	30,09	30,34	32,10	46,46	37,62	19,30	9,12	9,00	11,30	9,99
Na	0,68	1,02	0,73	1,49	1,13	1,61	1,67	1,44	1,18	1,02	0,99
Mg	0,39	0,55	0,32	1,19	0,45	0,90	1,05	1,08	0,54	0,60	0,86
Al	0,49	0,88	0,98	1,71	0,24	0,73	0,85	0,45	0,51	0,55	0,82
Si	1,40	1,41	1,56	3,09	0,63	0,81	1,99	0,51	0,57	1,24	1,65
S	0,57	0,40	0,31	1,02	0,02	0,45	0,41	-	-	-	-
K	1,93	1,33	0,55	1,88	0,32	0,41	0,95	0,13	0,14	1,62	1,86
Ca	51,72	34,41	40,40	39,31	24,54	14,97	3,88	4,14	1,57	6,05	8,48
Ti	-	-	-	-	0,11	0,36	0,59	0,59	0,44	3,17	4,26
Fe	1,33	2,38	0,31	0,58	0,09	0,09	0,15	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-	1,10	1,87	1,08	5,77	6,44
Figura	C2.3.1	C2.3.2	C2.3.3	C2.3.4	C2.3.5	C2.3.6	C2.3.7	C2.3.8	C2.3.9	C2.3.10	C2.3.11

Figura C2.3 – Espectros EDS para Linha Imaginária c) - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).



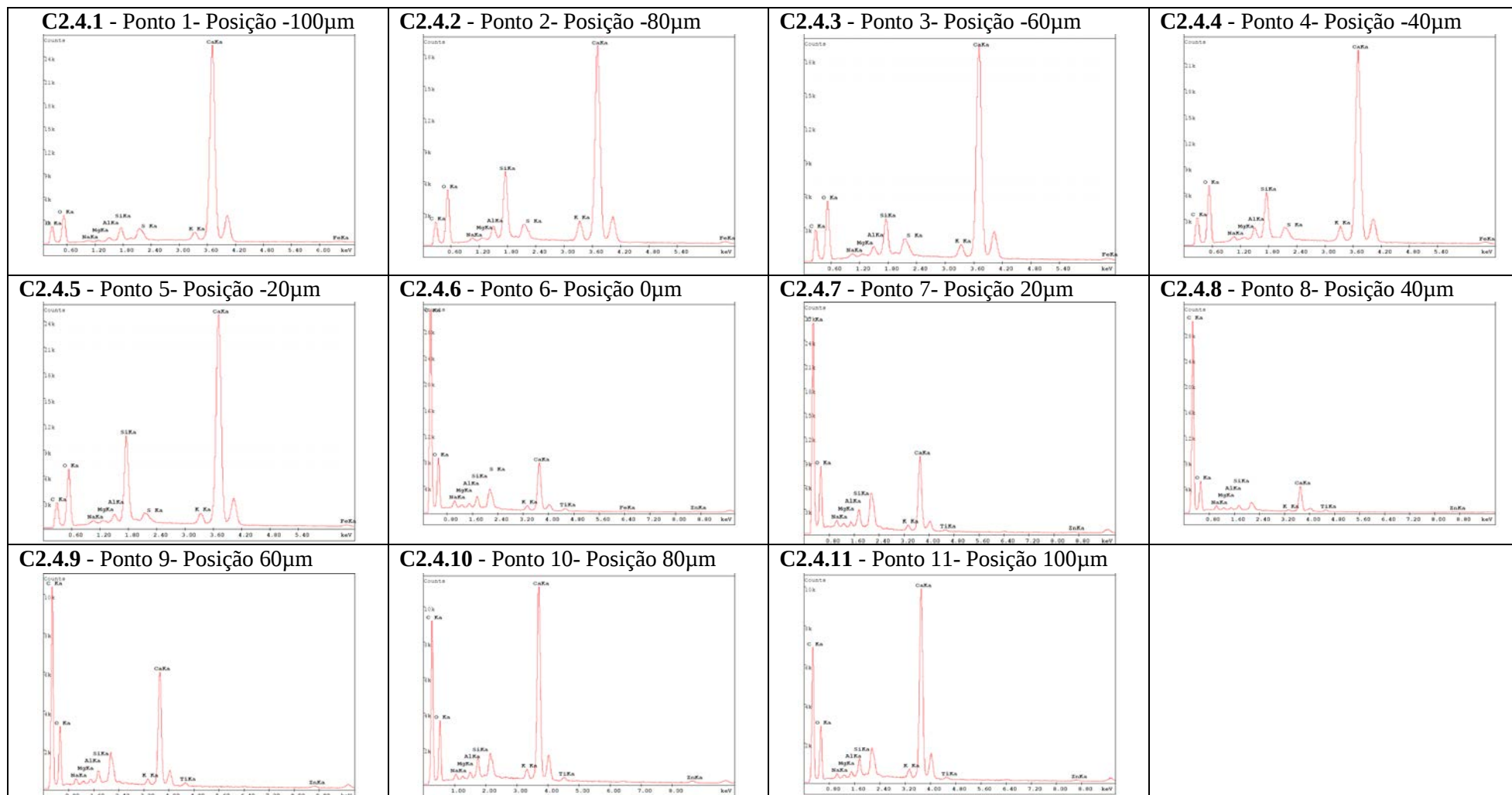
C.2 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).

C2.4 Linha Imaginária **d)** - imagem referente aos pontos das Figuras C2.4.1 a C2.4.11.



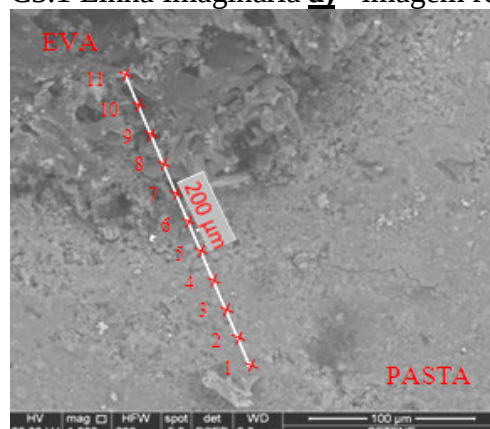
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	16,15	18,66	20,99	20,86	19,70	65,76	62,06	72,47	57,42	47,84	45,63
O	29,73	32,81	34,54	34,56	32,92	22,54	24,45	18,56	23,81	24,42	24,73
Na	0,89	1,39	1,55	1,72	1,39	1,40	1,43	1,19	0,71	0,64	0,63
Mg	0,66	1,14	1,19	1,30	1,12	0,77	0,89	0,61	0,24	0,18	0,31
Al	1,04	2,37	1,84	2,17	1,61	0,71	0,78	0,49	0,36	0,39	0,51
Si	2,30	7,24	3,99	5,18	8,45	1,01	1,38	0,67	0,94	1,31	1,47
S	0,78	0,87	0,87	0,78	0,79	0,44	-	-	-	-	-
K	2,04	3,05	2,00	2,26	1,74	0,46	0,48	0,21	0,58	0,97	0,98
Ca	45,75	31,58	32,26	30,43	31,60	5,62	7,75	4,54	13,79	22,11	24,37
Ti	-	-	-	-	-	0,46	0,24	0,47	0,62	0,60	0,37
Fe	0,67	0,89	0,77	0,74	0,67	0,21	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	0,63	0,52	0,80	1,53	1,54	1,00
Figura	C2.4.1	C2.4.2	C2.4.3	C2.4.4	C2.4.5	C2.4.6	C2.4.7	C2.4.8	C2.4.9	C2.4.10	C2.4.11

Figura C2.4 – Espectros EDS para Linha Imaginária **d)** - Mistura EVA40:CI (com imersão prévia em água).



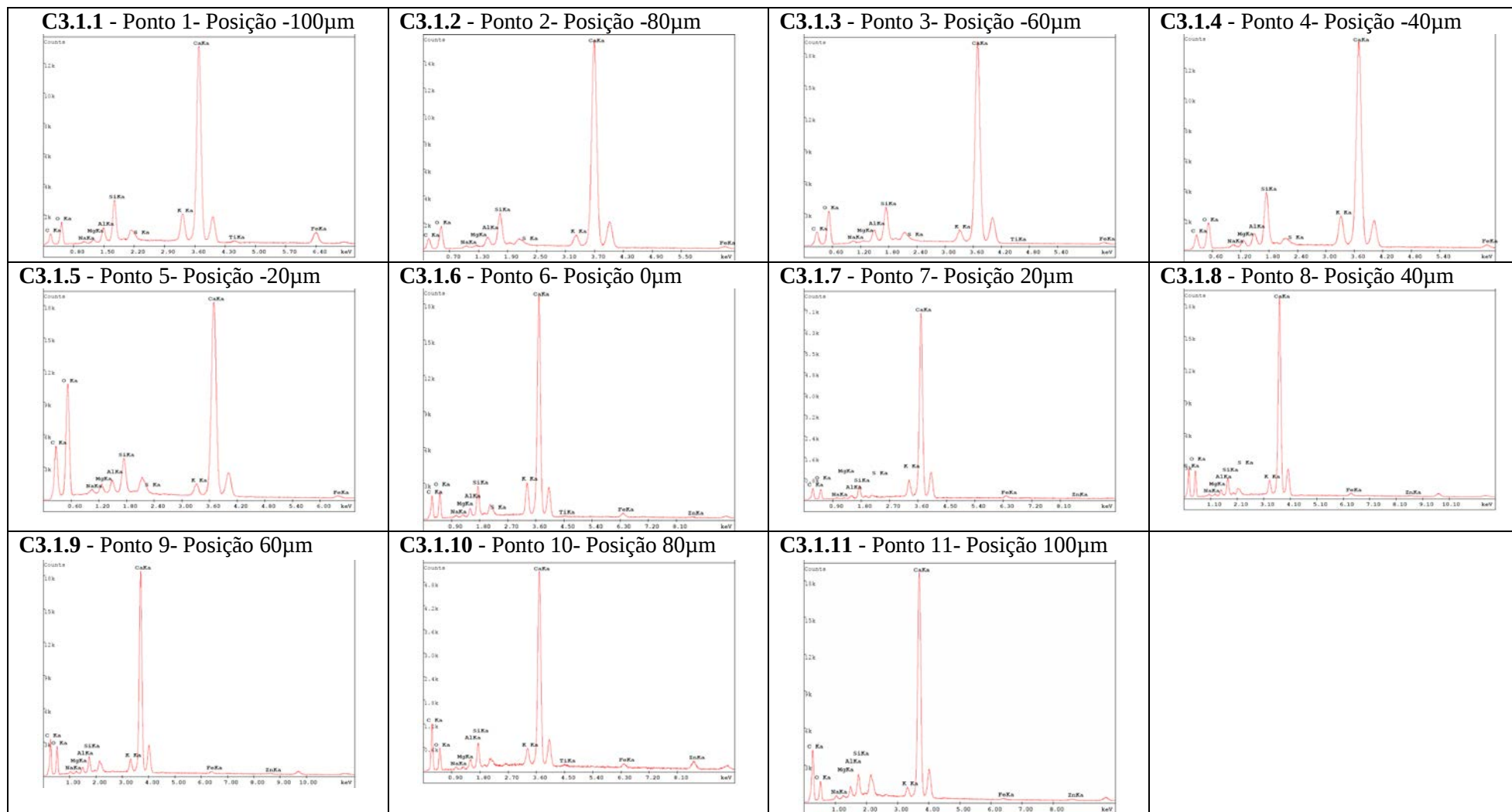
C.3 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).

C3.1 Linha Imaginária **a)** - imagem referente aos pontos das Figuras C3.1.1 a C3.1.11.



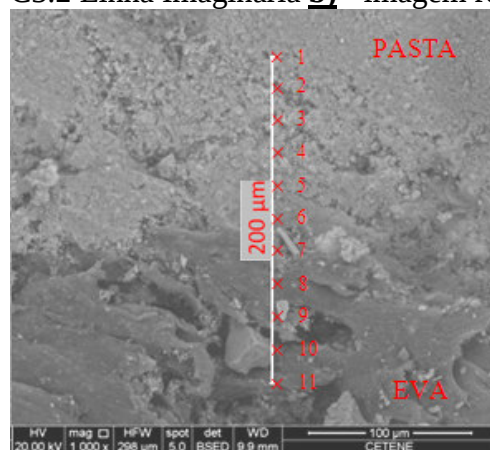
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	10,93	12,15	13,48	14,45	24,21	16,88	12,14	21,18	24,17	29,18	32,13
O	20,24	24,70	30,23	23,28	44,04	23,03	16,09	24,38	25,13	14,59	16,30
Na	0,60	0,66	0,97	0,90	0,62	0,62	0,25	0,62	0,79	0,42	0,91
Mg	0,72	0,47	0,60	1,36	0,83	0,43	0,10	0,37	0,48	0,20	0,54
Al	2,60	1,94	2,28	2,21	1,08	1,25	0,62	0,98	1,00	1,12	1,64
Si	6,31	5,68	5,33	7,72	2,78	3,87	2,37	2,46	2,15	2,99	2,75
S	0,40	0,46	0,41	0,35	0,15	0,26	0,18	0,20	-	-	-
K	5,40	2,42	2,19	5,27	1,26	5,62	4,56	2,86	2,32	2,64	1,48
Ca	44,91	50,24	43,52	42,64	24,34	44,76	59,76	44,26	41,75	36,51	41,91
Ti	0,45	-	0,03	-	-	0,24	-	-	-	0,56	-
Fe	7,44	1,28	0,96	1,83	0,70	2,31	2,54	1,90	1,25	2,32	0,66
Zn	-	-	-	-	-	0,72	1,38	0,80	0,95	9,47	1,68
Figura	C3.1.1	C3.1.2	C3.1.3	C3.1.4	C3.1.5	C3.1.6	C3.1.7	C3.1.8	C3.1.9	C3.1.10	C3.1.11

Figura C3.1 – Espectros EDS para Linha Imaginária a) - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).



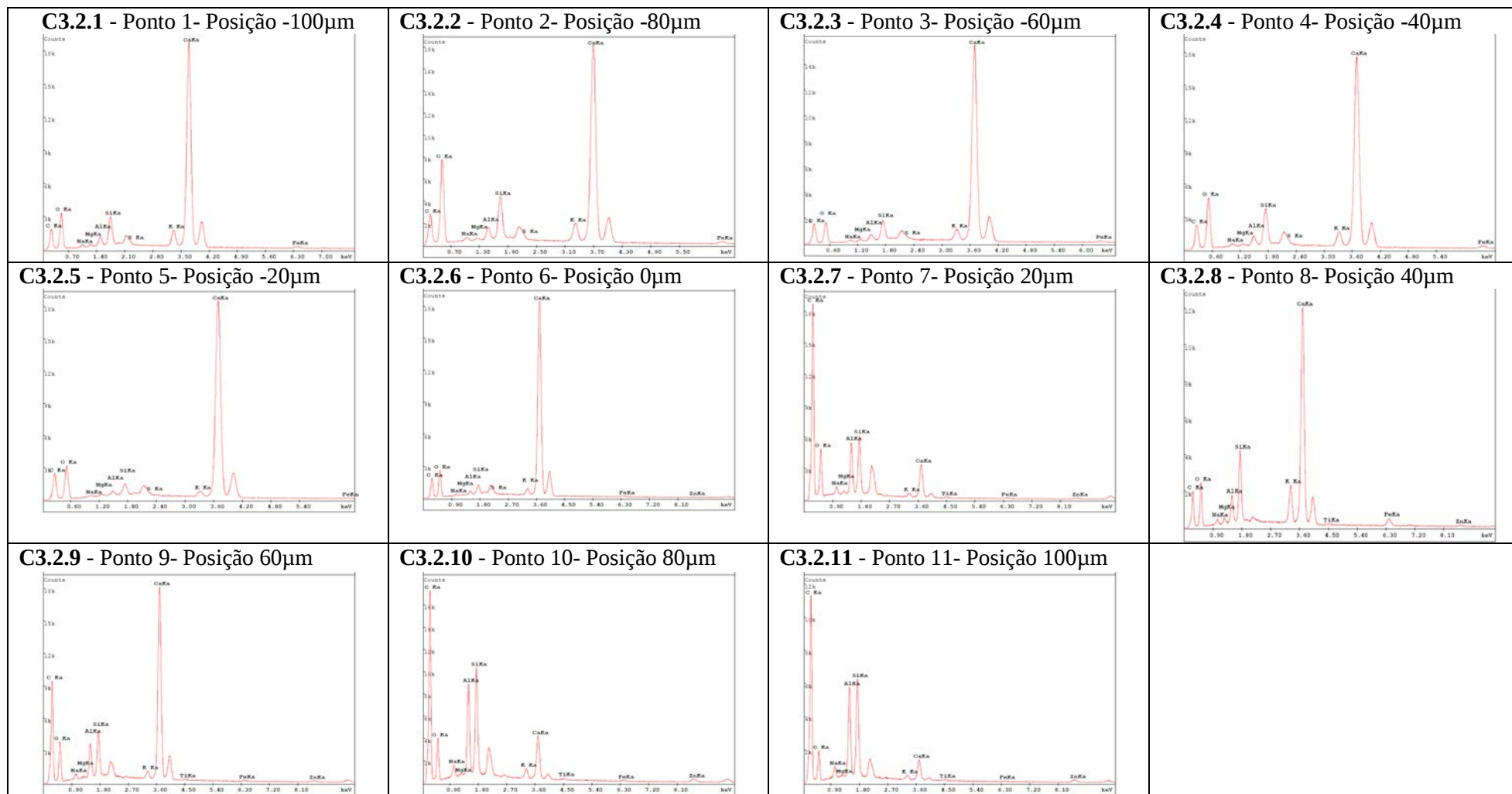
C.3 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).

C3.2 Linha Imaginária **b)** - imagem referente aos pontos das Figuras C3.2.1 a C3.2.11.



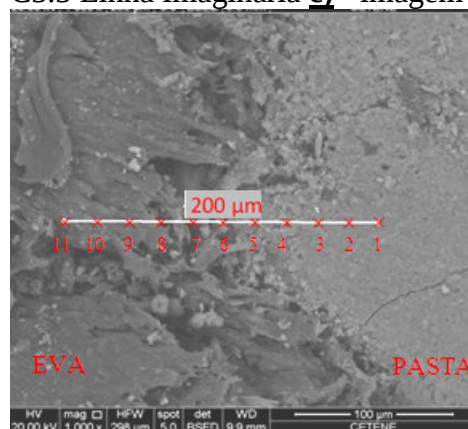
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	17,82	19,12	19,20	19,54	20,65	17,76	67,85	21,91	44,34	66,06	71,43
O	29,07	40,64	23,20	34,27	30,24	28,78	18,15	25,14	20,15	13,64	10,75
Na	1,17	1,30	0,74	1,16	0,47	0,93	0,75	0,96	1,06	0,98	0,94
Mg	0,87	0,72	0,58	0,67	0,50	0,49	0,15	0,73	0,45	0,14	0,12
Al	1,95	1,78	1,41	1,63	0,99	0,96	3,66	2,94	3,22	5,54	5,95
Si	4,40	4,49	3,47	4,76	1,98	1,85	3,85	6,77	3,81	6,10	6,25
S	0,75	0,30	0,47	0,41	0,47	0,32	-	-	-	-	-
K	2,94	2,33	2,37	2,30	1,18	1,37	0,39	4,79	0,87	0,88	0,42
Ca	39,92	28,40	47,60	33,89	43,10	46,31	3,88	32,49	24,57	4,27	2,21
Ti	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,14	0,25	0,23
Fe	1,12	0,92	0,96	1,37	0,42	0,46	0,28	3,01	0,32	0,25	0,23
Zn	-	-	-	-	-	0,77	0,92	1,11	1,07	1,89	1,46
Figura	C3.2.1	C3.2.2	C3.2.3	C3.2.4	C3.2.5	C3.2.6	C3.2.7	C3.2.8	C3.2.9	C3.2.10	C3.2.11

Figura C3.2 – Espectros EDS para Linha Imaginária **b)** - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).



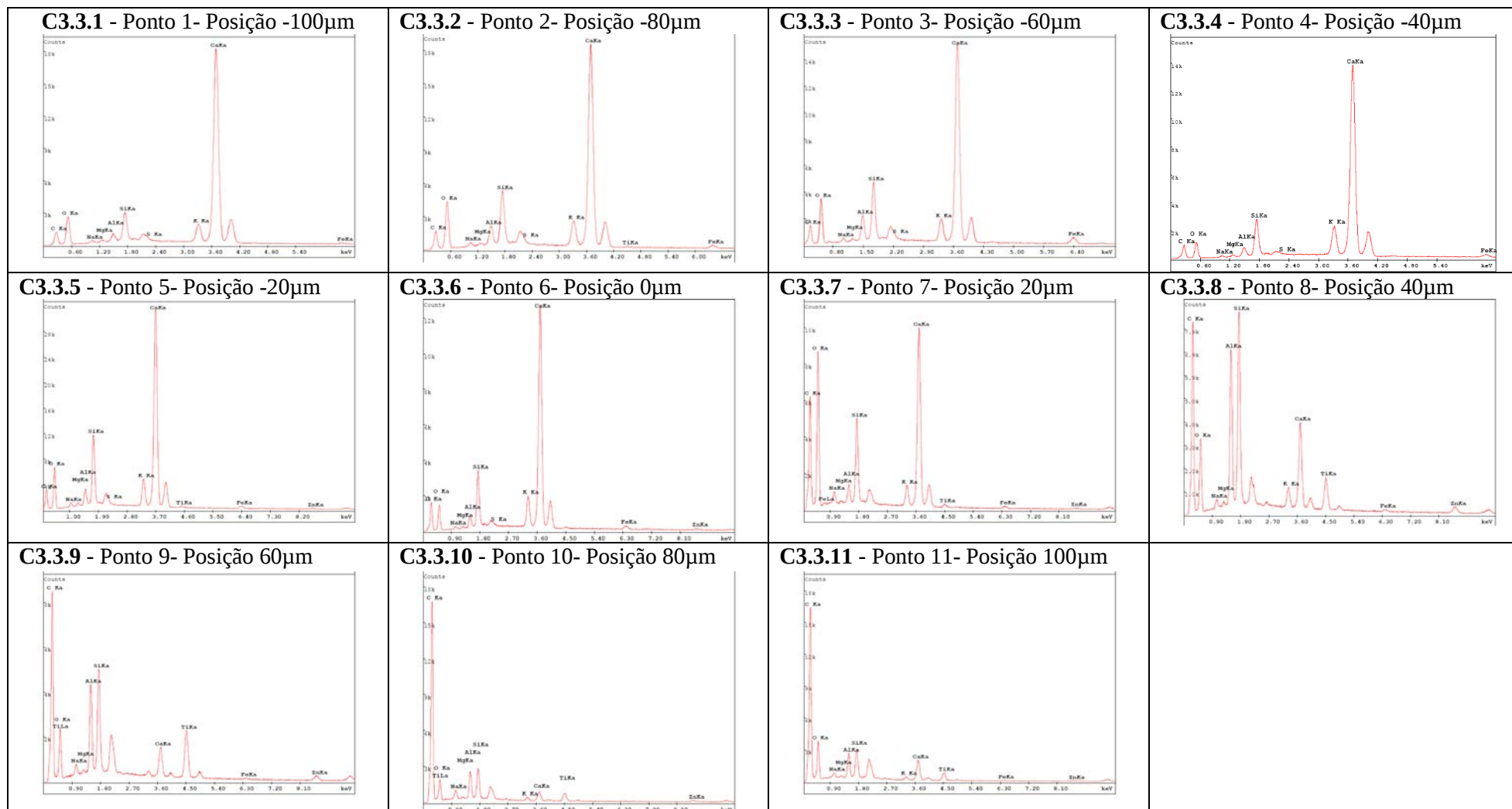
C.3 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).

C3.3 Linha Imaginária **c)** - imagem referente aos pontos das Figuras C3.3.1 a C3.3.11.



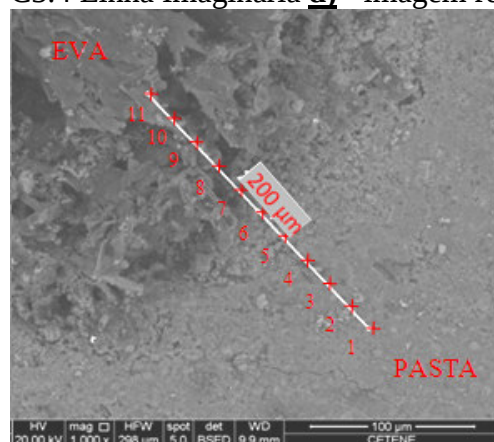
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100µm)	Ponto 2 (-80µm)	Ponto 3 (-60µm)	Ponto 4 (-40µm)	Ponto 5 (-20µm)	Ponto 6 (0µm)	Ponto 7 (20µm)	Ponto 8 (40µm)	Ponto 9 (60µm)	Ponto 10 (80µm)	Ponto 11 (100µm)
C	12,60	15,39	15,18	13,32	15,79	20,83	33,86	54,80	61,65	77,47	68,71
O	29,09	31,82	30,00	18,68	28,57	20,41	40,30	16,27	14,84	11,11	19,62
Na	0,72	1,29	1,25	0,49	1,34	0,40	1,26	0,55	0,83	1,15	0,69
Mg	0,41	0,71	0,75	0,42	0,84	0,14	0,14	0,18	0,23	0,12	0,11
Al	1,38	2,93	3,69	1,75	2,55	1,50	1,07	6,77	5,08	2,52	2,20
Si	4,61	6,67	6,77	6,02	8,24	6,44	4,41	7,95	5,61	2,55	2,47
S	0,18	0,34	0,44	0,24	0,34	0,16	-	-	-	-	-
K	3,73	3,80	3,53	6,40	4,21	4,87	1,61	1,27	-	0,41	0,43
Ca	46,52	35,45	35,25	50,58	35,96	41,99	15,95	5,74	2,59	1,32	3,06
Ti	-	0,15	-	-	0,22	-	0,35	3,14	6,12	1,77	1,79
Fe	0,77	1,45	3,15	2,09	1,28	1,83	0,53	0,45	0,30	-	0,22
Zn	-	-	-	-	0,67	1,43	0,53	2,88	2,74	1,59	0,70
Figura	C3.3.1	C3.3.2	C3.3.3	C3.3.4	C3.3.5	C3.3.6	C3.3.7	C3.3.8	C3.3.9	C3.3.10	C3.3.11

Figura C3.3 – Espectros EDS para Linha Imaginária c) - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).



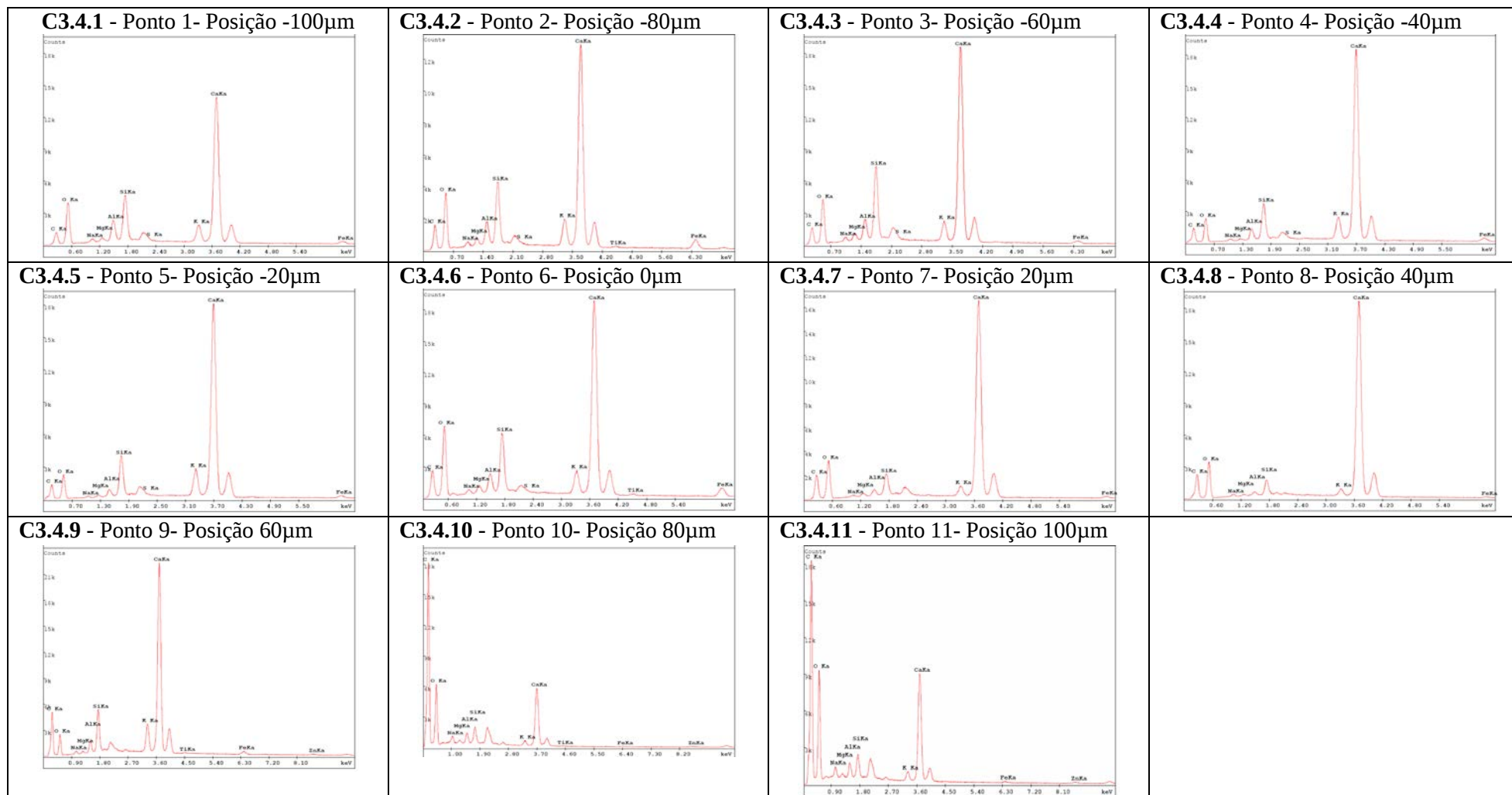
C.3 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).

C3.4 Linha Imaginária **d)** - imagem referente aos pontos das Figuras C3.4.1 a C3.4.11.



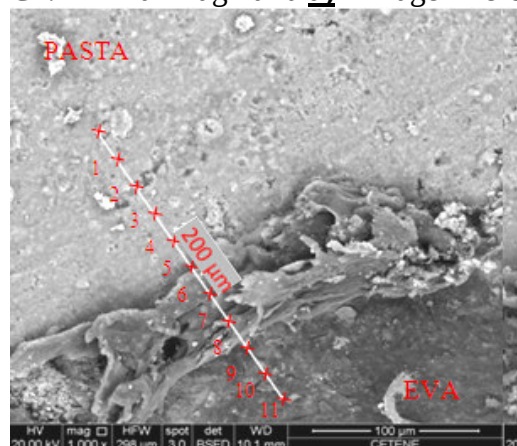
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	14,15	18,46	15,86	13,67	13,50	18,69	19,00	17,90	30,24	60,78	52,82
O	33,79	30,10	28,78	24,38	24,64	35,11	32,18	32,55	17,29	26,30	31,83
Na	1,48	1,37	1,45	0,62	0,62	1,33	0,55	0,82	0,81	0,93	1,08
Mg	1,13	1,38	1,56	0,37	0,55	1,37	0,57	0,40	0,42	0,27	0,26
Al	3,94	3,08	3,17	2,09	1,42	2,47	0,95	0,71	1,80	0,91	0,91
Si	7,51	6,91	9,15	5,64	6,12	6,14	3,00	2,15	5,17	1,26	1,25
S	0,36	0,40	0,41	0,27	0,39	0,27	-	-	-	-	-
K	3,38	3,57	3,02	4,66	5,40	2,88	1,80	1,34	4,60	0,55	0,76
Ca	32,57	30,62	34,23	46,24-	45,82	27,96	40,80	43,57	36,62	7,94	10,11
Ti	-	0,27	-	-	-	0,26	-	-	0,17	0,05	-
Fe	1,69	3,84	1,37	2,05	1,54	3,51	1,16	0,57	1,69	0,27	0,32
Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	1,21	0,73	0,66
Figura	C3.4.1	C3.4.2	C3.4.3	C3.4.4	C3.4.5	C3.4.6	C3.4.7	C3.4.8	C3.4.9	C3.4.10	C3.4.11

Figura C3.4 – Espectros EDS para Linha Imaginária **d)** - Mistura EVA100:SI (sem imersão prévia em água).



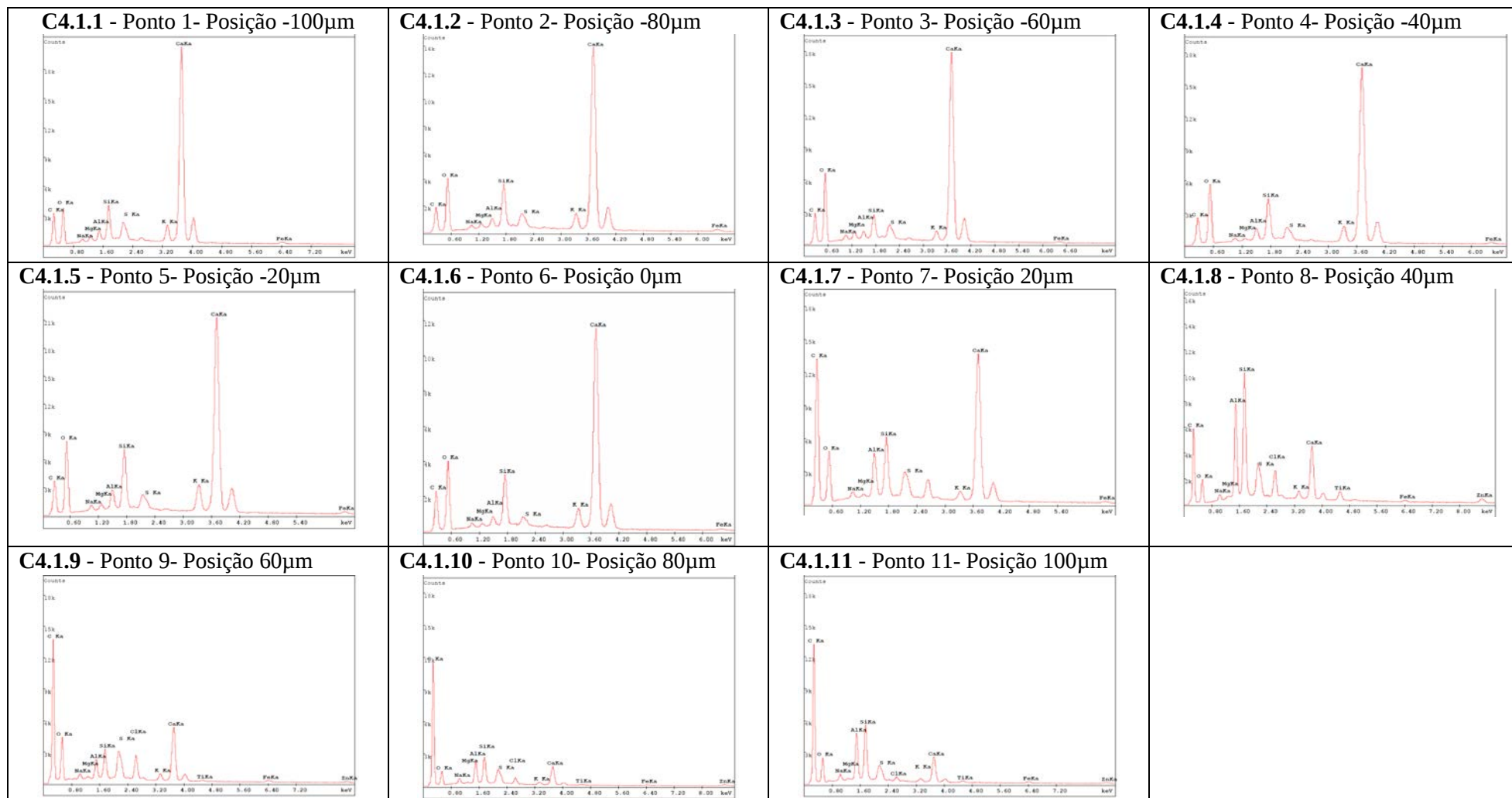
C.4 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).

C4.1 Linha Imaginária **a)** - imagem referente aos pontos das Figuras C4.1.1 a C4.1.11.



Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	23,72	18,79	19,50	19,72	20,66	23,22	53,30	54,12	62,20	73,96	69,17
O	25,31	32,48	37,10	34,45	33,57	33,70	19,15	9,23	18,06	9,55	11,93
Na	1,44	1,75	2,03	1,67	1,86	1,62	0,86	0,82	1,31	1,45	1,31
Mg	1,56	1,44	1,95	1,10	1,40	1,07	0,42	0,51	0,72	0,62	0,65
Al	1,85	1,85	1,59	2,10	2,57	1,56	3,19	7,41	1,88	2,84	4,27
Si	4,59	5,41	3,13	5,16	5,91	5,10	4,15	10,21	2,48	3,25	4,87
S	0,92	0,84	0,79	0,79	0,80	0,68	0,37	0,81	0,70	0,60	0,54
K	2,92	2,79	1,69	2,72	3,69	2,75	0,95	1,07	1,01	0,65	0,60
Ca	36,75	33,59	31,69	31,55	28,73	29,70	17,18	6,76	6,59	3,42	3,55
Ti	-	-	-	-	-	-	-	1,74	0,51	0,36	0,42
Fe	0,95	1,06	0,53	0,74	0,80	0,60	0,43	0,51	0,89	0,46	0,69
Zn	-	-	-	-	-	-	-	3,71	1,14	1,66	1,27
Figura	C4.1.1	C4.1.2	C4.1.3	C4.1.4	C4.1.5	C4.1.6	C4.1.7	C4.1.8	C4.1.9	C4.1.10	C4.1.11

Figura C4.1 – Espectros EDS para Linha Imaginária **a)** - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).



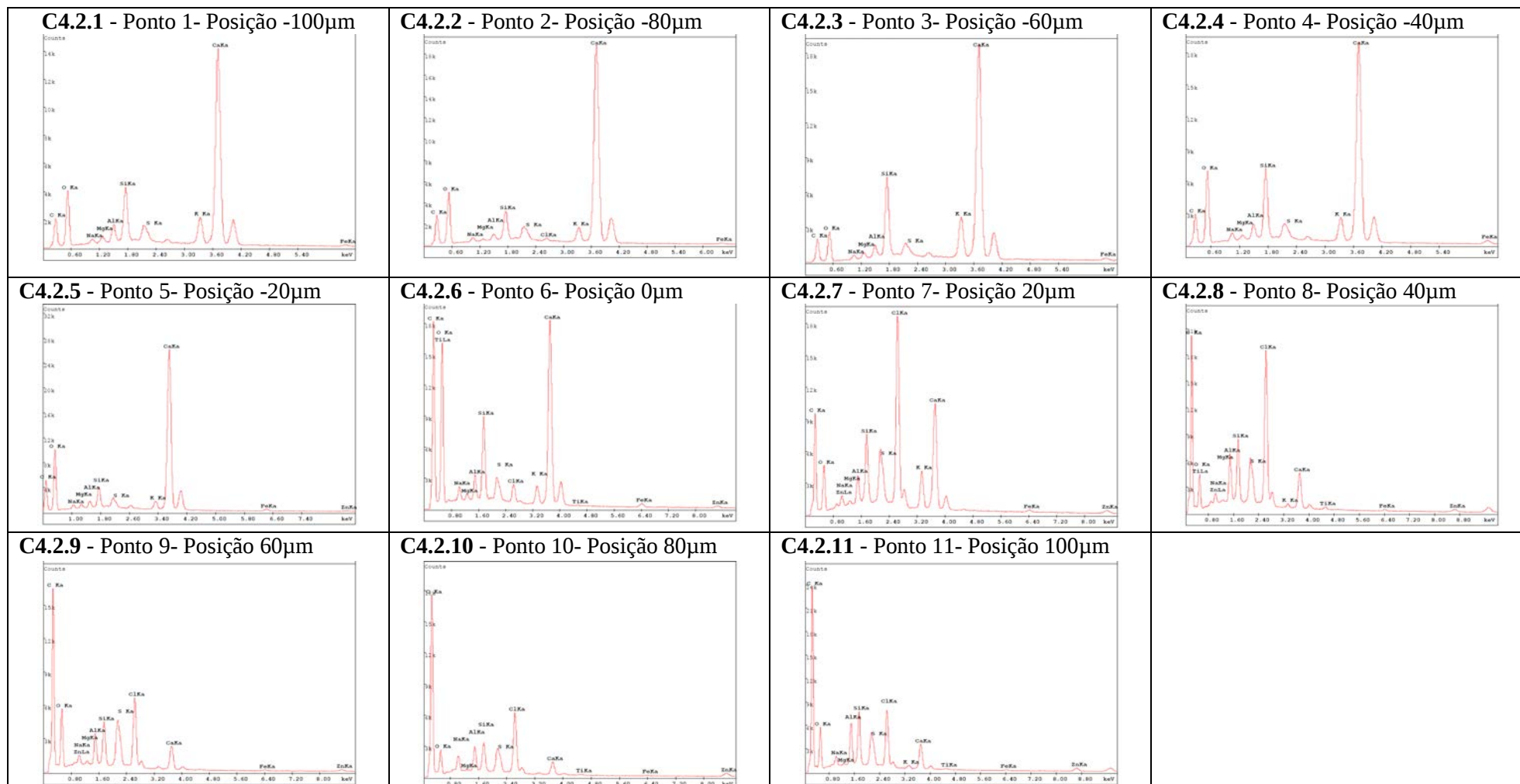
C.4 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).

C4.2 Linha Imaginária **b)** - imagem referente aos pontos das Figuras C4.2.1 a C4.2.11.



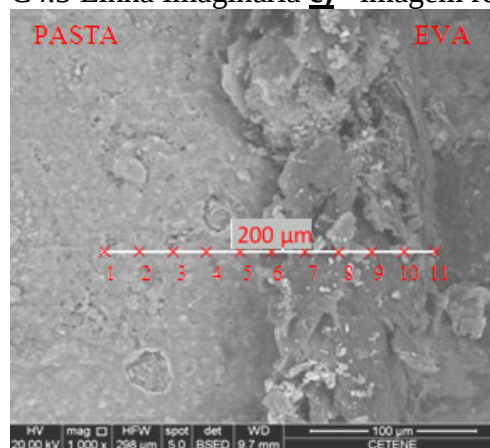
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100μm)	Ponto 2 (-80μm)	Ponto 3 (-60μm)	Ponto 4 (-40μm)	Ponto 5 (-20μm)	Ponto 6 (0μm)	Ponto 7 (20μm)	Ponto 8 (40μm)	Ponto 9 (60μm)	Ponto 10 (80μm)	Ponto 11 (100μm)
C	20,07	20,43	18,39	19,68	22,10	44,38	51,69	68,59	67,03	79,24	68,35
O	30,38	31,82	20,43	33,58	36,25	30,27	13,30	9,50	17,28	9,20	12,70
Na	1,81	1,79	1,46	2,27	1,83	1,76	0,99	0,58	0,53	2,04	1,45
Mg	1,59	1,04	1,34	1,33	1,39	0,89	0,96	0,78	0,81	0,65	0,66
Al	2,56	1,40	1,97	2,14	1,49	1,50	2,02	2,61	2,12	1,92	2,77
Si	6,06	3,75	9,01	6,70	2,99	3,62	3,77	3,12	2,63	2,06	3,21
S	0,94	0,86	1,06	0,88	0,69	0,57	1,11	0,72	0,73	0,57	0,70
K	4,02	2,49	6,60	3,28	1,59	1,40	3,03	0,46	-	-	0,54
Ca	31,94	35,14	38,62	28,80	29,94	12,22	8,66	2,74	2,25	1,57	2,41
Ti	-	-	-	-	-	0,32	-	0,32	-	0,33	0,43
Fe	0,63	0,49	1,14	1,35	0,92	0,84	0,83	0,31	0,45	0,33	0,45
Zn	-	-	-	-	0,82	1,00	1,68	1,37	1,21	2,26	2,07
Figura	C4.2.1	C4.2.2	C4.2.3	C4.2.4	C4.2.5	C4.2.6	C4.2.7	C4.2.8	C4.2.9	C4.2.10	C4.2.11

Figura C4.2 – Espectros EDS para Linha Imaginária **b)** - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).



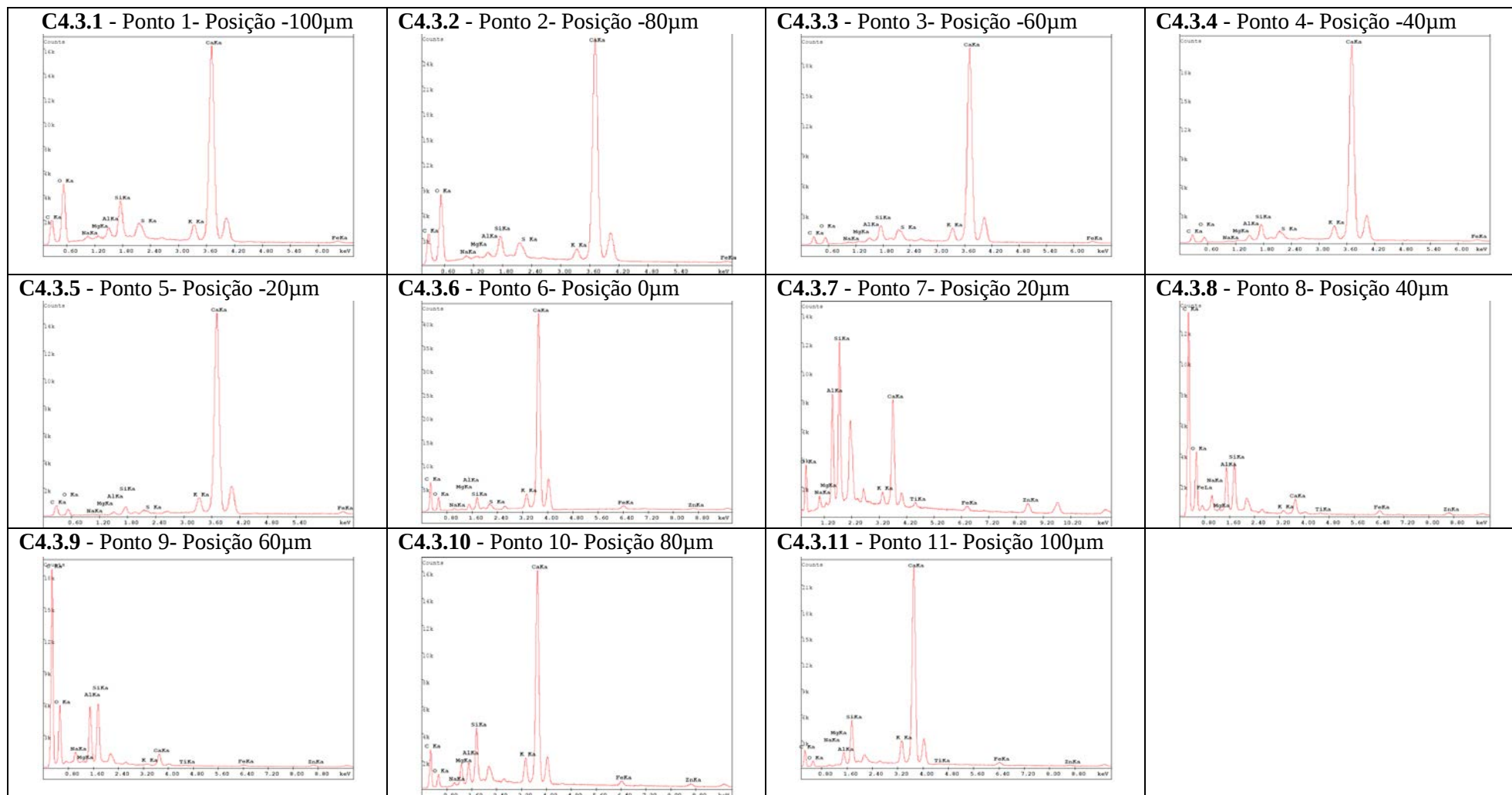
C.4 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).

C4.3 Linha Imaginária **c)** - imagem referente aos pontos das Figuras C4.3.1 a C4.3.11.



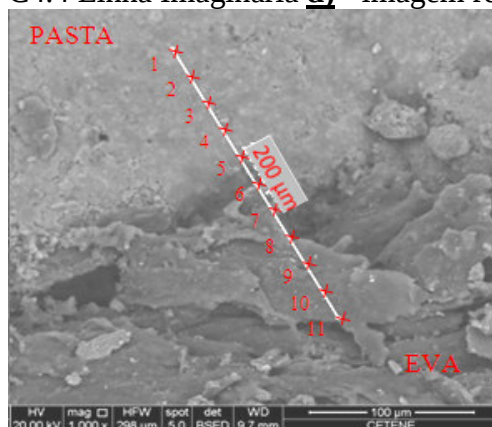
Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100µm)	Ponto 2 (-80µm)	Ponto 3 (-60µm)	Ponto 4 (-40µm)	Ponto 5 (-20µm)	Ponto 6 (0µm)	Ponto 7 (20µm)	Ponto 8 (40µm)	Ponto 9 (60µm)	Ponto 10 (80µm)	Ponto 11 (100µm)
C	18,32	18,87	9,95	9,99	11,91	24,41	58,53	66,60	66,71	29,37	17,92
O	36,13	38,18	11,24	8,90	10,65	15,23	11,26	19,78	19,56	9,40	7,25
Na	1,69	1,63	0,55	0,41	0,28	0,67	1,01	2,00	1,55	0,68	0,70
Mg	1,40	1,24	0,45	0,48	0,12	0,28	0,40	0,48	0,51	3,17	0,61
Al	2,20	1,45	1,24	1,66	0,58	1,09	5,52	3,08	3,95	2,77	2,65
Si	4,38	2,61	3,88	3,90	1,63	1,97	7,71	3,29	4,11	6,59	7,58
S	0,88	0,79	0,66	0,89	0,32	0,05	-	-	-	-	-
K	2,53	1,67	3,68	4,24	4,44	3,06	1,05	0,22	0,32	3,90	5,71
Ca	31,68	33,07	66,85	68,13	68,09	48,01	7,63	1,49	1,40	38,96	51,37
Ti	-	-	-	-	-	-	0,63	0,07	0,22	-	1,18
Fe	0,79	0,48	1,50	1,38	1,98	3,03	1,02	1,21	0,49	2,30	2,98
Zn	-	-	-	-	-	2,20	5,24	1,77	1,18	3,05	2,07
Figura	C4.3.1	C4.3.2	C4.3.3	C4.3.4	C4.3.5	C4.3.6	C4.3.7	C4.3.8	C4.3.9	C4.3.10	C4.3.11

Figura C4.3 – Espectros EDS para Linha Imaginária c) - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).



C.4 Zona de transição pasta de cimento (28 dias de hidratação) e agregado EVA - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).

C4.4 Linha Imaginária **d)** - imagem referente aos pontos das Figuras C4.4.1 a C4.4.11.



Elementos	Massa molecular (%)										
	Ponto 1 (-100µm)	Ponto 2 (-80µm)	Ponto 3 (-60µm)	Ponto 4 (-40µm)	Ponto 5 (-20µm)	Ponto 6 (0µm)	Ponto 7 (20µm)	Ponto 8 (40µm)	Ponto 9 (60µm)	Ponto 10 (80µm)	Ponto 11 (100µm)
C	19,55	22,23	20,56	19,95	17,80	21,51	59,49	55,06	72,02	68,55	64,10
O	36,03	34,43	37,81	30,88	17,92	19,55	17,56	26,85	11,05	11,31	13,54
Na	2,15	2,09	1,89	1,75	0,87	0,93	1,75	1,91	1,91	2,07	1,97
Mg	1,36	1,61	1,98	1,33	0,56	0,59	1,29	0,91	1,03	0,92	1,00
Al	2,48	2,89	5,22	2,34	1,00	1,01	2,90	1,78	3,18	4,07	3,61
Si	4,81	4,96	7,03	4,63	2,60	1,68	3,83	2,35	3,50	4,53	4,27
S	0,85	0,96	0,77	0,92	0,94	0,46	-	-	-	-	-
K	2,50	2,62	2,69	3,03	3,36	2,65	1,09	1,22	0,67	1,11	1,00
Ca	29,29	27,13	21,16	34,42	53,95	48,76	9,01	8,35	3,76	4,45	7,99
Ti	-	-	-	-	-	-	0,60	0,34	0,57	0,54	0,29
Fe	0,88	1,07	0,89	0,75	0,99	1,23	0,46	0,55	0,28	0,50	0,26
Zn	-	-	-	-	-	1,62	2,03	0,67	2,04	1,95	1,95
Figura	C4.4.1	C4.4.2	C4.4.3	C4.4.4	C4.4.5	C4.4.6	C4.4.7	C4.4.8	C4.4.9	C4.4.10	C4.4.11

Figura C4.4 – Espectros EDS para Linha Imaginária d) - Mistura EVA100:CI (com imersão prévia em água).

