

JOSÉ CARLOS ALVES GALVÃO

**USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO PARA SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS**

**Tese apresentada como requisito parcial
à obtenção de grau de Doutor. Área de
concentração: Engenharia e Ciência dos
Materiais, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciência dos Materiais -
PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade
Federal do Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Kleber F. Portella

CURITIBA

2010

TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ CARLOS ALVES GALVÃO

USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO PARA SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, PIPE - UFPR

Dr. Almir Sales
Departamento de Engenharia Civil - UFSCar

Dr. Milton Domingos Michel
Departamento de Engenharia de Materiais - UEPG

Dr^a. Helena Maria Wilhelm
DIAGNO Laboratório de Pesquisa e Meio Ambiente, PIPE - UFPR

Dr. Vitoldo Swinka Filho
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, PIPE - UFPR

Curitiba, 24 de setembro de 2010

À minha esposa Elaine e
aos meus filhos Ana Letícia e Matheus

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao bondoso Deus, pelo dom de apreender, pela saúde, energia e proteção que sempre existiram na minha vida.

Aos muitos colegas e amigos do PIPE, LACTEC, COPEL e UTFPR, pelas suas colaborações, participações e pelos momentos de alegria e descontração.

Aos coordenadores, professores, funcionários e ao secretário Edson do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, pelo seu trabalho de qualidade.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, representado pelo pesquisador e gerente Dr. Ricardo José Ferracin, pelo apoio na utilização dos laboratórios e viabilização dos serviços dos técnicos da instituição.

À Companhia Paranaense de Energia - COPEL e à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, pelos recursos financeiros empregados neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo provimento de bolsa de estudos.

Ao Prof. PhD Vsévolod Mymrine (Seva), pela participação na banca de defesa de projeto, além dos importantes ensinamentos oferecidos em suas aulas.

Ao Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, pelas participações nas bancas de defesa de projeto, qualificação e defesa de tese e, principalmente, por levar-me a observar os fatos de uma forma científica.

À Prof^a. Dr^a. Helena Maria Wilhelm, pelas diversas colaborações e participação nas bancas de qualificação de defesa de tese.

Aos professores doutores Almir Sales e Milton Domingos Michel, pela participação na banca de defesa de tese e suas contribuições no trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Kleber Franke Portella, que repartiu comigo seus conhecimentos, demonstrando as ferramentas com as quais executamos este trabalho.

Agradeço, especialmente, a toda minha família que sempre esteve ao meu lado, neste, e em todos os momentos da minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo Geral	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	5
1.4. PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO ESTUDO	6
1.4.1. Artigos Completos Publicados em Periódicos	6
1.4.2. Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos	6
1.4.3. Artigos Aceitos para Publicação em Periódicos	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE	8
2.2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	10
2.3. ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS AO CONCRETO.....	12
2.3.1. Polietileno Tereftalato	13
2.3.2. Polietileno de Baixa Densidade.....	16
2.3.3. Borracha de Pneus Inservíveis.....	18
2.3.4. Propriedades do Concreto com Adição de Plásticos Reciclados.....	20
2.3.4.1. Propriedades do concreto fresco	21
2.3.4.2. Propriedades do concreto endurecido	23
2.3.5. Propriedades do Concreto com Adição de Borracha de Pneus Inservíveis	27
2.4. DURABILIDADE E RECUPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	30
2.4.1. Classificação das Causas da Deterioração do Concreto	33
2.4.1.1. Causas físicas da deterioração do concreto	33
2.4.1.2. Causas químicas da deterioração do concreto	34
2.4.1.3. Causas biológicas da deterioração do concreto.....	37
2.4.2. Corrosão das Armaduras de Aço	38
2.4.2.1. Técnica de Potenciais de Corrosão	38
2.4.3. Reparos de Estruturas de Concreto	39

2.4.3.1. Reparos em estruturas hidráulicas	41
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.1. ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO	43
3.2. SELEÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA ADIÇÃO EM CONCRETO	44
3.2.1. Análise Preliminar dos Teores Adicionados ao Concreto	45
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	46
3.3.1. Estudo de Dosagem.....	47
3.4. EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS DA UHE MOURÃO.....	47
3.4.1 Reparo dos Pontos de Extração.....	48
3.5. DOSAGENS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS	48
3.6. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA.....	51
3.6.1. Ensaios de Resistência de Aderência na Superfície de Corte	51
3.6.2. Ensaios de Resistência de Aderência na Superfície de Fratura	54
3.6.3. Avaliação da Ponte de Aderência	55
3.7. APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO NO VERTEDOURO DA UHE MOURÃO.....	56
3.7.1. Seleção dos Pontos de Aplicação	56
3.7.2. Cortes e Escarificação	58
3.7.3. Dosagens dos Concretos Aplicados como MR.....	59
3.7.4. Aplicações dos Materiais de Reparo	63
3.8. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	65
3.8.1. Preparo das Barras Metálicas	66
3.8.2. Preparo dos Corpos de Prova Prismáticos.....	68
3.8.3. Ensaios de Envelhecimento Acelerado em Câmara Úmida.....	68
3.8.4. Ensaios de Envelhecimento por Imersão em Solução de Na ₂ SO ₄ e NaCl	69
3.9. POTENCIAL DE CORROSÃO.....	69
3.10. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	70
3.11. ENSAIOS DE ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO	71
3.11.1. Avaliação do Desgaste de Superfície nos Ensaios de Resistência à Abrasão pelo Método Submerso.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	74
4.1.1. Cimento	74
4.1.2. Agregados	74
4.1.2.1 Agregado graúdo.....	74

4.1.2.2 Agregado miúdo	77
4.1.3. Materiais Poliméricos Reciclados	78
4.1.4. Fibras Poliméricas Industrializadas	80
4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS TESTEMUNHOS DA UHE MOURÃO	80
4.3. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	81
4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO	83
4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO	87
4.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	89
4.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura dos Testemunhos da UHE Mourão	89
4.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura dos Concretos com Adição Materiais Poliméricos Reciclados	91
4.7. RESISTÊNCIA À ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO	96
4.7.1. Avaliação do Desgaste de Superfície nos Ensaio de Resistência à Abrasão pelo Método Submerso	97
4.8. POTENCIAL DE CORROSÃO	106
4.8.1. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Banho de Na_2SO_4	106
4.8.2. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Banho de NaCl	109
4.8.3. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Água Destilada	112
4.8.4. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos em Câmara Úmida com SO_2	114
4.9. DESEMPENHO DOS MATERIAIS DE REPARO APLICADOS EM CAMPO	116
4.10. QUADRO RESUMO DO DESEMPENHO DOS MATERIAIS DE REPARO	122
5. CONCLUSÕES	123
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PREOCUPAÇÕES DOS LÍDERES DO SETOR DE CONSTRUÇÃO CIVIL.	8
FIGURA 2 - GARRAFAS PET LANÇADAS NA NATUREZA.	14
FIGURA 3 – SACOLAS PEBD LANÇADAS NA NATUREZA.	17
FIGURA 4 – PNEUS INSERVÍVEIS LANÇADOS NA NATUREZA.	19
FIGURA 5 – DURABILIDADE E DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (FONTE: CEB, 1985).	31
FIGURA 6 – DURABILIDADE, DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (FONTE: CEB, 1985).	32
FIGURA 7 – CAUSAS FÍSICAS DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO (FONTE: MEHTA E MONTEIRO, 2008).....	34
FIGURA 8 – SISTEMA DE REPARO: SUBSTRATO/MR.	40
FIGURA 9 - DETALHE DO DESPLACAMENTO E CARBONATAÇÃO (A). NINHO DE CONCRETAGEM (B).	43
FIGURA 10 - AMOSTRA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PEBD AGLUTINADO (A). PET MOÍDO (B).	44
FIGURA 11 - AMOSTRA DE FIBRAS DE PNEU.....	45
FIGURA 12 - PONTOS DE FIXAÇÃO E PERFURAÇÃO (A). DETALHE DOS CORPOS-DE- PROVA (B).	48
FIGURA 13 - MISTURA DO CONCRETO COM PEBD ANTES (A) E APÓS ADIÇÃO DA ÁGUA DE AMASSAMENTO (B).....	49
FIGURA 14 - CORPOS-DE-PROVA COM ELEVADO TEOR MATERIAL POLIMÉRICO RECICLADO E ADITIVO PLASTIFICANTE APÓS DESFORMA.....	50
FIGURA 15 - LUVA SIMPLES DE ESGOTO COM A ALÇA DE ENGATE CORTADA (A). PREENCHIMENTO DOS ESPAÇOS E FIXAÇÃO COM COLA DE SILICONE TRANSPARENTE (B).	52
FIGURA 16 - APLICAÇÃO DE PONTE DE ADERÊNCIA DE RESINA EPÓXI (A). SUPERFÍCIE APÓS APLICAÇÃO DE PONTE DE ADERÊNCIA DE ADESIVO ACRÍLICO (B).....	53
FIGURA 17 - RETIRADA DA COLA DE SILICONE COM USO DE ESTILETE (A).RETIRADA DO MOLDE (B).	53
FIGURA 18 - DETALHE DO CP PREPARADO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (A). CONJUNTO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO (B).	54
FIGURA 19 - CORTE NO COMPRIMENTO (A). MARCAÇÃO DA ALTURA DE CONCRETAGEM (B).	55
FIGURA 20 - IDENTIFICAÇÃO DAS PATOLOGIAS SUPERFICIAIS E ESCOLHA DOS PONTOS DE APLICAÇÃO	57
FIGURA 21 - LIMITAÇÃO DAS ÁREAS COM MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS SUPERFICIAIS (A). IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS E DO TIPO DE MR A SER APLICADO (B).	58
FIGURA 22 - CORTE COM SERRA DE DISCO NA ÁREA LIMITADA (A). ESCARIFICAÇÃO DO PONTO (B). EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS PROCEDIMENTOS DE CORTE E ESCARIFICAÇÃO (C). PONTOS PREPARADOS PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL DE REPARO (D).	59
FIGURA 23 - SISTEMA DE TRANSPORTE VERTICAL DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS (A). DETALHE DA FIXAÇÃO DE BASE DO GUINDASTE À BARRAGEM (B).....	60
FIGURA 24 - APLICAÇÃO DA PONTE DE ADERÊNCIA (A). LANÇAMENTO DO MR (B).	64
FIGURA 25 - VERTEDOURO DA BARRAGEM DA UHE MOURÃO COM DESTAQUE NOS PONTOS DE APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO ESTUDADOS.	65
FIGURA 26 - CPS COM MR E BARRAS METÁLICAS SIMULANDO A ARMADURA EM CONCRETOS ARMADOS PARA OS TESTES DE POTENCIAL DE CORROSÃO E EIS.....	66
FIGURA 27 - CPS COM MR E BARRAS METÁLICAS SIMULANDO A ARMADURA EM CONCRETOS ARMADOS PARA OS TESTES DO POTENCIAL DE CORROSÃO.....	68

FIGURA 28 – ESQUEMA DE CONEXÃO ELÉTRICA DOS ELETRODOS (FONTE: JOUKOSKI, 2003).....	70
FIGURA 29 - PREPARAÇÃO DOS CPS PARA O TESTE DE ABRASÃO (A). LANÇAMENTO E ADENSAMENTO DO CONCRETO (B). ALISAMENTO DA SUPERFÍCIE (C). SUBSTRATO PREPARADO PARA RECEBER O MR (D).....	72
FIGURA 30 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DO AGREGADO GRAÚDO.....	76
FIGURA 31 - EXPANSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O ENSAIO DE REATIVIDADE ENTRE O AGREGADO GRAÚDO E O CIMENTO CP II – Z 32.	77
FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.	77
FIGURA 33 - EXPANSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O ENSAIO DE REATIVIDADE ENTRE O AGREGADO MIÚDO E O CIMENTO CP II – Z 32.	78
FIGURA 34 - TESTEMUNHOS DE CONCRETO DA UHE MOURÃO.	80
FIGURA 35 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA. RUPTURA NO SUBSTRATO (A). RUPTURA LIGAÇÃO ENTRE O CORPO DE PROVA E A PLACA METÁLICA (B)	82
FIGURA 36 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PEBD RECICLADO	84
FIGURA 37 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PET RECICLADO	84
FIGURA 38 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PNEU RECICLADO	85
FIGURA 39 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS E SEUS RESPECTIVOS TEORES, AOS 28 DIAS.....	86
FIGURA 40 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS E SEUS RESPECTIVOS TEORES.	87
FIGURA 41 - GRÁFICO DA RELAÇÃO RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS E SEUS RESPECTIVOS TEORES.....	88
FIGURA 42 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO A. PORO COM FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). SUPERFÍCIE COM MICROTRINCA OCASIONADA POR EXPANSÃO (B).....	89
FIGURA 43 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO B. PORO COM FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). PORO COM MICROTRINCA. (B).	90
FIGURA 44 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO C. REGIÃO APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). SUPERFÍCIE DE FRATURA APRESENTANDO FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (B).	91
FIGURA 45 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE FIBRAS DE PNEU. MICROGRAFIA APRESENTANDO CRISTAIS DE ETRINGITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).	92
FIGURA 46 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE FIBRAS DE PNEU. MICROGRAFIA APRESENTANDO FIBRA, AGREGADO E CRISTAIS (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).	92
FIGURA 47 - DETALHE DA FIBRA DE PET NA AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET MOÍDO (A). DETALHE DA INTERFACE ENTRE A FIBRA DE PET MOÍDO E O CONCRETO (B).	93
FIGURA 48 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET MOÍDO. MICROGRAFIA APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA E CRISTAIS DE CALCITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).....	94
FIGURA 49 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET. MICROGRAFIA APRESENTANDO CRISTAIS DE ETRINGITA, CSH E GIPSITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).	94
FIGURA 50 - DETALHE DA FIBRA DE PEBD AGLUTINADO ADICIONADO AO CONCRETO NO TEOR DE 5%, APRESENTANDO MICROFISSURAS NA SUPERFÍCIE DE FRATURA.	94

FIGURA 51 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PEBD AGLUTINADO. MICROGRAFIA APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).	95
FIGURA 52 – FOTOGRAFIA DO CP APÓS O ENSAIO DE ABRASÃO CONSTITUÍDO PELO SUBSTRATO E MR. CONCRETO DE REFERÊNCIA (A). CONCRETO COM ADIÇÃO DE PEBD NO TEOR DE 5% (B).	98
FIGURA 53 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR CONCRETO DE REFERÊNCIA.	99
FIGURA 54 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PNEU A 2,5%.	99
FIGURA 55 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PNEU A 5%.	100
FIGURA 56 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PET A 2,5%.	100
FIGURA 57 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PET A 5%.	101
FIGURA 58 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PEBD A 2,5%.	101
FIGURA 59 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PEBD A 5%.	102
FIGURA 60 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM MICROFIBRA COMERCIAL DE PE E PET.....	102
FIGURA 61 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR CONFECCIONADO COM O CONCRETO COM A ADIÇÃO DAS FIBRAS COMERCIAIS MULTIFILAMENTO DE PP.....	103
FIGURA 62 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM FIBRAS COMERCIAIS CORRUGADAS DE PET.	103
FIGURA 63 – DETALHE DOS CORPOS DE PROVA COM PRESENÇA DE MATERIAL POLIMÉRICO NA SUPERFÍCIE DE DESGASTE. PNEU (A). PET (B). PEBD (C)	104
FIGURA 64 – ESQUEMA DA FORMAÇÃO DA ZONA DE SOMBRA NOS CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FONTE: HORSZCZARUK, 2009).	105
FIGURA 65 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.	107
FIGURA 66 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.	107
FIGURA 67 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR	108
E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.	108
FIGURA 68 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.	109
FIGURA 69 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.	110
FIGURA 70 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR	111
E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.	111
FIGURA 71 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA	112

FIGURA 72 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA	113
FIGURA 73 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO ÁGUA DESTILADA.	113
FIGURA 74 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM ADIÇÕES EM CÂMARA ÚMIDA COM SO ₂ A 0,07%	115
FIGURA 75 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 1, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO DE REFERÊNCIA SEM ADIÇÕES (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B)...	117
FIGURA 76 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 2, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRA COMERCIAL MULTIFILAMENTO DE PP (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	117
FIGURA 77 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 3, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PEBD 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	117
FIGURA 78 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 4, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRA COMERCIAL CORRUGADA DE PET (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	118
FIGURA 79 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 5, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	118
FIGURA 80 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 6, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PNEU 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	118
FIGURA 81 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 7, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PEBD 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	119
FIGURA 82 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 8, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	120
FIGURA 83 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 9, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PNEU 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO, APRESENTAÇÃO DE FISSURA COM CARBONATAÇÃO (B).....	121
FIGURA 84 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 10, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MICROFIBRA DE PE E PET. (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).	121

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – GERAÇÃO DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO NO BRASIL	16
TABELA 2 – RECICLAGEM DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO POR TIPOLOGIA NO BRASIL ..	16
TABELA 3 – PROPRIEDADE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE AGREGADO LEVE DE RESÍDUOS DE GARRAFAS PET.....	22
TABELA 4 – PROPRIEDADE DO CONCRETO FRESCO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PP.....	22
TABELA 5 – PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL.....	39
TABELA 6 – ANÁLISES QUÍMICAS DO CIMENTO.	46
TABELA 7 – ALISES FÍSICAS DO CIMENTO.	46
TABELA 8 – ANÁLISES QUÍMICAS DO CIMENTO.	47
TABELA 9 – TEOR DE ADITIVO PLASTIFICANTE E ABATIMENTO NA MISTURA COM 10% DE PEBD.....	50
TABELA 10 – TIPOS DE PONTE DE ADERÊNCIA APLICADOS.	55
TABELA 11 – DOSAGEM 1 - PEBD (2,5%) E DOSAGEM 2 - PET (2,5%), VOLUME DE 60 LITROS.	61
TABELA 12 – DOSAGEM 3 - FIBRA DE PNEU (2,5%), VOLUME DE 45 LITROS	61
TABELA 13 – DOSAGEM 4 - FIBROMAC 12, VOLUME DE 45 LITROS	61
TABELA 14 – DOSAGEM 5 - FIBRA PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS	62
TABELA 15 – DOSAGEM 6, CONCRETO DE REFERÊNCIA, VOLUME DE 45 LITROS.....	62
TABELA 16 – DOSAGEM 7 - FIBRA PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS	62
TABELA 17 – DOSAGEM 8 - FIBRA PET (5,0%), DOSAGEM 9 – PNEU (5,0%) E DOSAGEM 11 – PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS	62
TABELA 18 – DOSAGEM 10 - FIBRA CORRUGADA PET, VOLUME DE 40 LITROS	62
TABELA 19 – DOSAGEM 12 - MULTIFILAMENTO DE POLIPROPILENO, VOLUME DE 40 LITROS	63
TABELA 20 – DOSAGEM 13 - MICROFIBRA DE PET E PE, VOLUME DE 40 LITROS	63
TABELA 21 – DADOS COMPLEMENTARES DAS DOSAGENS	63
TABELA 22 – ENSAIOS FÍSICOS DO CIMENTO CP II – Z 32.....	74
TABELA 23 – ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO CP II – Z 32.	74
TABELA 24 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO.	75
TABELA 25 – MINERAIS CONSTITUINTES DO AGREGADO GRAÚDO.....	76
TABELA 26 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO GRAÚDO.	76
TABELA 27 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO MIÚDO.	78
TABELA 28 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS RECICLADOS.	79
TABELA 29 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS E DA AREIA.....	79
TABELA 30 – PROPRIEDADES DAS FIBRAS COMERCIAIS.	80
TABELA 31 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO GRAÚDO.	81
TABELA 32 – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA ENTRE SUBSTRATO E MR.....	82
TABELA 33 – ANÁLISE QUÍMICA SEMIQUANTITATIVA DA COMPOSIÇÃO PEBD A 5%, EM PESO, POR EDS.	95
TABELA 34 – PERDA DE MASSA PERCENTUAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO.	96
TABELA 35 – VALORES DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM ADIÇÕES DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS E FIBRAS COMERCIAIS POLIMÉRICAS.....	116
TABELA 36 – RESUMO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REPARO.....	122

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c	- água/cimento
ACI	- <i>American Concrete Institute</i>
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANIP	- Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
APME	- <i>Association of Plastics Manufactures in Europe</i>
ASCE	- <i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	- Concreto Asfáltico
CAB	- Concreto com Adição de Borracha
CAD	- Concreto de Alto Desempenho
CADRF	- Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras
CEB	- <i>Comité Euro-Internacional du Béton</i>
CEFI	- <i>Civil Engineering Forum for Innovation</i>
CERF	- <i>Civil Engineering Research Foundation</i>
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
CP	- Corpo de Prova
CRF	- Concreto Reforçado com Fibras
CRFP	- Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
DMC	- Dimensão Máxima Característica
E_{corr}	- Potencial de Corrosão
EDS	- Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X
ESC	- Eletrodo de Cobre/Sulfato de Cobre
FTIR	- Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME	- Laboratório de Materiais Estruturas
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	- Material de Reparo
NBR	- Norma Brasileira

OCP	- <i>Open Circuit Potential</i>
PEAD	- Polietileno de Alta Densidade
PEBD	- Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	- Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	- Polietileno Tereftalato
PS	- Poliestireno
PVC	- Cloreto de Polivinila
UHE	- Usina Hidroelétrica

RESUMO

O presente trabalho apresenta a proposta de ser aplicado o concreto com adição de materiais reciclados como material de reparo (MR) de superfícies hidráulicas. A Usina Hidroelétrica Mourão, localizada no município de Campo Mourão – PR inaugurada em 1964, foi objeto de estudo de campo. Nas inspeções realizadas constatou-se que o vertedouro apresentava defeitos devidos a prováveis efeitos erosivos, resultando em deslocamento superficial e necessitando da aplicação de MR. Para definir o MR foram realizadas misturas de concreto com adição dos seguintes materiais reciclados: polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET) e fibras de pneus inservíveis, em diferentes teores (0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 7,5%), em substituição parcial do agregado miúdo. Estas misturas foram comparadas com um concreto sem adições considerado o concreto de referência (CR). Os concretos com adição de materiais reciclados e o CR foram avaliados em laboratório quanto às suas propriedades mecânicas de resistência à compressão, tração por compressão diametral e aderência. A partir dos resultados de laboratório foram selecionados os concretos com os teores de 2,5 e 5,0% para aplicação em campo. Além dos concretos com adição de materiais reciclados foram aplicados em campo o CR e três tipos de concretos reforçados com fibras comerciais: multifilamento de PP, corrugada de PET e microfibra de PE e PET. Todos os materiais aplicados em campo foram analisados em ensaios de resistência à abrasão pelo método submerso e em ensaios de envelhecimento acelerado realizados em câmara úmida com SO₂ e nos banhos por imersão em NaCl, Na₂SO₄ e água destilada, onde os corpos de prova submetidos ao envelhecimento foram acompanhados pela técnica de potencial de corrosão. Os resultados laboratoriais e de campo indicaram que os concretos com a adição dos materiais poliméricos estudados podem ser empregados como MRs de superfícies hidráulicas degradadas proporcionando um desempenho satisfatório e com custo menor se comparados com os materiais geralmente empregados nestes casos, com a vantagem de se obter uma destinação final adequada destes resíduos sólidos.

Palavras-chave: Concreto, Material de Reparo, Reciclagem, Superfícies Hidráulicas, Meio Ambiente.

ABSTRACT

In this work is presented a proposal of being applied as repair material (RM) of hydraulic surfaces the concrete with addition of recycled materials. The Mourão Hydroelectric Power Plant dam, located in the city of Campo, in the State of Paraná opened in 1964, was the subject of field study. The inspections carried out revealed that the spillway had defects due to possible effects of erosion and with requiring the application of RM. To selection the MR were utilized mixtures of concrete with addition of the following recycled materials: low density polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET) fibers and scrap tires at different contents (0.5, 1.0, 2.5, 5, 0 and 7.5%), in partial replacement of fine aggregate. These mixtures were compared with a concrete without additions considered the reference concrete (RC). Mixtures with added recycled material and RC were analyzed in the laboratory in the mechanical properties of compressive strength, splitting tensile strength and grip. Considering the results of the laboratory were selected for field application the concretes with contents of 2.5 and 5.0%. Besides the concretes with addition of recycled materials were applied in field RC and three types of concretes reinforced with commercial fibers. The materials used in the field were examined in tests of abrasion resistance of concrete (underwater method) and accelerated aging tests performed in a moist chamber with SO₂ and baths by immersion in NaCl, Na₂SO₄ and distilled water, where the specimens were followed by the technique of the corrosion potential. The results of laboratory and field studies indicated that the concrete with addition of polymeric materials can be used as RM of degraded hydraulic surface providing satisfactory performance.

Keywords: Concrete, repairing material, recycled, hydraulic surfaces, environment.

1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidroelétrica Mourão (UHE Mourão) localizada no Rio Mourão, no Município de Campo Mourão, estado do Paraná, região sul do Brasil, foi inaugurada em 1964. Em funcionamento há 46 anos esta usina possui, atualmente, potência instalada de 8,2 MW. A UHE Mourão atendeu isoladamente 15 municípios na região centro-oeste paranaense. Depois, com a interligação do sistema elétrico do Paraná, passou a fazer parte do parque gerador da Companhia Paranaense de Energia (Copel).

A barragem da UHE Mourão é de concreto gravidade, tem comprimento na crista de 193 m e altura máxima de 19 m. O vertedouro é do tipo crista livre.

Com mais de 40 anos de operação e vida útil, a superfície de concreto da barragem vem indicando diversas patologias (PORTELLA *et al.*, 2008a). Inspeções da estrutura de concreto da barragem acontecem sistematicamente desde o ano de 1999. Recentemente, a patologia mais manifestada foi a degradação da superfície hidráulica do vertedouro da barragem. Na inspeção visual constatou-se o deslocamento das camadas de revestimento da barragem e a formação de carbonato de cálcio, originando a patologia denominada de carbonatação (GALVÃO, *et al.*, 2009a).

Sendo necessária a operação de reparos na estrutura vertente da barragem, indicou-se a aplicação de material de reparo (MR) composto de concreto. A vantagem na escolha desse tipo de MR constata-se na compatibilidade entre substrato e o MR. O MR deve ter características compatíveis com o meio ambiente e com o substrato de forma que a ancoragem seja perfeita e tenha durabilidade (GALVÃO *et al.*, 2008a). O MR pode ser o concreto convencional, o mesmo da estrutura da base, aplicado como reparo ou, em outros casos, pode ser indispensável o uso de material com melhor desempenho (GALVÃO *et al.*, 2009a).

Na literatura são encontradas muitas propostas de aplicações de MR em estruturas hidráulicas. KORMANN *et al.* (2003) realizaram estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens, testando como MR a argamassa epoxídica, a argamassa polimérica, a argamassa com sílica ativa e o concreto com fibras de aço. LEONARDO

(2002) analisou o concreto de alto desempenho, visando aplicação em reparos estruturais, enquanto LATORRE (2002) estudou argamassas para reparos de estruturas de concreto sujeitas à abrasão em locais com elevada umidade.

Tratando-se de vertedouros de barragens, estes estão sujeitos a solicitações de ordem dinâmica devido ao escoamento da água em alta velocidade. Essas estruturas, geralmente, estão submetidas à erosão, cavitação e abrasão (ACI, 1999), fissuras causadas pela pressão de cristalização de sais nos poros (TAMBELLI *et al.*, 2006) e pela exposição a agentes agressivos (IRASSAR *et al.*, 2002).

HORSZCZARUK (2004 e 2008) realizou diversas pesquisas dos efeitos de desgastes por abrasão em concretos. HORSZCZARUK (2005) concluiu que a adição de fibras poliméricas pode contribuir para o aumento da resistência à abrasão de concretos de alta resistência em estrutura hidráulicas, indicando a possibilidade de aprofundamento de estudos nessa área.

Segundo SIDDIQUE *et al.* (2008) plástico reciclado pode ser usado efetivamente no reparo e revestimento do concreto danificado em superfícies de pavimento, pontes, pisos e barragens.

A adição de materiais poliméricos reciclados ao concreto corresponde a uma nova perspectiva nas atividades de pesquisa, integrando as áreas de Tecnologia do Concreto e Meio Ambiente. Nessa perspectiva encontra-se o escopo do presente trabalho aliando soluções com inovação tecnológica e respeito ao meio ambiente.

O presente trabalho está focado na busca de uma solução viável, tanto para a recuperação do concreto de superfícies de estruturas hidráulicas de barragens de usinas hidroelétricas, quanto pelo uso de materiais poliméricos reciclados adicionados ao concreto destinado com MR que, por sua vez, pode ocasionar uma redução dos problemas ambientais proporcionados pela quantidade dos rejeitos disponíveis em aterros sanitários e no meio ambiente em geral.

Iniciou-se o trabalho com análise dos mais empregados na confecção do concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) e dos rejeitos poliméricos mais comumente adicionados ao concreto, bem como dos teores adicionados. Como materiais reciclados foram selecionados na indústria de reciclagem o PET moído, o

PEBD aglutinado e fibras de pneus inservíveis.

Foram confeccionados concretos com adição de materiais poliméricos reciclados nos teores de 1 a 15% em substituição ao agregado miúdo, verificando-se a trabalhabilidade do material no estado fresco. No estado endurecido foram avaliados os teores de 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 7,5% quanto à resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Estes materiais foram comparados com o concreto sem adição de material polimérico considerado o concreto de referência (CR).

Os concretos confeccionados com adição de 2,5% de materiais poliméricos reciclados apresentaram os melhores resultados de resistência mecânica, sendo então, selecionados para o emprego em campo. Tratando-se de resíduos, onde um maior volume de adição destes materiais ao concreto considerou-se desejável, foram também, aplicados em campo concretos com o teor de 5% de materiais poliméricos reciclados.

Para efeitos de comparação, foram ainda, aplicados em campo o CR e CRFPs confeccionados com fibras industrializadas. Nos CRFPs foram utilizadas fibras corrugadas de PET, fibras multifilamento de PP e microfibras de PE e PET.

Todos os materiais aplicados em campo foram avaliados quanto à resistência à abrasão pelo método submerso e quanto ao desempenho de durabilidade em ensaios de envelhecimento acelerado.

Os resultados indicaram que os concretos com adição de materiais poliméricos reciclados podem ser empregados como MR de superfícies hidráulicas degradadas de estruturas de concreto.

1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho trata-se de tese de doutorado realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná.

A tese está dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução onde se apresenta sucinto levantamento do estado da arte e demais características do

trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica no qual são levantadas as principais questões ambientais que envolvem a área de engenharia civil e a importância do concreto como elemento mitigador dos problemas ambientais. Faz-se uma exposição do concreto reforçado com fibras e da possibilidade da inserção de materiais reciclados no concreto. Os materiais reciclados PET, PEBD e fibras de pneus inservíveis são identificados como aditivos do concreto que modificam as propriedades deste material.

O programa experimental está no terceiro capítulo. Considerando que este programa é bastante amplo são apresentadas apenas as metodologias desenvolvidas exclusivamente para este trabalho. Os métodos que tem normas próprias de execução são citados e referenciados.

No quarto capítulo estão os resultados obtidos e a discussão pertinente com menção aos resultados obtidos em outros trabalhos e previamente arrolados na revisão bibliográfica.

No quinto e último capítulo estão as conclusões alcançadas a partir dos resultados verificados. Neste capítulo também estão colocadas sugestões para trabalhos futuros.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

- Analisar o desempenho de concretos com adição de materiais poliméricos reciclados empregados como material de reparo de superfícies hidráulicas degradadas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da adição de materiais poliméricos reciclados nas propriedades do concreto.

- Pesquisar, desenvolver e aplicar novos materiais de reparo de concreto com adição de PET, PEBD e fibras de pneus inservíveis em superfícies hidráulicas erodidas.
- Estudar, em laboratório, o desempenho destes materiais, aplicados sobre concreto com traço similar ao da calha do vertedouro da UHE Mourão.
- Verificar o desempenho do material de reparo aplicado na estrutura hidráulica, em uma pequena área que não comprometa o funcionamento da mesma, mas que traga resultado para a pesquisa.
- Obter tecnologia e produtos viáveis (relação custo/benefício favorável) para recuperação de superfícies hidráulicas similares.
- Aprimorar métodos para co-dispor materiais de rejeito em estruturas de concreto de grande porte.

1.3. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Na literatura internacional são encontrados diversos trabalhos que tratam da adição de materiais reciclados adicionados no concreto. Muitas são as experiências que utilizam os plásticos como materiais reciclados, principalmente, o PET e PP. Entretanto o PE é pouco estudado como material reciclado adicionado ao concreto. Quanto ao PEBD aglutinado não são relatados trabalhos nesta área.

O estudo das fibras de pneus adicionadas ao concreto é apresentado na literatura como CAB (concreto com adição de borracha) e suas propriedades são determinadas em diversos trabalhos.

As estruturas de concreto estão sujeitas a diversos processos de degradação e para manter a vida útil e a segurança dessas estruturas, nos casos onde são identificados processos patológicos, torna-se necessária a manutenção das obras com a aplicação de materiais de reparo.

Em uma situação de ordem prática está a problemática verificada no vertedouro da barragem da UHE Mourão, onde existe o deslocamento da superfície hidráulica. Neste caso indica-se a aplicação de material de reparo que pode ser o CRFP.

Aliando algumas vantagens da adição de materiais reciclados ao concreto com a necessidade de reparo de superfícies hidráulicas, é proposta a aplicação de concretos com PET moído, PEBD aglutinado ou fibras de pneus inservíveis para reparar a superfície do vertedouro da UHE Mourão.

Com este trabalho, de significativa aplicação prática, o uso de resíduos poliméricos no concreto pode contribuir para futuras pesquisas, tanto na área de concreto com adições como na área de materiais de reparo para estruturas hidráulicas.

Além disso, a reciclagem poderá resultar em ganho econômico, se comparada com utilização das fibras comercializadas atualmente, e na possibilidade de desenvolvimento de um produto com características que permitam ampliar o leque de uso na construção civil, inclusive na produção de componentes de menor custo para utilização em obras de interesse social.

1.4. PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO ESTUDO

1.4.1. Artigos Completos Publicados em Periódicos

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; JOUKOSKI, A. ; MENDES, R. ; FERREIRA, E. S. . Reparos no Vertedouro da UHE Mourão: aplicações de concretos com adição de material reciclado 1º parte. **Espaço Energia**, v. 11, p. 35-38, 2009.

FREITAS, C. ; GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; JOUKOSKI, A. ; Gomes Filho, C. V. ; FERREIRA, E. S. . Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, v. 32, p. 913-918, 2009.

MENDES, R ; PORTELLA, K F ; GODOI, W C ; GALVÃO, J C A ; JOUKOSKI, A ; MARTINS, P ; SWINKA-FILHO, V ; DE GEUS, K ;. Determination of crushed stone volume in concrete cores from hydroelectric power plant dams by three-dimensional tomography. **Insight (Northampton)**, v. 51, p. 654-659, 2009.

1.4.2. Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; MENDES, R. ; JOUKOSKI, A. ; FERREIRA, E. S. ; RODRIGUES, L. T. . Proposta do Uso de Resíduos Poliméricos Reciclados como Adição em Concretos Destinados a Reparos em Superfícies Hidráulicas Degradadas: Estudo de Caso UHE Mourão. In: 5º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2009, Curitiba. Anais do 5º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2009.

BRAMBILLA, K. J. C. ; PORTELLA, K. F. ; GALVÃO, J. C. A. ; JOUKOSKI, A. ; CABUSSU, M. S. ; CERQUEIRA, D. P. . Patologias em concreto devido ao ataque por sulfato. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba - PR. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

MENDES, R. ; PORTELLA, K. F. ; GALVÃO, J. C. A. ; Godoi, W. C. ; Swinka Filho, V. . Reconhecimento de patologias de concreto utilizando a técnica de Tomografia Industrial de Raios X (TRX). In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba PR. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; MENDES, R. ; JOUKOSKI, A. ; NEIVERTH, E. . Concreto com Adição de Resíduos Sólidos Poliméricos. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba PR. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; MENDES, R. ; JOUKOSKI, A. ; BRAMBILLA, K. J. C. . Uso de Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas como Material de Reparo de Superfícies Hidráulicas de Barragem de Usina Hidroelétrica. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba PR. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

PORTELLA, K. F. ; GALVÃO, J. C. A. ; JOUKOSKI, A. ; FERREIRA, E. S. ; SANTI, M. R. A. . Patologias em concreto tipo gravidade de barragem de usina hidroelétrica com 40 anos de vida útil: UHE Mourão. In: 4 CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIAS E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2008, AVEIRO. 4 CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIAS E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2008.

PORTELLA, K. F. ; FREITAS, C. ; GALVÃO, J. C. A. ; JOUKOSKI, A. ; FERREIRA, E. S. ; SANTI, M. R. A. . Desempenho de concreto com adição de partículas de borracha reciclada de pneu para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas. In: 4 CONGRESSO INTERNACIONAL DE PATOLOGIAS E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2008, AVEIRO. 4 CONGRESSO INTERNACIONAL DE PATOLOGIAS E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2008.

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; FERREIRA, E. S. ; JOUKOSKI, A. ; SANTI, M. R. A. ; BRAMBILLA, K. J. C. . Desempenho de Concretos com Adição de Fibras Recicladas como Material de Reparo de Superfícies Hidráulicas: Estudos para a Recuperação do Vertedouro da UHE Mourão - 1º Etapa. In: 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2008, Salvador. ANAIS DO 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2008.

PORTELLA, K. F. ; SANTI, M. R. A. ; JOUKOSKI, A. ; SOARES, M. A. ; GALVÃO, J. C. A. . Análise de Perda de Massa de Íons da Estrutura de CCR pela Água Percolada. In: Simpósio Internacional de Concreto Compactado com Rolo, 2008, Salvador. Simpósio Internacional de Concreto Compactado com Rolo, 2008.

1.4.3. Artigos Aceitos para Publicação em Periódicos

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; JOUKOSKI, A. ; MENDES, R. ; FERREIRA, E. S. . USE OF WASTE POLYMERS IN CONCRETE FOR REPAIR OF DAM HYDRAULIC SURFACES. **Construction & Building Materials**, 2010.

GALVÃO, J. C. A. ; PORTELLA, K. F. ; JOUKOSKI, A. ; MENDES, R. ; FERREIRA, E. S. . Reparos no Vertedouro da UHE Mourão: aplicações de concretos com adição de material reciclado 2º parte. **Espaço Energia**, 2010.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE

Pesquisa internacional realizada pela *Civil Engineering Research Foundation* (CERF), atualmente denominada *Civil Engineering Forum for Innovation* (CEFI), entidade ligada ao *American Society of Civil Engineers* (ASCE) dos Estados Unidos, revelou que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor, logo atrás de informática (Figura 1).

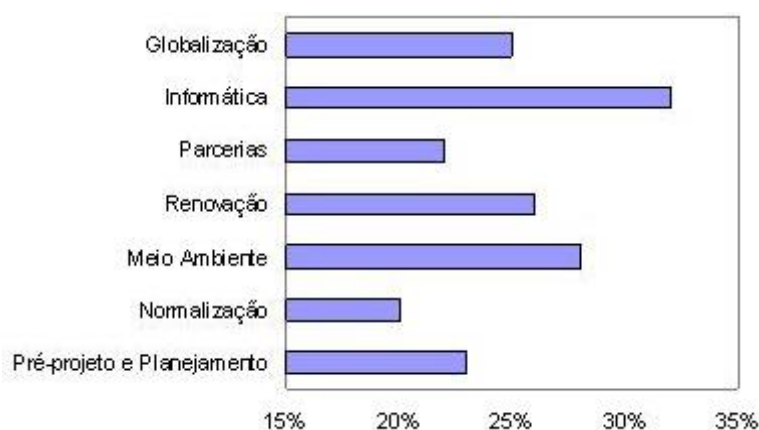


FIGURA 1 - PREOCUPAÇÕES DOS LÍDERES DO SETOR DE CONSTRUÇÃO CIVIL (FONTE: JOHN, 2010).

Segundo JOHN (2010), a razão desta preocupação decorre de alguns fatores objetivos:

1. O maior consumidor de recursos naturais. A construção civil é responsável por entre 15 e 50 % do consumo dos recursos naturais extraídos. O consumo de agregados naturais varia entre 1 e 8 toneladas/habitante.ano. No Brasil o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e argamassas é de 220 milhões de toneladas.

2. Matérias primas escassas. Algumas matérias primas tradicionais da construção civil tem reservas mapeadas escassas. O cobre e o zinco, por exemplo, tem reservas suficientes apenas para 60 anos. Embora estes valores possam sempre ser questionados, certamente exercem influência no preço dos produtos, dificultando o uso.

3. Geração de poluição do ar. Além de extrair recursos naturais, a produção de materiais de construção também gera poluição: poeira, CO₂. O processo produtivo do cimento necessariamente gera CO₂ gás importante no efeito estufa. Para cada tonelada de clínquer produzido mais de 600 kg de CO₂ são gerados.

4. Construção: o maior gerador de resíduos. Finalmente, a construção civil é certamente o maior gerador de resíduos de toda a sociedade. O volume de entulho de construção e demolição gerado é o dobro do volume de lixo sólido urbano. Os valores internacionais oscilam entre 0,7 a 1 ton/habitante.ano.

Nos países em desenvolvimento como o Brasil, esses fatores são ainda mais significativos, pois a indústria da construção civil é um setor que desempenha fundamental papel na economia nacional. A indústria da construção é responsável por considerável parcela dos investimentos no país proporcionando avanços de melhoria na infraestrutura e, principalmente, apoiando a geração de empregos.

Considerando esta importância na economia brasileira a busca por um desenvolvimento sustentável é fortemente desejável. Sendo grande gerador de resíduos, o setor da construção tem por comprometimento apresentar soluções para redução dos volumes de resíduos, além de reutilização e reciclagem.

Quanto aos resíduos da construção civil PINTO (2005) destaca que a falta de efetividade ou, em alguns casos, a inexistência de políticas públicas que disciplinam e ordenam os fluxos da destinação dos resíduos da construção civil nas cidades, associadas à falta de compromisso dos geradores no manejo e, principalmente, na destinação dos resíduos, provocam os seguintes impactos ambientais:

- degradação das áreas de manancial e de proteção permanente;
- proliferação de agentes transmissores de doenças;
- assoreamento de rios e córregos;
- obstrução dos sistemas de drenagem, tais como galerias, sarjetas, entre outros;
- ocupação de vias e logradouros públicos por resíduos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, além da própria degradação da paisagem urbana;
- existência e acúmulo de resíduos que podem gerar risco por sua periculosidade.

Com as políticas públicas de gestão dos resíduos da construção civil,

principalmente, a Resolução CONAMA nº 307 – Gestão dos Resíduos da Construção Civil, de 5 de julho de 2002 e a apresentação de normas técnicas, verifica-se uma redução dos grandes volumes de resíduos gerados (BRASIL, 2002).

As ações de gestão de resíduos da construção civil são ainda incipientes, mas apresentam a percepção da necessidade de mudança de cultura dos envolvidos em todas as etapas da construção, bem como da sociedade em geral, mas relações com o meio ambiente.

2.2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Concreto reforçado com fibras (CRF) pode ser definido como um material feito com cimento Portland, agregados e contendo fibras descontínuas misturadas. Em 1960, foram usadas fibras de asbestos misturadas ao cimento. Desde então, têm sido usados outros tipos de fibras como: aço, polipropileno, carbono, vidro, nylon, celulose, acrílico, polietileno, madeira e sisal. As fibras mais usadas são as fibras de aço e as fibras de material polimérico (THOMAZ, 2002).

O concreto simples, não-armado, é um material frágil, quebradiço, com uma baixa resistência à tração e uma baixa capacidade de alongamento na tração. O papel das fibras descontínuas, distribuídas aleatoriamente, é o de atravessar as fissuras que se formam no concreto, seja quando sob a ação de cargas externas ou quando sujeito a mudanças na temperatura ou na umidade do meio ambiente. As fibras provocam uma certa ductilidade após a fissuração.

Se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia e em bastante quantidade, elas ajudarão a manter pequena a abertura das fissuras. Permitirão ao CRF resistir a tensões de tração bem elevadas, com uma grande capacidade de deformação no estágio pós-fissuração.

Devido a essa redistribuição de tensão, a energia elástica armazenada não será dissipada por meio de uma única frente de propagação, mas possivelmente por várias microtrincas. O comprimento de cada uma destas microtrincas geradas, assim como a perda de resistência ocasionada, será inferior ao causado por uma única trinca,

mesmo que sua área superficial total seja a mesma (PERET, 2003).

As fibras sintéticas, como as de polipropileno e nylon, surgiram como alternativa às fibras de amianto no reforço de matrizes de base cimentícia (HANNANT e HUGHES, 1986). Tal opção se deve mais aos problemas de saúde ligados ao manuseio do amianto, reconhecidamente responsável pela asbestose, do que pelo desempenho propriamente dito, uma vez que o amianto proporciona um maior ganho de desempenho quanto ao reforço mecânico do que as fibras orgânicas sejam sintéticas ou vegetais, dada a excessiva flexibilidade destas últimas. Nestes casos, a principal contribuição da fibra é transformar matrizes tipicamente frágeis em materiais “quase dúcteis” (BENTUR e MINDESS, 1990). Isto traz como vantagem um ganho de desempenho no que se refere aos esforços como impacto e redução da fissuração do material.

As fibras orgânicas podem ser classificadas em fibras naturais e sintéticas. O seu emprego no concreto tem a tendência de aumentar a sua deformabilidade, haja vista que estas fibras apresentam um baixo módulo de deformação no regime elástico. A resistência à tração não é melhorada, pois há perda de aderência entre as fibras e a pasta de cimento. Já, a resistência ao impacto, é melhorada com o emprego das fibras orgânicas (ACCETTI e PINHEIRO, 2000).

As fibras sintéticas são as mais utilizadas e, em especial, as de polipropileno fibrilado. Tais fibras têm pouca interferência na resistência à tração, pois apresentam um baixo módulo de elasticidade, alongando-se bem mais que a matriz de cimento. Portanto, as estruturas de concreto com este material têm maior resistência ao impacto que as de concreto comum. No estado fresco, tais fibras conferem à mistura um aumento da coesão, minimizando a fissuração que ocorre no estado plástico e nas suas primeiras horas de endurecimento, não devendo substituir os habituais reforços para o combate da retração hidráulica (PORTELLA *et al.*, 2001a).

Segundo RODRIGUES E MONTARDO (2002), o desempenho dos CRFs é controlado, principalmente, pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas desta e do substrato e pela aderência entre as duas fases. O efeito da orientação e da distribuição da fibra no substrato, relativamente ao seu plano de

ruptura ou fissura, influencia fortemente a sua habilidade em transmitir cargas e que, se a fibra estiver posicionada paralelamente ao plano de ruptura à resultante não terá efeito, enquanto que na perpendicular esta terá efeito máximo. Quanto ao teor de fibras, a resistência pós-fissuração é maior para as maiores concentrações das mesmas na mistura (atendendo ao estudo de dosagem), sendo que este resultado é dependente da possibilidade de absorção das cargas adicionais causadas pela fissura.

2.3. ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS AO CONCRETO

As questões ambientais recebem por parte de toda a sociedade uma significativa atenção e, de certa forma, tornam-se uma preocupação em termos de preservação dos recursos naturais e redução dos impactos ambientais proporcionados pelo desenvolvimento humano e pelo emprego das novas tecnologias. Desta forma, a reciclagem ou reutilização de materiais poluentes vem contribuindo para atender aos anseios da sociedade na busca de um desenvolvimento sustentável (GALVÃO, *et al.* 2008b).

Como exemplos de destinação final apropriada a variados tipos de rejeitos adicionados no concreto podem ser citados: PORTELLA *et al.* (2006) e GUERRA *et al.* (2009) estudaram as propriedades do concreto com adição de rejeitos cerâmicos; ISMAIL e AL-HASHMIL (2008) verificaram o concreto com adição de plásticos reciclados; ÂNGULO *et al.* (2009) caracterizaram como agregados para concreto, materiais reciclados da construção e demolição; KHALOO *et al.* (2008) observaram que a adição de partículas de borracha de pneu proporcionou ao concreto resultante maior ductilidade nos ensaios de compressão se comparado ao concreto sem adição; e, dentre outros, HOPPEN *et al.* (2006) encontraram no concreto a possibilidade de depositar o lodo residual das estações de tratamento de água. Estudos também foram realizados com elastômeros, como é o caso da borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus (FREITAS *et al.*, 2009).

Trabalhos como os de REBEIZ (1995), CHOI *et al.* (2005), JO *et al.* (2007) e, entre outros, KIM *et al.* (2010) analisam os efeitos nas propriedades do concreto com

adição de PET reciclado. As fibras de PET reciclado são facilmente misturadas no concreto e conferem novas propriedades ao material (OCHI, 2007).

Uma das vantagens observadas do uso de plásticos reciclados no concreto foi a redução de resíduos sólidos nos aterros sanitários (SIDDIQUE *et al.*, 2008).

Atualmente, os rejeitos industriais e domésticos têm em sua constituição significativa percentagem de materiais poliméricos, que acabam ocupando considerável volume nos aterros sanitários (PARANÁ, 2003). Portanto, sua reciclagem é motivo de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que venham a minimizar os problemas ocasionados.

2.3.1. Polietileno Tereftalato

Polietileno tereftalato (PET) é um dos mais importantes plásticos e extensivamente usado em todo o mundo, especialmente para a fabricação de recipientes de bebidas. A atual produção mundial de PET ultrapassa 6,7 milhões de toneladas/ano (KIM *et al.*, 2010).

Utilizadas principalmente por indústrias de refrigerantes e sucos, as garrafas PETs movimentam hoje um mercado que produz cerca de 9 bilhões de unidades anualmente só no Brasil, das quais 53% não são reaproveitadas. Com isso, cerca de 4,7 bilhões de unidades por ano são descartadas na natureza, contaminando rios, indo para lixões ou mesmo espalhadas por terrenos vazios. Entre 1995 e 2005, a produção de PET para a fabricação de garrafas subiu de 120 mil toneladas para cerca de 370 mil toneladas, alavancada principalmente pela indústria de refrigerante (SILVESTRE, 2007).

Para reciclar os resíduos de PET, despesas adicionais são necessárias para o reprocessamento. Além disso, a mudança de cor e a perda da pureza podem limitar o uso de plástico PET reciclado para a fabricação de novos produtos (REBEIZ *et al.*, 1993).



FIGURA 2 - GARRAFAS PET LANÇADAS NA NATUREZA.

Além do problema com o descarte das unidades na natureza, especialistas chamam a atenção para o fato de hoje não haver responsabilidade jurídica sobre a destinação do material por parte de quem fabrica ou consome PETs. Diferentemente do que acontece com latas de alumínio, que pela reciclagem voltam a ser latinhas, PET não pode ser transformado novamente em garrafa. A alternativa que vem sendo encontrada pela indústria da reciclagem é a utilização do PET reciclado pós-consumo para aplicações distintas, como por exemplo, vassouras, roupas, utensílios domésticos, bolsas, tapetes e, mais recentemente, cartões magnéticos (TAGORE, 2008).

Uma solução mais eficaz e menos onerosa é necessária para os resíduos de garrafas PET. Uma possível solução é utilizar PET reciclado como fibra de reforço em concreto estrutural. Ele pode fornecer controle da retração e melhorar a ductilidade do concreto considerado como frágil. As aplicações atuais de reciclagem do PET na indústria da construção incluem seu uso como resina de concreto polimérico e agregado graúdo sintético para concreto leve (KIM *et al.*, 2010).

CHOI *et al.* (2005) estudaram os efeitos de agregados de resíduos de garrafas PET sobre as propriedades do concreto. A metodologia de trabalho, entre outros fatores, analisou concretos com substituição do agregado miúdo natural por agregado leve de resíduos de garrafas PET, nas razões de substituição de 0, 25, 50 e 75%. Os autores verificaram uma redução no peso específico e na densidade do agregado leve de resíduos de garrafa PET de 50%, se comparado com o agregado natural. Foi verificada uma redução na resistência à compressão aos 28 dias com o aumento na relação de substituição do agregado miúdo natural por agregados de

resíduos de garrafas PET.

O desenvolvimento de fibra de PET reciclado e sua aplicação como CRF foi estudado por OCHI *et al.* (2007). Nos testes de resistência à compressão e flexão foram empregados CRFs com os teores de 0,5; 1,0 e 1,5% de adição de fibras de PET reciclado, comparados como um concreto sem adição de fibras. Os autores verificaram um aumento na resistência à flexão com o incremento no teor de fibra empregado para as relações de água/cimento (a/c) de 0,55; 0,60 e 0,65. Uma importante conclusão foi a constatação de que as fibras de PET são facilmente misturadas ao concreto. Esta é uma significativa vantagem na comparação com as fibras de aço que necessitam de maiores cuidados no momento da mistura da fibra no concreto. O mesmo ocorre no concreto projetado, quando os CRFs com fibras poliméricas são mais facilmente lançados que os confeccionados com fibras de aço.

No Japão foram realizadas diversas aplicações de CRF com fibras de PET. Em todos os casos, o concreto reforçado com fibras de PET mostrou fácil manuseio e é altamente apreciado (OCHI *et al.* 2007).

KIM *et al.* (2010), analisaram o concreto reforçado com fibras (CRF), comparando fibras confeccionadas de PET reciclado e fibras comerciais de polipropileno (PP). As fibras foram adicionadas ao concreto nos teores de 0,5; 0,75 e 1,0%. Neste trabalho foi verificada uma redução na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias com o aumento do teor de fibra adicionada. Os CRFs confeccionados com PET reciclado e fibra de PP apresentaram diminuição na resistência à compressão de 1 para 9% e 1 para 10%, respectivamente, se comparados aos corpos de prova sem fibra de reforço. Aumentos da ductilidade e da resistência máxima foram observados para vigas produzidas com CRF de fibra de PET reciclado e fibra de PP. A ductilidade e capacidade de carga máxima foram aumentadas de um máximo de 1000% e 30%, respectivamente, ao comparar as vigas de CRF de PET reciclado e amostras sem adição de fibras.

Portando, assim como a redução do consumo e dos desperdícios, é necessária a implementação de processos inovadores de reciclagem de polietileno tereftalato. A adição de PET ao concreto pode promover um material com novas

propriedades, atendendo ao desempenho esperado, além de oportunizar a destinação final adequada deste rejeito que é notavelmente prejudicial ao meio ambiente.

2.3.2. Polietileno de Baixa Densidade

O maior componente dos resíduos de plástico na Europa é o polietileno de baixa densidade (PEBD) com 23% do volume, seguido por 17,3% de polietileno de alta densidade (PEAD), 18,5% de polipropileno (PP), 12,3% de poliestireno (PS), 10,7% de cloreto de polivinila (PVC), 8,5% de polietileno tereftalato (PET) e 9,7% de outros tipos (APME, 2004).

Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados dados brasileiros da geração de plásticos pós-consumo e da reciclagem de plásticos pós-consumo, respectivamente.

TABELA 1 – GERAÇÃO DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO NO BRASIL

Tipo	Quantidade (t/ano)	(%)
PET	454.925	19,79
PEAD	335.387	14,59
PVC	149.736	6,51
PEBD/PEBDL	788.713	34,30
PP	381.062	16,57
PS	133.441	5,80
Outros tipos	55.896	2,43

Fonte: Plastivida – Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos/2005.

TABELA 2 – RECICLAGEM DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO POR TIPOLOGIA NO BRASIL

Tipo	Quantidade (t/ano)	(%)
PET	244.428	53,70
PEAD	51.896	11,40
PVC	9.742	2,14
PEBD/PEBDL	89.995	19,77
PP	32.641	7,17
PS	18.389	4,04
Outros tipos	8.068	1,77

Fonte: Plastivida – Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos/2005.

No Brasil dados apresentam o polietileno de baixa densidade e o polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) como maiores geradores de plástico pós-consumo. O PEBDL penetrou em quase todos os mercados tradicionais em que é usado polietileno, principalmente, para os sacos de plástico e folhas, onde se permite a utilização de menor espessura do que o PEBD.

Mesmo apresentando a maior geração de consumo entre os tipos de plásticos, o PEBD/PEBDL com 34,30% do total de resíduos plásticos gerados, apenas 19,77% do total de plásticos reciclados são deste material. Essa significativa diferença é representada, especialmente, pelas embalagens, sacolas e sacos plásticos confeccionados com PEBD e/ou PEBDL que são destinados aos aterros sanitários, não retornando ao ciclo de reciclagem. As sacolas plásticas são reutilizadas como saco de lixo, entretanto o maior impacto ambiental é causado pelo desperdício ou descarte incorreto dessas embalagens e sacolas.



FIGURA 3 – SACOLAS PEBD LANÇADAS NA NATUREZA.

Medidas devem ser tomadas para a redução do uso de embalagens e sacolas plásticas de PEBD, além da separação destes rejeitos e destinação ao ciclo de reciclagem.

ZOOROB e SUPARMA (2000) aplicaram o polietileno de baixa densidade reciclado em concreto asfáltico (CA). A mistura de CA contendo plásticos reciclados em substituição dos agregados minerais é chamada de Plastiphalt.

Resíduos de plásticos reciclados, predominantemente composto de polietileno de baixa densidade em forma de pellet, foram utilizados em misturas betuminosas para substituir (por volume), uma porção de agregados minerais. Os resultados obtidos nesta investigação indicam que o teor de vazios da mistura de Plastiphalt é o mesmo da mistura de controle (sem adição de plásticos). A mistura compactada com PEBD reciclado tem menor densidade do que a mistura controle convencional. A substituição de 30% em volume dos agregados por PEBD reciclado apresentou uma redução na densidade de mistura em massa compactada de 16% em

comparação com a mistura de controle. Essa redução na densidade é vantajosa em termos de custos de transporte.

O PEBD também pode ser adicionado ao concreto de cimento Portland, conferindo ao material novas propriedades e melhorando o seu desempenho. Além disso, essa prática pode contribuir com o meio ambiente reduzindo o impacto causado quando esse plástico é inconsequentemente lançado na natureza. Entretanto são poucas as pesquisas desenvolvidas nesta área, com levantamento de dados e análises técnicas e científicas ainda incipientes.

2.3.3. Borracha de Pneus Inservíveis

O aumento da produção de pneus, assim como, dos resíduos provenientes dos pneus fora de uso tem causado preocupações quanto à sua disposição final. Reforça-se que a quantidade de pneus produzidos tem aumentado a cada ano. De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) a indústria brasileira de pneus produziu, em 2009, o total de 61,3 milhões de unidades, avaliadas em R\$ 9 bilhões (ANIP, 2010).

A preocupação com o Meio Ambiente pode ser observada nas providências tomadas por órgãos como o Conselho da União Européia e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), responsável pelas questões ambientais do Brasil.

Legislações como da União Européia, por meio da norma técnica Diretiva sobre Aterros 1999/31/CE, passa a proibir o depósito de pneus triturados em aterros sanitários (EUROPEAN UNION, 1999).

O CONAMA considera que os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados e reciclados antes de sua destinação final adequada. Os pneus dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que podem resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública (BRASIL, 2009).

Uma forma encontrada para amenizar esse impacto foi a utilização das metodologias de reciclagem e reaproveitamento. Entre elas, a recauchutagem tem sido um mecanismo bastante utilizado para conter o descarte de pneus usados. O Brasil

ocupa o 2º lugar no ranking mundial de recauchutagem de pneus. Este processo também é gerador de resíduos, pois a banda de rodagem é raspada para a retirada da borracha velha e preparação para o recebimento de nova camada de borracha.



FIGURA 4 – PNEUS INSERVÍVEIS LANÇADOS NA NATUREZA.

A cada ano são descartadas no Brasil, 330 mil toneladas de pneus. Somente no município de São Paulo, todo dia são recolhidos das ruas 300 pneus velhos, que somam cerca de 1,5 toneladas. Grande parte dessa montanha de borracha simplesmente entupia os aterros e lixões. Programas de coleta e reciclagem de pneus como o da Reciclanip, entidade ligada à Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos, visa instalar pontos de coleta de pneus, que são triturados e viram base para asfalto, tapetes para carros, solados de sapato e dutos de rios. (SILVA, 2008)

O uso deste resíduo em argamassa e concreto são formas alternativas limpas de reciclagem deste material, já que estes não devem ser colocados em aterros e sua queima libera gases tóxicos (MARQUES, 2006).

MACEDO *et al.* (2005) estudaram o comportamento acústico de placas pré-moldadas em concreto com borracha de pneu. Neste trabalho, analisaram a possível melhora do isolamento acústico utilizando placas pré-moldadas confeccionadas com concreto de referência (sem adição de borracha) e com concretos com adição de borracha de pneu nos teores de 5, 10 e 15%, em substituição à parte do agregado miúdo em volume. Estas placas foram ensaiadas em câmara reverberante.

Os autores verificaram um o aumento do isolamento acústico entre os corpos de prova com borracha à medida que o teor de borracha na mistura foi aumentado. E

concluíram que a utilização da fibra de borracha junto às matrizes cimentícias demonstra um futuro promissor quanto ao isolamento acústico.

SANTOS *et al.* (2003) analisaram adição de borracha reciclada de pneu moído como agente modificador do cimento asfáltico de petróleo (CAP). As formulações empregaram 2, 5, 8, 12, 17 e 22 % de borracha de pneu verificando-se que a viscosidade, o ponto de amolecimento e a resiliência do CAP aumentaram com o incremento no teor de adição de borracha reciclada de pneu moído.

LI *et al* (2004) analisaram, experimentalmente, o concreto com adição de resíduos de pneus. Dois tipos de configurações de resíduos de pneus foram avaliados. Um sob forma de fibras, com espessura de 5 milímetros e comprimento variando entre 25,4 mm e 50,8 mm, obtidas pelo processo de raspagem mecânica e outro em forma de lascas (pedaços de pneus cortados) com formato de 25,4 x 25,4 mm e espessura de 5 mm. O processo experimental incluiu as fibras e pedaços com e sem fios de aços, comparados com o concreto de referência (controle sem adição de pneu). A análise demonstrou que as fibras têm melhor desempenho que as lascas de pneus e os fios de aço de pneus usados têm um efeito positivo no aumento da resistência do concreto com borracha.

MOSCA *et al.* (2005) observaram os resultados das resistências à compressão de concreto com borracha, substituindo em 1, 2, 3, 4, 5 e 6% o peso de agregado (areia e brita) pelo peso de borracha, e constataram perdas de resistência à compressão média das misturas na ordem de 9, 23, 39, 40, 68 e 75%, respectivamente, em comparação ao concreto de referência.

2.3.4. Propriedades do Concreto com Adição de Plásticos Reciclados

A adição de plásticos reciclados confere ao concreto de cimento Portland alterações nas suas propriedades se comparados com o concreto comum, sem adições.

As principais investigações realizadas verificando os efeitos da adição de resíduos de plásticos reciclados ao concreto no estado fresco e endurecido, foram

relatadas por SIDDIQUE *et al.* (2008) e estão apresentadas a seguir. As propriedades do concreto mais comumente analisadas foram: densidade, teor de ar, trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, resistência ao impacto, módulo de elasticidade, permeabilidade e resistência à abrasão.

2.3.4.1. Propriedades do concreto fresco

AL-MANASEER e DALAL (1997) investigaram o efeito da adição de agregados de plástico sobre a densidade do concreto. Para este propósito, confeccionaram 12 concretos com diferentes relações a/c, com percentagens variadas de 0, 10, 30 e 50% de agregados de plástico. Foram utilizados agregados de plástico pós-consumo com dimensão máxima de 13 mm. As conclusões obtidas foram: (i) a densidade do concreto diminui como aumento do teor de agregados de plástico, (ii) redução na densidade foi diretamente proporcional ao teor de plástico agregados e (iii) a densidade de concreto foi reduzida em 2,5, 6 e 13% para o concreto contendo 10, 30 e 50 de agregados de plástico, respectivamente. Redução na densidade foi atribuída à menor unidade de peso de os plásticos.

CHOI *et al.* (2005) estudaram os efeitos da adição de agregados leves feitos com garrafas de polietileno tereftalato sobre a densidade do concreto. As proporções da mistura do concreto foram realizadas com as relações água-cimento de 45, 49 e 53%, e as relações de substituição em volume do agregado miúdo por agregado leve de resíduos de garrafas PET foram de 0, 25, 50 e 75%. A densidade das misturas de concreto diminui com o aumento do teor de agregados leves feitos com resíduos de garrafas de PET (Tabela 3).

O efeito de fibras de polipropileno sobre o teor de ar do concreto foi estudado por BAYASI e ZENG (1993). Para a análise foram feitas sete misturas de concreto reforçado com fibras de PP. Eles relataram que o teor de ar aumentou com a inclusão de fibras de polipropileno e não houve efeito detectável sobre o teor do ar do concreto fresco em volume inferior a 0,3% de adição de fibras de PP.

TABELA 3 – PROPRIEDADE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE AGREGADO LEVE DE RESÍDUOS DE GARRAFAS PET

a/c	Substituição* (%)	Densidade (Kg/m ³)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Slump (cm)
53	0	2300	31,5	3,27	23,5	10,0
	25	2220	29,7	2,65	23,0	15,3
	50	2130	26,3	2,25	21,2	19,9
	75	2010	21,8	2,04	18,5	22,3
49	0	2300	34,6	3,27	23,3	10,5
	25	2230	33,7	2,76	22,8	15,4
	50	2120	29,1	2,35	18,1	18,0
	75	2000	23,2	1,94	16,7	21,4
45	0	2300	37,2	3,32	25,5	13,5
	25	2260	33,8	2,8	18,7	16,9
	50	2160	31,8	2,55	17,3	18,4
	75	1940	24,9	2,04	15,6	20,5

Fonte: CHOI *et al.*, 2005.

* Relação de substituição de agregado miúdo por agregado leve de resíduos de garrafas de PET.

SOROUSIAN *et al.* (2003) relataram que a adição de plásticos reciclados no concreto resultou na redução do teor de ar. Foram realizadas variadas dosagens de CRF com a inclusão de plástico virgem e reciclado, apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 – PROPRIEDADE DO CONCRETO FRESCO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE PP

Identificação	Tipo do plástico	Densidade	Dosagem (kg/m ³)	Volume (%)
poly1.5	Polipropileno Virgem *	1,2	0,9	0,075
poly3.0	Polipropileno Virgem *	1,2	1,8	0,15
plmp1.5	Reciclado - processo de fundição	0,8	0,9	0,1
plmp2.5	Reciclado - processo de fundição	0,8	1,5	0,19
plsr34	Reciclado - resíduo automotivo moído	1,0	20,0	2,0
plsh17	Reciclado - moído	1,0	10,0	1,0
plsh34	Reciclado - moído	1,0	20,0	2,0

Fonte: Adaptado SOROUSIAN *et al.*, 2003.

* Fibras de polipropileno não é resíduo plástico

Uma redução da trabalhabilidade com a utilização de plástico reciclado no concreto foi verificada por SOROUSIAN *et al.* (2003) no *slump test*. Os autores notaram que a adição de qualquer material plástico, reciclado ou virgem, causou uma redução no slump se comparado com o concreto de referência (sem adição de plástico) e quanto maior o teor de adição maior será essa redução. O material de resíduo plástico automotivo moído apresentava aspecto de flocos sendo utilizado em teores maiores que o material de fibras delgadas (PP virgem), os seus efeitos sobre as propriedades da mistura fresca foram semelhantes. Isto foi atribuído aos efeitos

desfavoráveis das fibras muito delgadas que reduzem a trabalhabilidade da mistura fresca.

A influência da adição de agregado leve de resíduos de garrafas polietileno tereftalato trabalhabilidade (*slump*) do concreto foi investigada por CHOI *et al.* (2005). As proporções da mistura do concreto foram realizadas com as relações água-cimento de 45, 49 e 53%, e as relações de substituição em volume do agregado miúdo por agregado leve confeccionados a partir de resíduos de garrafas PET foram de 0, 25, 50 e 75%. Eles relataram que a adição de agregado leve de resíduos de garrafas PET proporcionou um aumento na trabalhabilidade. Este foi proporcional ao aumento da relação a/c e da relação de substituição dos agregados. A melhora na trabalhabilidade representou 52, 104 e 123% em comparação com o concreto de referência para as relações a/c de 45, 49 e 53%, respectivamente, considerando a substituição de 75% dos agregados de areia de rio de agregados de resíduos plásticos. Isso pode ser atribuída não só a forma esférica e lisa, mas também à absorção do agregado leve de resíduos de garrafas polietileno tereftalato.

2.3.4.2. Propriedades do concreto endurecido

CHOI *et al.* (2005) estudaram os efeitos da adição de agregados leves feitos com garrafas de PET sobre a resistência mecânica à compressão do concreto. As proporções da mistura do concreto foram realizadas com as relações água-cimento de 45%, 49% e 53%, e as relações de substituição em volume do agregado miúdo por agregado leve de resíduos de garrafas PET foram de 0, 25, 50 e 75,%. Os autores observaram que nas primeiras idades (3 dias) a adição de material polimérico reciclado não influenciou significativamente na resistência à compressão do concreto. Para a idade de 28 dias a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural por agregado leve de resíduos de garrafas PET. Com 75% de substituição dos agregados a resistência à compressão é reduzida cerca de 33% se comparado com o concreto de referência na relação água-cimento de 45%. Eles indicam que a resistência à compressão do concreto, provavelmente atinge

um nível superior para os agregados naturais e a resistência do material não se beneficia com um aumento na resistência da matriz. Isso pode ser atribuído à influência do agregado leve confeccionado com resíduos de garrafas PET.

Os autores CHOI *et al.* (2005) estudaram ainda, as influências da adição de agregados leves feitos com garrafas de PET sobre a resistência mecânica à tração e módulo de elasticidade. Verificou-se que as resistências à tração das misturas de concreto diminuíram com o aumento do teor de agregados de PET e para um determinado teor de agregado PET, a resistência a tração aumentou com a redução em relação a/c. Os autores notaram que o módulo de elasticidade das misturas de concreto diminui com o aumento de agregados PET.

AL-MANASEER e DALAL (1997) investigaram os efeitos da adição de agregados de plástico na resistência à compressão do concreto. Misturas de concreto foram feitas com diferentes relações a/c e percentual variado de agregados de plástico. Os resultados indicaram que a resistência à compressão diminuiu com o aumento no teor de agregados. Em qualquer teor de agregado de plástico a resistência à compressão diminuiu quando o fator a/c foi aumentado. Em geral, a taxa de redução da resistência diminuiu com o aumento do teor de agregados de plástico. Foi observada uma redução de 34, 51 e 67% na resistência à compressão do concreto contendo 10, 30 e 50% de agregados de plástico. A redução na resistência à compressão devido à adição de agregados de plástico pode ser devido a uma ligação deficiente entre a pasta de cimento e os agregados de plástico ou a baixa resistência desse tipo de agregado.

Os autores ainda relataram que as amostras de concreto contendo agregados plásticos, sob carga de compressão, não apresentaram ruptura tipo frágil como é normalmente observada no concreto convencional. Quando o teor de agregados de plástico foi aumentado, o tipo de falha tornou-se mais dúctil. As amostras contendo agregados de plástico foram capazes de resistir à carga por alguns minutos após a falha, sem a desintegração completa. Esta tendência foi mais evidente para maiores idades do concreto e maiores percentuais de agregados de plásticos adicionados ao concreto.

A respeito da resistência à tração os autores concluíram que a resistência à

tração diminuiu com o aumento do teor dos agregados de plástico. Para um determinado teor de agregado de plástico a resistência à tração medida diminuiu quando a relação água/cimento foi aumentada.

As amostras de concreto contendo agregados plásticos não apresentaram ruptura por tração tipo frágil como observado no caso do concreto convencional. A ruptura por tração foi mais gradual, como observado nas amostras testadas sob carga de compressão. Em geral, as amostras contendo agregados de plástico foram capazes de resistir a uma maior carga de tração após a ruptura e sem a desintegração completa.

Quanto ao módulo de elasticidade do concreto, AL-MANASEER e DALAL (1997) relataram os efeitos do emprego de agregados de plástico. Os autores concluíram que (i) o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento do teor de agregado de plástico; (ii) dependendo da relação água-cimento, o módulo de elasticidade variou entre 24,3 GPa para concreto que não continha agregados de plástico ($a/c = 0,28$), para 8,6 GPa para o concreto contendo agregados de plástico no teor de 50% ($a/c = 0,50$); e (iii) em geral, um aumento da relação a/c diminuiu o módulo de elasticidade do concreto.

Os trabalhos de SOROUSHIAN *et al.* (2003) demonstraram que a resistência à compressão do concreto diminuiu com a adição de plásticos reciclados. Os resultados dos testes de resistência à compressão indicaram que todas as misturas contendo fibras delgadas apresentaram um ligeiro aumento na resistência à compressão. As misturas contendo plástico reciclado moído mostraram uma pequena perda da resistência à compressão (aproximadamente 5%), o que poderia ser atribuído ao módulo de elasticidade relativamente baixo destes agregados moídos.

SOROUSHIAN *et al.* (2003) estudaram o efeito do plástico reciclado sobre a resistência ao impacto do concreto. O teste de impacto envolvia a queda repetida de um martelo padrão a partir de uma determinada altura, onde era registrado o número de golpes, até que o cilindro de concreto com 152,4 milímetros (6 polegadas) de diâmetro apresentasse uma falha. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 28 dias, em seguida, ao ar seco em laboratório por um período adicional de

3 meses. Os autores verificaram que o sistema de reforço, proporcionado pela adição de material plástico no concreto, rendeu importantes ganhos na resistência ao impacto. Fibras de materiais diversos, com diferentes formas geométricas, variados teores de adição e as características da rigidez variadas, explicam as significativas diferenças observadas na melhoria da resistência ao impacto, trazidas pela adição de material plástico reciclado ao concreto.

Foi demonstrado por SOROUSIAN *et al.* (2003) que a adição de materiais reciclados ao concreto proporcionou uma redução na permeabilidade ao ar. No ensaio de permeabilidade ao ar os autores mediram a taxa de ar através de um CP concreto. Os CPs foram secos ao ar em laboratório com 59% de umidade relativa e 22 °C antes do teste. Esse teste envolveu fixação de uma bomba de vácuo à superfície da amostra, com a taxa de fluxo de ar sob vácuo medido.

SOROUSIAN *et al.* (2003) investigaram, ainda, o efeito da adição do plástico reciclado sobre a resistência à abrasão do concreto pela norma ASTM C 779. Foi observado que a adição de plástico reciclado pode causar uma redução na resistência à abrasão do concreto, refletido no aumento da perda de massa do material na presença de fibras plásticas. Este efeito pode resultar do fato de que as fibras próximas da superfície foram arrancadas sob efeitos de abrasão, contribuindo assim para a perda de massa. A mudança nas características de desgaste do concreto com a presença de fibras de plástico reciclado, também pode modificar as características da superfície do material e assim, sua resistência à abrasão.

BATAYNEH *et al.* (2007) investigaram o efeito do agregado plástico sobre a resistência à compressão do concreto. Foram analisadas misturas de concreto com até 20% de partículas de plástico em substituição parcial dos agregados miúdos. Os autores concluíram que a adição das partículas de plástico levou a uma redução nas propriedades de resistência. Para a substituição de 20% dos agregados miúdos naturais por agregado plástico, a resistência à compressão apresentou uma acentuada redução de até 72% da resistência original. Com substituição de 5% dos agregados miúdos naturais por agregado plástico, a resistência à compressão apresentou uma redução de 23%, se comparada ao concreto de referência sem adição de partículas de

plástico. A redução na resistência das misturas de concreto com adição de agregados plásticos foi devido à menor resistência dessas partículas, se comparadas ao agregado natural. Os autores indicam que, tanto o uso do concreto com partículas de plástico, quanto o teor de substituição, devem ser controlados de acordo com a resistência admissível do elemento estrutural a ser construído.

MARZOUK *et al.*(2007) estudaram o uso de resíduos de garrafas de plástico como agregado em substituição de areia em materiais compósitos para aplicação em construção. Garrafas feitas de tereftalato de polietileno foram utilizadas como agregados em substituição parcial e total da areia em compósitos de concreto. Os teores de substituição de areia por agregados reciclados foram: 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 e 100%, em volume. Os autores concluíram que a substituição da areia em um nível abaixo de 50% em volume por agregado de PET, não afetou a resistência à compressão nem a resistência à flexão dos compósitos de concreto. O estudo demonstrou que as garrafas de plástico, picadas em pequenas partículas, podem ser usadas com sucesso em substituição da areia como agregados no concreto. Estes novos compostos parecem oferecer um material atrativo, de baixo custo e com propriedades consistentes, além disso, eles ajudariam a resolver alguns dos problemas causados por resíduos sólidos de plásticos.

2.3.5. Propriedades do Concreto com Adição de Borracha de Pneus Inservíveis

Os estudos da adição de borracha de pneus inservíveis ao concreto de cimento Portland foram menos explorados que a adição de plásticos reciclados. Atualmente, isso vem sendo modificado devido às necessidades de destinação final adequada deste tipo de resíduo. Entretanto muito se deve avançar nesta área, principalmente, nas determinações quanto à durabilidade do concreto com adição de borracha de pneu, considerando que os teores de sulfatos são elevados devido ao processo de vulcanização da borracha.

O emprego de concreto com adição de borracha (CAB) é um caso típico de compósito com desempenho melhorado em algumas das propriedades originais, tal

como no aumento da capacidade de deformação sem o aparecimento de fissuras (FREITAS *et al*, 2009).

ELDIN e SENOUCI (1993) relataram que as misturas de concreto com adição de pneu apresentaram menor resistência de compressão e à tração se comparados com o concreto de Portland sem adição. Observou-se aproximadamente 85% de redução na resistência à compressão e 50% de redução na resistência à tração quando o agregado graúdo foi totalmente substituído por borracha moída grossa. No entanto, uma redução de, aproximadamente, 65% na resistência à compressão e uma redução de até 50% na resistência à tração foi observada quando o agregado miúdo foi totalmente substituído por partículas de borracha fina. Ambos tipos de misturas demonstraram uma falha dúctil e tinham a capacidade de absorver grandes quantidades de energia sob compressão e à tração.

TOUTANJI (1996) investigou a substituição dos agregados graúdos minerais do concreto por partículas de pneu. Foram empregadas misturas com 0, 25, 50, 75 e 100% em volume de borracha, na substituição dos agregados minerais por partículas de pneu. A mistura com 0% de agregados de pneu foi considerada mistura de controle. Não foram utilizados aditivos químicos ou minerais neste estudo.

Em geral, todas as misturas, a de controle e misturas com borracha de pneus, apresentaram trabalhabilidade aceitável em relação ao manuseio, adensamento e acabamento. A mistura de controle apresentou um *slump* de, aproximadamente, 76 mm e na mistura com teor de 100% de substituição dos agregados por partículas de borracha o slump diminuiu pela metade (38 mm). As outras misturas apresentaram slump entre 75 e 40 mm. No entanto, com a redução do slump devido à incorporação de agregado de borracha no concreto, as misturas, ainda, apresentaram uma trabalhabilidade aceitável, sem dificuldades no manuseio.

Na resistência a flexão também foi observada uma redução com o aumento no teor de agregados de borracha de pneu. Porém, a redução observada foi significativamente menor em comparação com a resistência à compressão. Os corpos de prova apresentaram uma redução de até 35% da sua resistência à flexão. A ruptura das amostras contendo agregados de borracha de pneus apresentaram modo de falha

dúctil em relação à mistura de controle. As amostras com adição de borracha de pneu apresentaram maior capacidade de absorver energia. Isso ocorreu devido à capacidade do agregado de borracha submeter-se a uma grande deformação elástica após fissuração, comprovando sua capacidade de deformação.

KHATIB e BAYOMY (1999) analisaram a viabilidade do CAB e verificaram que existiu uma diminuição do *slump* com aumento do teor de borracha em percentagem do volume total de agregado. Relataram que, no teor de borracha de 40%, o *slump* foi quase zero e o concreto não era viável em termos de trabalhabilidade. Também foi observado que as misturas feitas com borracha moída fina foram mais viáveis do que aquelas com pedaços grossos de pneu.

FREITAS *et al.* (2009) estudaram o desempenho físico-químico e mecânico do concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. Foram dosados os traços do concreto de referência e dos concretos com adição em peso de 5, 10 e 15% de borracha de pneu. A incorporação da borracha se deu em relação ao peso do agregado miúdo do CR, e em substituição parcial ao mesmo.

No caso da adição de borracha de pneus ao concreto, os autores constataram as seguintes possibilidades: (i) redução direta do impacto ambiental, por meio da retirada dos pneus inservíveis dispostos inadequadamente; (ii) imobilização dos resíduos de borracha em obras que têm vida útil estimada superior a 50 anos, tais como as barragens das usinas hidroelétricas e, (iii) preservação indireta do meio ambiente, pela diminuição do volume de extração de areia natural, processo que causa grandes prejuízos ao meio ambiente.

SIDDIQUE e NAIK (2004) concluíram que a redução na resistência à compressão do concreto confeccionado com agregados de borracha pode limitar seu uso para aplicações estruturais, mas os concretos com borracha também têm algumas características desejáveis, tais como baixa densidade, maior resistência ao impacto, maior ductilidade e melhor isolamento acústico. Essas propriedades podem apresentar vantagens para construções como calçadas e rodovias.

Finalmente, se a borracha pode ser usada em aplicações onde é necessário concreto com características associadas ao CAB, então a disposição de pneus usados

pode ser reduzida em grande volume.

Assim, a adição de borracha de pneus inservíveis no concreto pode contribuir para o meio ambiente com a redução do impacto causado pelo volume desse material considerado extremamente poluente.

2.4. DURABILIDADE E RECUPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Durante algum tempo acreditou-se que o concreto era um material de construção que poderia resistir ao tempo, prolongando indefinidamente a estabilidade das estruturas e eternizando as obras. Em geral, confiava-se que o concreto com boa resistência mecânica era extremamente durável.

Sabe-se, entretanto, que concretos resistentes do ponto de vista mecânico podem ser pouco duráveis. Assim, a durabilidade de um concreto não precisa estar relacionada diretamente com a resistência mecânica, tendo, por exemplo, outras propriedades como permeabilidade e difusibilidade de íons com maior influência nessa propriedade.

Recentemente, as falhas e ocasionais acidentes devido à inadequada durabilidade das estruturas de concreto têm intensificado as pesquisas a respeito das causas e naturezas dos processos de degradação.

O *Comité Euro-Internacional du Béton* (CEB) salienta que todas as pessoas envolvidas na criação e uso das estruturas de concreto deveriam ter, pelo menos, a possibilidade de obter um mínimo de entendimento dos mais importantes processos de degradação e os seus parâmetros (CEB, 1985).

Muitos são os parâmetros que influenciam na durabilidade das estruturas de concreto. Esses parâmetros e suas inter-relações, assim como seu desempenho, são apresentados, conforme abordagem do CEB, na Figura 5.

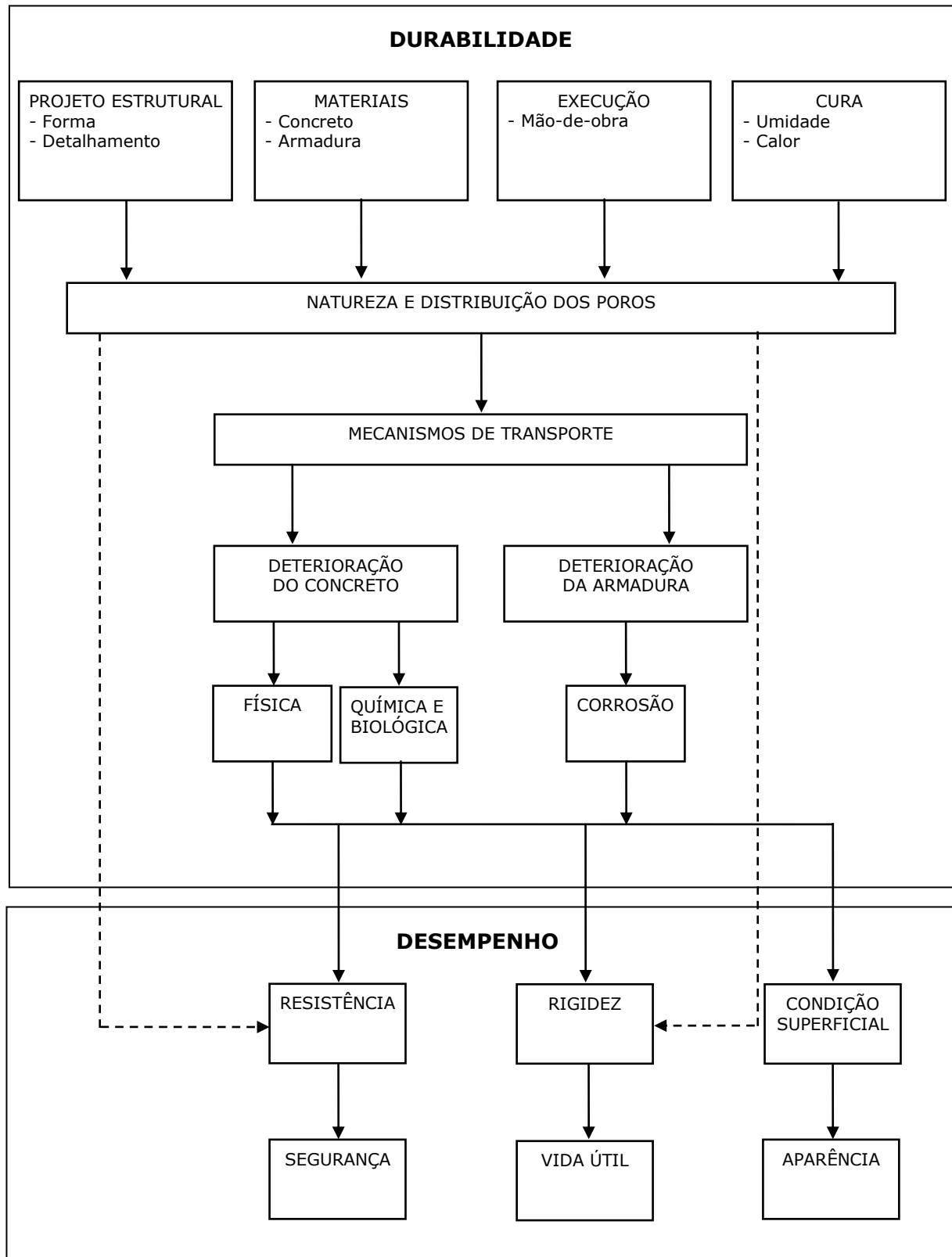


FIGURA 5 – DURABILIDADE E DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (FONTE: CEB, 1985).

Pode-se observar que a associação de transporte de calor, umidade e substâncias químicas, tanto no interior da massa de concreto quanto na troca com o ambiente, e os parâmetros que controlam estes mecanismos de transporte, constituem

os principais elementos da durabilidade.

O principal objetivo na prática é garantir desempenho satisfatório das estruturas de concreto durante um período de tempo suficientemente longo. Esse desempenho no tempo, seja devido à boa qualidade inicial ou a reparos na estrutura que sofreu processos de deterioração, pode ser chamado de vida útil da estrutura (Figura 6).

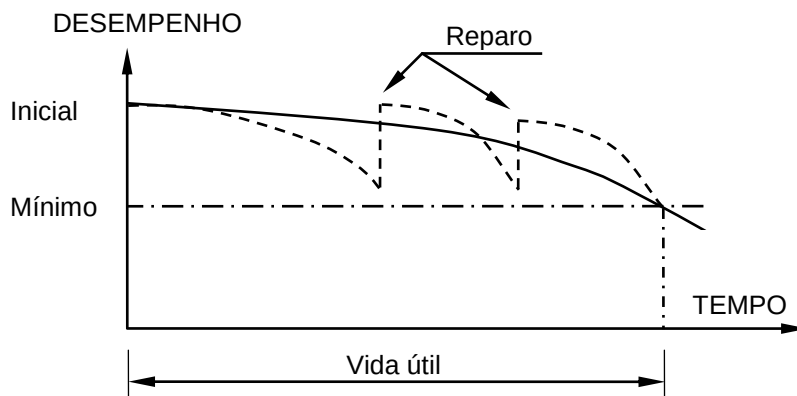


FIGURA 6 – DURABILIDADE, DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
(FONTE: CEB, 1985).

Em situações de ordem prática é problemático separar as causas dos processos de degradação do concreto e seus efeitos. MEHTA e MONTEIRO (2008) trazem significativa observação a esse respeito comentando que na prática, a deterioração do concreto raramente se deve a uma única causa. Normalmente, em um estágio avançado de degradação do material, há mais de um fenômeno deletério agindo. Em geral, as causas físicas e químicas da deterioração estão tão interligadas e mutuamente se reforçando, que separar as causas dos seus efeitos torna-se muitas vezes impossível.

Segundo SARJA (2000), os seguintes fatores de degradação podem ter a longo prazo efeitos sobre a capacidade de carga de estruturas de concreto:

1. Corrosão devido à penetração de cloretos;
2. Corrosão devido à carbonatação;
3. Abrasão mecânica;
4. Cristalização de sais nos poros;

5. Deterioração da superfície;
6. Ação do congelamento.

Além desses fatores de degradação descritos acima pode-se listar outros como reação álcali-agregado, efeitos do fogo e formação de etringita tardia ou secundária.

2.4.1. Classificação das Causas da Deterioração do Concreto

As causas da deterioração do concreto não acontecem isoladamente, conforme apresentado anteriormente, contudo, para a determinação dessas causas e seus efeitos pode-se classificá-las em: físicas, químicas e biológicas.

No caso do concreto armado, a corrosão da armadura de aço é o processo deletério mais significativo, comprometendo a estabilidade da estrutura, bem como sua durabilidade.

2.4.1.1. Causas físicas da deterioração do concreto

As causas físicas da deterioração do concreto foram agrupadas por METHA e GERWICK (1982) em duas categorias. A primeira categoria é composta pelo desgaste superficial devido à abrasão, erosão e cavitação. A segunda é composta pela fissuração devida à variação volumétrica, carregamento estrutural e exposição a extremos de temperatura. A Figura 7 apresenta um quadro com as causas físicas da deterioração do concreto.

MEHTA e MONTEIRO (2008) consideram que as perdas progressivas de massa da superfície do concreto podem ocorrer devido à abrasão, erosão e cavitação. Segundo os autores, o termo abrasão se refere ao atrito seco, como no caso de desgaste de pisos e pavimentos industriais devido ao tráfego de veículos. Erosão é normalmente usado para descrever o desgaste por ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão ocorrendo em estruturas hidráulicas como revestimentos de canais e vertedouros. A cavitação causa danos as estruturas hidráulicas, relaciona-se com a perda de massa pela formação de bolhas de vapor,

provocada súbita mudança de direção em águas que fluem rapidamente.

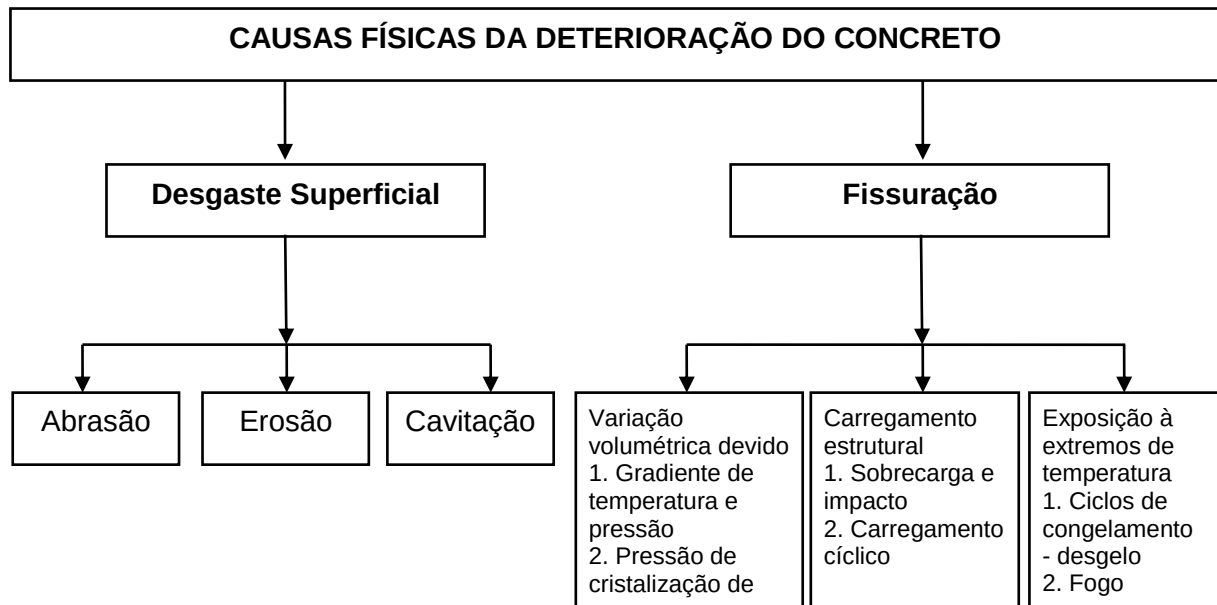


FIGURA 7 – CAUSAS FÍSICAS DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO (FONTE: MEHTA E MONTEIRO, 2008)

2.4.1.2. Causas químicas da deterioração do concreto

A durabilidade de um concreto, muitas vezes, pode ser determinada pela taxa em que o concreto é decomposto como resultado de reações químicas. Em todas estas reações, substâncias agressivas (íons e moléculas), são transportadas de algum lugar, principalmente do meio ambiente, levando uma substância reativa ao concreto.

Mesmo que a substância agressiva esteja presente no concreto, esta substância necessita ser transportada para a região da substância reativa para que ocorra a reação. Se não houver transporte dessa substância, não haverá reação.

Em geral, a substância agressiva e a substância reativa encontram logo uma região para acontecer a reação. Entretanto, frequentemente, por causa da baixa taxa de transporte de substâncias agressivas dentro e de fora para dentro do concreto, essas reações necessitam de muitos anos para revelar seus efeitos deletérios.

As reações químicas que podem levar a uma redução na qualidade da estrutura de concreto são bem estabelecidas. As principais reações químicas são:

- As reações de ácidos, sais de amônia e sais de magnésio com o cimento

endurecido;

- As reações de sulfatos com aluminatos do concreto;
- As reações de álcalis com agregados reativos do concreto;

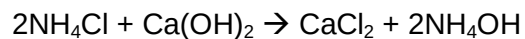
Essas reações causam danos à estrutura de concreto podendo ser consideradas mecanismos de ataque.

a) Ataque ácido

A ação dos ácidos (substâncias agressivas) no concreto endurecido (substâncias reativas) causa a conversão de todos os componentes de cálcio: hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado em sais de cálcio.

A ação do ácido clorídrico leva a formação do cloreto de cálcio, que é muito solúvel. As reações com ácido sulfúrico levam ao sulfato de cálcio que precipita como gipsita. O ácido nítrico forma o nitrato de cálcio que também é muito solúvel.

As reações com amônia na forma de cloreto de amônia e sulfato de amônia, encontradas comumente na indústria de fertilizantes e na agricultura, são capazes de transformar componentes das pastas de cimento em produtos altamente solúveis, por exemplo:



Equação 1

As soluções de magnésio reagem como o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland e formam sais de cálcio solúveis.

b) Ataque por sulfato

O ataque por sulfato no concreto é caracterizado pela reação química do íon sulfato como a substância agressiva com os componentes que contêm alumina presentes no cimento Portland.

Devido a presença de hidróxido de cálcio na pasta de cimento Portland hidratada, quando esta entra em contato com íons sulfato, ambos os hidratos que contêm alumina se convertem a uma forma altamente sulfatada chamada de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

As expansões no concreto relacionadas ao sulfato são associadas à etringita. A pressão exercida pelo crescimento de cristais de etringita e a expansão resultante da

adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco cristalina são duas formas de expansões possíveis.

A formação de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) também pode causar expansão. Entretanto tem-se observado que a deterioração da pasta de cimento endurecida pela formação de gipsita se dá por meio de um processo que primeiro leva a redução do pH do sistema e perda da rigidez e resistência, seguida pela expansão e fissuração e, por fim, pela transformação do concreto em uma massa pastosa ou não-coesiva (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Se o ataque por sulfato acontece quando a fonte de íons sulfato é do próprio concreto (substância reativa) tem-se a formação da etringita secundária ou tardia. Esse fenômeno acontece quando um agregado está contaminado com gipsita ou um cimento com alto teor de sulfato é utilizado na produção do concreto. A etringita tardia também pode acontecer em curas em elevadas temperaturas como nas curas a vapor.

c) Reações álcali-sílica

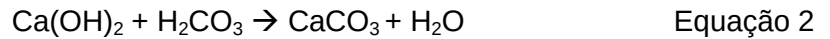
A expansão da fissuração do concreto que leva à perda de resistência e módulo de deformação também pode resultar de reações químicas envolvendo os álcalis e íons hidroxila da pasta de cimento Portland e certos minerais silicosos reativos que frequentemente estão presentes nos agregados (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

A reação começa com o ataque dos minerais silicosos do agregado pelos hidróxidos alcalinos. Esta reação resulta um gel de álcali-silicato nos planos mais fracos, nos poros do agregado ou na superfície das partículas do agregado. O gel absorve água apresentando, então, uma tendência de aumento de volume. Como o gel é confinado pela pasta de cimento hidratada, isto resulta em pressão interna levando a expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento. Este tipo de reação geralmente se manifesta por fissuração. As fissuras podem, então, facilitar a entrada de agentes agressivos.

d) Carbonatação do concreto

Devido a certas características do ataque ácido carbônico na pasta de cimento é exigido um estudo mais detalhado deste tipo de reação. As reações entre o ácido carbônico e hidróxido de cálcio presentes na pasta de cimento acontecem da

seguinte forma:



Segundo NEVILLE (1997), a carbonatação em si mesma não causa deterioração do concreto, mas tem efeitos importantes. Um desses efeitos é a reação por carbonatação que é provavelmente causada pela dissolução de cristais de Ca(OH)_2 , sob tensão devida à retração hidráulica, e decomposição do CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão.

A carbonatação influencia a durabilidade do concreto provocando uma redução no pH da água dos poros da pasta de cimento de valores entre 12,6 e 13,5 para cerca de 9. Em casos mais extremos, quando todo Ca(OH)_2 se carbonata, o pH pode chegar a cerca de 8,3.

2.4.1.3. Causas biológicas da deterioração do concreto

Estruturas de concreto podem ser deterioradas pela presença de fungos, musgos, algas e raízes de plantas e de árvores que penetram no concreto. Esses elementos biológicos causam deterioração mecânica da estrutura penetrando em trincas e pontos fracos do concreto, causando forças de ruptura e aumentando as trincas. Desta maneira, esses organismos podem reter água na superfície, levando a uma alta umidade no concreto e, conseqüentemente, a deterioração da estrutura.

A deterioração provocada pelos microorganismos, chamada de biodeterioração ou biodegradação, está relacionada com o crescimento desses microorganismos e sua reprodução, sua fixação e seu processo metabólico.

Os mecanismos de biodegradação, que promovem o envelhecimento, comprometem a durabilidade e integridade do concreto, podem se manifestar pela formação de biofilme, ataque ácido, tensões provocadas pela cristalização de sais e complexação (SILVA e PINHEIRO, 2005).

2.4.2. Corrosão das Armaduras de Aço

A corrosão da armadura de aço das estruturas de concreto é a maior preocupação da indústria da construção civil em termos de durabilidade e estabilidade das estruturas de concreto armado.

O aço no concreto é protegido contra corrosão pela passivação. A causa desta passivação é a alcalinidade do concreto com pH na ordem de 12,5. Quando o concreto apresenta elevado pH é formada uma camada de óxido na superfície do aço, essa camada trata-se de um filme passivante. Este filme passivo impede a dissolução do ferro. Então, a corrosão da armadura é impossível, mesmo se todas as outras condições para a corrosão forem satisfeitas, principalmente a presença de umidade e oxigênio (CEB, 1985).

Os concretos armados e as argamassas são materiais fortemente alcalinos. O pH da solução que preenche os poros está entre 12,5 e 14 e o potencial do aço no interior do concreto está entre +100 mV e - 400 mV, medido com respeito a um eletrodo de referência de hidrogênio. Nestas condições analíticas verifica-se que o aço está em uma condição estável, ou seja, de passividade.

Existem, atualmente, muitas técnicas eletroquímicas para avaliação do estado de corrosão das armaduras de aço do concreto armado. Podem ser citadas as técnicas de resistência elétrica, potenciais de corrosão, ruídos eletroquímicos, curvas de polarização, resistência de polarização, voltametria cíclica e impedância eletroquímica (POUPARD *et al.*, 2003). Dentre estas, se destaca como mais empregada a técnica de potencial de corrosão.

2.4.2.1. Técnica de Potenciais de Corrosão

O potencial de corrosão é uma técnica que vem sendo empregada na avaliação do estado quanto à corrosão das armaduras no concreto (PORTELLA *et al.*, 2001b). O valor do potencial obtido é indicativo do estado da armadura, principalmente, quando eles são extremos, seja porque indicam corrosão avançada (valores de potencial muito negativos) ou ausência de corrosão (valores de potencial muito

positivos).

HANSON (1984) citado por CASCUDO (1997) afirma que o potencial eletroquímico é uma medida da maior ou menor facilidade da transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto e que, portanto, trata-se de uma propriedade da interface aço-concreto e não apenas do aço.

Mesmo sendo marcadamente de caráter qualitativo a técnica de potencial de corrosão ou potencial de eletrodo, configura-se no procedimento de campo mais utilizado para monitorar estrutura de concreto armado sob o aspecto de corrosão de armaduras. Isto se deve, principalmente, pela facilidade de obtenção dos equipamentos que se constituem de um voltímetro de alta impedância de entrada e um eletrodo de referência em relação ao qual são medidos os potenciais. Como eletrodo de referência, os mais utilizados são o de Cobre-Sulfato de Cobre (ESC) e o de Calomelano Saturado (ECS). O eletrodo de trabalho passa a ser o próprio aço das armaduras analisadas.

A norma ASTM C 876/91 estabelece a forma de medição e os valores de potencial nos quais podem ser associados à probabilidade de corrosão, com relação ao Eletrodo de Cobre-Sulfato de Cobre. Nesta situação determinam-se, empiricamente após estudos de corrosão as probabilidades de corrosão segundo o potencial (CASCUDO, 1997).

Na Tabela 5, estão apresentados os valores de referência para a probabilidade de corrosão, em relação ao ESC.

TABELA 5 – PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de cobre-sulfato de cobre (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que -350	95
Mais positivo que -200	5
De -200 a -350	Incerta

Fonte: ASTM C-876.

2.4.3. Reparos de Estruturas de Concreto

Os reparos de estruturas de concreto degradadas são importantes não somente para garantir a vida útil planejada, mas também para proporcionar bom

desempenho e segurança frente as mais severas solicitações.

Um bom reparo melhora a função e o desempenho da estrutura, restaura e aumenta a sua resistência e rigidez, melhora a aparência da superfície do concreto, fornece impermeabilidade à água, impede a penetração de espécies agressivas na interface concreto/aço e melhora sua durabilidade (AL-ZAHRANI *et al*, 2003).

Quando se faz o procedimento de reparo de uma estrutura de concreto utiliza-se o chamado material de reparo (MR), podendo ser este o concreto convencional, o mesmo da estrutura da base, aplicado como reparo e, em outros casos, pode ser indispensável o uso de material com melhor desempenho.

Vários materiais são comercializados para reparo de estruturas de concreto deterioradas. Os MRs mais empregados são as argamassas com sílica ativa, resina epóxi, resina de poliéster, concretos/argamassas com polímeros e concreto reforçados com fibras orgânicas ou metálicas.

Para a realização de reparos em uma estrutura de concreto deve-se ter em consideração, primeiramente, o conhecimento das principais causas ou origem dos defeitos e a extensão da deterioração gerada, além das condições ambientais, solicitações externas impostas, necessidades de projeto e interesses do cliente. A partir de então, segue-se pela escolha do material de reparo propriamente dito, que atenda às especificações de projeto como um todo, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 8.

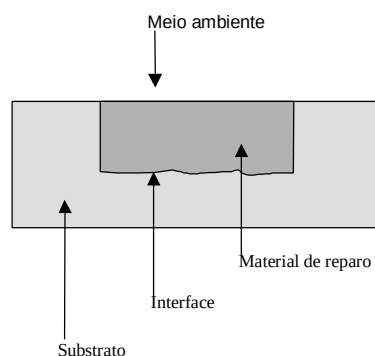


FIGURA 8 – SISTEMA DE REPARO: SUBSTRATO/MR.

O MR deve ter características compatíveis com o meio ambiente e com o substrato de forma que a ancoragem seja perfeita e tenha durabilidade. Um requisito importante, a ser considerado na recuperação de uma determinada superfície, é o

comportamento dimensional do MR relativo ao do substrato a ser reparado. Variações diferenciais, em volume, podem causar tensões internas no material endurecido e, por sua vez, o surgimento de fissuras, perda de capacidade de carga e outros defeitos que contribuirão para a deterioração da estrutura como um todo, tal como o próprio deslocamento do reparo efetuado.

2.4.3.1. Reparos em estruturas hidráulicas

O concreto é o material mais aplicado nas estruturas hidráulicas. No decorrer do tempo essas estruturas estão sujeitas aos mais variados tipos de degradações, sendo então necessário a execução de manutenção das obras, além de possíveis reparos.

Os serviços de recuperação das estruturas hidráulicas são extremamente dispendiosos. Segundo SMOAK (1998) operações de recuperação e manutenção de infraestruturas de recursos hídricos, localizados principalmente nas zonas climáticas mais severas dos Estados Unidos, representaram gastos de mais de 17 bilhões de dólares.

No Brasil, a preocupação quanto à segurança dos barramentos normalmente se dirige aos problemas estruturais, principalmente em função dos resultados catastróficos, da perda de geração (ou de capacidade de abastecimento, etc), gastos com indenizações, custos de recuperação e desvalorização no nome e prestígio da Empresa (CARDIA, 2008).

Certamente, devido aos grandes custos dos reparos, o guia para reparo de concreto do Bureau of Reclamation – USA, destaca o compromisso de se avaliar a necessidade de Reparo (SMOAK, 1998).

O processo de execução de um reparo mais importante é o preparo da superfície. Caso a superfície da estrutura a ser reparada não seja bem preparada o serviço não obterá o desempenho desejado. A preparação da superfície compreende as etapas de limpeza superficial, demarcação da área do reparo com disco de corte, remoção do concreto deteriorado com ferramentas pneumáticas e jateamento abrasivo

na superfície do concreto e do aço para remoção total dos pontos de corrosão e partículas soltas.

Quando os reparos de concreto apresentam espessuras entre 2 e 15 cm estão sujeitos às condições de cura inadequadas, como resultado da perda de umidade por evaporação e da absorção capilar do substrato de concreto velho. Nesses casos, raramente, é desenvolvida resistência de aderência aceitável entre o concreto antigo e o material de reparo.

Para os reparos de superfície é indicado o uso de resina epóxi de ligação para que seja garantido um vínculo, forte e durável entre o concreto antigo e concreto de reparo. Outra vantagem do uso da resina epóxi é a alta resistência atingida pelo material nas primeiras horas de aplicação. Existem no mercado, adesivos estruturais à base de resina epóxi de pega rápida que apresentam boa resistência mecânica após duas horas da mistura bicomponente.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme observado na revisão bibliográfica a adição de materiais poliméricos reciclados vem sendo mundialmente estudada e aplicada como uma solução para os problemas ambientais gerados por estes materiais.

No Brasil as maiores quantidades de plásticos pós-consumo podem ser verificadas para o PEBD (34,30%) e PET (19,79), conforme apresentado na Tabela 1. Estes são os materiais de maior quantidade de reciclagem (Tabela 2).

Os pneus inservíveis são altamente poluentes quando indevidamente lançados na natureza e de difícil reciclagem quando recolhidos, exigindo para isso processos complexos e de elevado custo.

Portanto, o PEBD, PET e pneus inservíveis foram selecionados como materiais poliméricos reciclados para o presente trabalho, onde foram verificadas suas propriedades quando adicionados ao concreto destinado ao reparo de superfícies hidráulicas erodidas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO

Como estudo de caso foi avaliado o reparo da calha do vertedouro da Usina Hidroelétrica Mourão, com o emprego de materiais de reparo de concreto com adição de materiais poliméricos.

Segundo relatórios elaborados pela COPEL/LACTEC/ANEEL, nos Relatórios 0554/2000 e 1288/2005 (PORTELLA *et al*, 2000 e GARCIA *et al*, 2005), foram constatados problemas de delaminação da superfície hidráulica.

Foi realizada inspeção técnica na Barragem da UHE Mourão, no município de Campo Mourão, estado do Paraná. Nesta inspeção foram verificadas as condições gerais da represa e coletados dados relativos à água represada.

Na inspeção visual constatou-se o deslocamento das camadas de revestimento da barragem e a formação de carbonato de cálcio, originando a patologia denominada de carbonatação (Figura 9a). Também foram verificados pequenos ninhos de concretagem, popularmente conhecidos como bicheiras, que podem afetar a durabilidade e resistência das estruturas de concreto (Figura 9b).



(a)



(b)

FIGURA 9 - DETALHE DO DESPLACAMENTO E CARBONATAÇÃO (A). NINHO DE CONCRETAGEM (B).

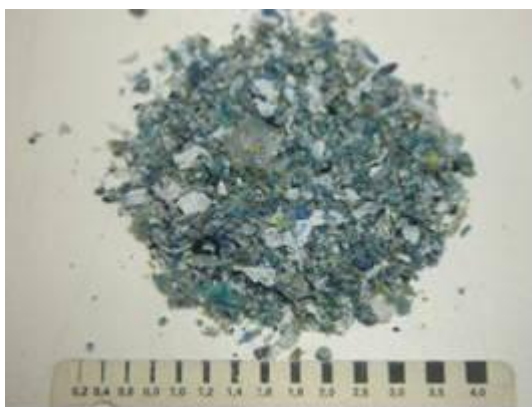
3.2. SELEÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA ADIÇÃO EM CONCRETO

Foram verificados os principais materiais utilizados na confecção de concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP), com análise dos materiais disponíveis no mercado e identificação dos mais comumente utilizados em obras de reparo. Dentre as fibras comerciais, verificou-se que o polipropileno foi tipo de material mais utilizado.

Observou-se, então, a possibilidade de atender a uma importante questão ambiental: Uso de materiais poliméricos reciclados em substituição aos materiais industrializados destinados aos procedimentos de reparo. Neste caso, constatou-se, imediatamente, uma significativa redução nos custos de produção do MR quando comparados o uso de material polimérico reciclado e industrializado.

Foram realizadas visitas em indústrias de reciclagem de plásticos. Nas visitas foram reconhecidos os processos de reciclagem de plásticos: recebimento, separação, classificação, limpeza, descontaminação, moagem, aglutinação, pré-aquecimento e extrusão.

Dentre os materiais existentes nas indústrias de reciclagem de plásticos foram selecionados, em função do seu formato semelhante ao das fibras e à etapa do processo de reciclagem, o PET moído e o PEBD aglutinado (Figura 10). O material PET foi amplamente estudado como agregado ou fibra de reforço em concreto, entretanto o PEBD aglutinado não passou por este tipo de análise, principalmente, quanto sua aplicação, atualmente inédita, como material de reparo.



(a)



(b)

FIGURA 10 - AMOSTRA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PEBD AGLUTINADO (A). PET MOÍDO (B).

Seguindo os trabalhos desenvolvidos na literatura (FREITAS *et al.*, 2009, PORTELLA *et al.*, 2008a, LI *et al.*, 2004 e SIDDIQUE e NAIK 2004), propôs-se o uso de fibras de pneus inservíveis ao CRF, pois os resultados obtidos até o presente momento indicam que este tipo de material apresenta bons resultados técnicos e tem grande aceitação quando resolve um problema ambiental. Por essas condições o concreto com adição de fibras de pneu inservível torna-se um provável material de reparo de superfícies de estruturas hidráulicas.



FIGURA 11 - AMOSTRA DE FIBRAS DE PNEU.

Ainda como material polimérico adicionado ao concreto, buscou-se, uma comparação técnica com o concreto reforçado com fibra de PP, visto que este material é utilizado como material de reparo nas superfícies de estruturas hidráulicas. Outros tipos de fibras poliméricas industrializadas para confecção de CRF também foram selecionadas, são elas: fibra multifilamento de PP, fibra corrugada de PET e microfibra de PE e PET.

3.2.1. Análise Preliminar dos Teores Adicionados ao Concreto

A literatura indicou como uso habitual de materiais poliméricos adicionados de concreto na forma de fibra constituindo o CRF um teor de adição na ordem de 1 a 5%. Geralmente os trabalhos comparavam teores de 0,2; 0,5; 1; 2 e 4% em peso de cimento. Cabe salientar que os materiais poliméricos desses trabalhos são industrializados e têm elevado custo, inviabilizando a questão custo-benefício. Por outro lado, com o uso de material reciclado de baixo custo, busca-se resolver problemas ambientais, portanto, desse ponto de vista, quanto maior o teor aplicado,

maiores serão os benefícios ambientais.

Para analisar os teores de adição usados no trabalho foram verificadas inicialmente as propriedades mais notáveis do concreto como é o caso da trabalhabilidade e da resistência à compressão axial. Nesta análise foram utilizados o PET moído, o PEBD aglutinado e fibra de borracha obtida a partir de pneus moídos, em comparação ao concreto de referência. O teor de cada material utilizado, inicialmente, foi de 1, 2, 5, 10 e 15% em substituição parcial do agregado miúdo.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a caracterização dos materiais utilizados como insumos dos concretos estudados foram executados em laboratório, seguindo-se a norma pertinente a cada tipo de amostra apresentada, os ensaios listados nas Tabelas 6, 7 e 8.

TABELA 6 – ANÁLISES QUÍMICAS DO CIMENTO.

Referência	Título	Determinação
NBR 8347/92	Cimento Portland pozolâmico, cimento Portland comum e cimento Portland composto com adições de materiais pozolâmicos – Análise química – Método de referência	Análise química
NBR 5743/89	Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo – Método de ensaio	Perda ao fogo
NBR 5744/89	Cimento Portland – Determinação de resíduo solúvel – Método de ensaio	Resíduo insolúvel
NBR 5745/89	Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico – Método de ensaio	Teor de SO ₃
NBR 5747/89	Cimento Portland – Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama – Método de ensaio	Teor de Na ₂ O e K ₂ O
NBR 7227/89	Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol - Método de ensaio	Teor de CaO livre
NBR 9203/85	Cimento Portland comum e clínquer - Análise química por complexometria - Método de ensaio	Teores de Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO

TABELA 7 – ALISES FÍSICAS DO CIMENTO.

Referência	Título	Determinação
NBR 11579/91	Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 mm (nº 200) – Método de ensaio	Resíduo nas # 200 e 325
NBR 11581/91	Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega – Método de ensaio	Tempos de pega
NBR 11582/91	Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – Método de ensaio	Expansibilidade a quente
NBR NM 23/01	Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica	Massa específica
NBR NM 76/98	Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)	Finura

TABELA 8 – ANÁLISES QUÍMICAS DO CIMENTO.

Referência	Título	Determinação
NBR 9773/87	Agregado - Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado	Reatividade
NBR 7217/87	Determinação da composição granulométrica dos agregados - Método de ensaio	Granulometria
NBR 7218/87	Determinação do teor de argila em torrões nos agregados - Método de ensaio	Teor de argila em torrões
NBR 7219/87	Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados - Método de ensaio	Material pulverulento
NBR 7220/87	Avaliação das impurezas orgânicas húmicas das areias para concreto - Método de ensaio	Avaliação das impurezas orgânicas
NBR 9776/87	Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman	Massa específica e SSS
NBR 9937/87	Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio	Absorção, massa específicas SSS
NBR NM 30/01	Agregado miúdo - Determinação da absorção de água	Absorção

Em decorrência falta de normas de caracterização dos materiais poliméricos reciclados, estes foram analisados seguindo-se as normas pertinentes aos agregados do concreto.

3.3.1. Estudo de Dosagem

O estudo de dosagem teve como objetivo analisar a melhor relação de materiais constituintes do concreto a ser estudado. Para isso foram feitas quatro misturas de material alterando-se a quantidade de agregado miúdo em relação ao cimento e agregado graúdo, mantendo-se fixa a relação água/cimento próxima de 0,5 ($a/c = 0,5$) e abatimento de cone estipulado em 30,0 (± 10) mm.

A melhor proporção encontrada de cimento, pedra britada, areia e água foi de 1:1,97:3,04:0,45, apresentando $f_{c28} = 34,3$ MPa. Esta mistura forneceu o que foi considerado o concreto de referência (CR), a partir do qual foram adicionados os materiais poliméricos em substituição parcial da areia.

3.4. EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS DA UHE MOURÃO

Para melhor determinação das condições da calha do vertedouro da UHE Mourão, foram extraídos testemunhos de concreto do local.

Foram selecionados três pontos para fixação do equipamento de extração

(HILTI DD 200) e, em cada ponto, foram feitas quatro perfurações de 105 mm de diâmetro e aproximadamente 35 cm de profundidade, resultando, então, em 12 testemunhos de concreto, conforme ilustrado na Figura 12.

Os testemunhos foram destinados a ensaios de resistência à compressão e resistência de aderência entre o concreto velho e o novo, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS).

O ensaio de resistência à compressão foi executado conforme a norma da ABNT - NBR 5739/07 - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto, onde os testemunhos foram cortados em serra de disco diamantado no comprimento de 20 cm.



(a)



(b)

FIGURA 12 - PONTOS DE FIXAÇÃO E PERFURAÇÃO (A). DETALHE DOS CORPOS-DE-PROVA (B).

3.4.1 Reparo dos Pontos de Extração

Após a execução dos serviços de extração, os pontos de perfuração foram reparados com argamassa especial. Como material de reparo dos pontos perfurados foi utilizado argamassa especial de elevada resistência e boa fluidez (graute).

3.5. DOSAGENS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS

Com a finalidade de determinar o teor ideal de adição de cada tipo de material polimérico reciclado foram realizadas dosagens com teores de 1, 2, 5, 10 e 15% em

substituição ao agregado miúdo. Verificou-se que os teores de 10 e 15% de adição de material polimérico reciclado prejudicava a mistura do concreto em betoneira, sendo então esse teor de adição descartado. Então os teores estudados passaram a ser 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 7,5%.

Os trabalhos de dosagem tiveram início com a preparação da betoneira na limpeza e aplicação de argamassa. Nas betonadas procedeu-se com a mistura inicial dos agregados e cimento, em seguida a adição da fibra e após mistura com a água de amassamento durante 3 minutos, repouso de 3 minutos e mais 2 minutos de mistura (Figura 13a).

Nos teores mais elevados de fibra polimérica a mistura de concreto apresentou um aspecto de “esferas” não coesas (Figura 13b) e consequente perda da trabalhabilidade.



(a)



(b)

FIGURA 13 - MISTURA DO CONCRETO COM PEBD ANTES (A) E APÓS ADIÇÃO DA ÁGUA DE AMASSAMENTO (B)

Para cada betonada executou-se o *slump test* com o abatimento de cone esperado de 30 mm. Nos casos onde não foi obtido esse abatimento utilizou-se aditivo plastificante de pega normal (Mastermix 397N) ao teor de 0,2% em relação ao peso de cimento. Nos casos onde o teor de 0,2% de aditivo plastificante não era suficiente para obter-se a trabalhabilidade desejada com o abatimento especificado adicionava-se mais 0,2% e realizado novo *slump test* e assim sucessivamente até atingir 30 ± 10 mm de abatimento.

Constatou-se que quanto maior era o teor de fibra polimérica utilizado, menor

era a trabalhabilidade e, conseqüentemente, mais aditivo plastificante era utilizado.

Na dosagem com 10% de fibra de PEBD utilizou-se 0,8% de aditivo plastificante para a obtenção de 30 mm de abatimento de cone. Após moldagem, adensamento e 24 horas de cura os corpos-de-prova não apresentavam resistência suficiente para proceder com a desforma, conforme ilustrado na Figura 14. Os ensaios de dosagem deste teor foram repetidos no dia seguinte com a intenção de determinar o maior teor aceitável de aditivo plastificante e o respectivo abatimento (Tabela 9). Concluiu-se que até o limite de 0,7% de aditivo plastificante a mistura não era prejudicada. Portanto não é indicado o uso acima deste limite, com possíveis dificuldades em termos de cura do material.

TABELA 9 – TEOR DE ADITIVO PLASTIFICANTE E ABATIMENTO NA MISTURA COM 10% DE PEBD.

Teor de aditivo em relação ao peso de cimento (%)	Abatimento (mm)
0,0	0
0,2	0
0,4	5
0,5	10
0,6	15
0,7	25
0,8	30

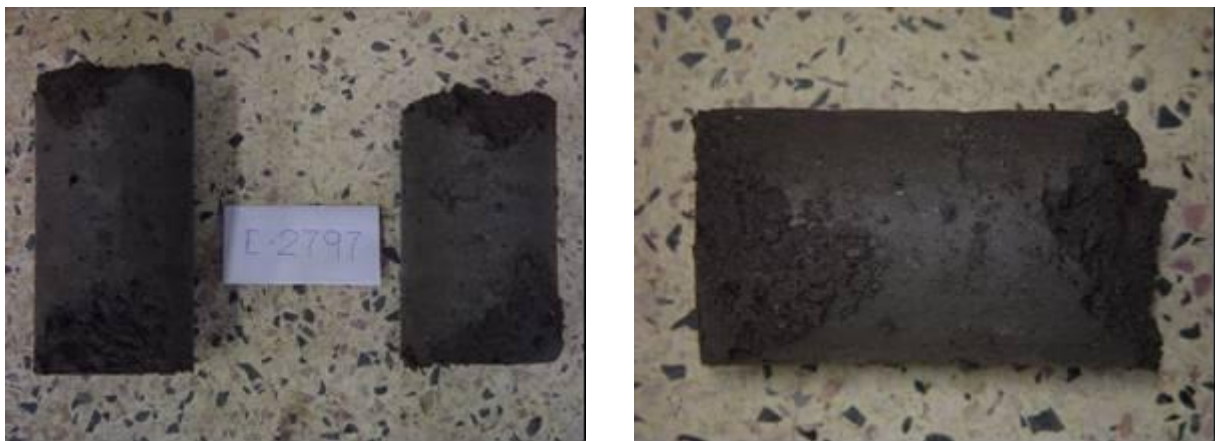


FIGURA 14 - CORPOS-DE-PROVA COM ELEVADO TEOR MATERIAL POLIMÉRICO RECICLADO E ADITIVO PLASTIFICANTE APÓS DESFORMA

Verifica-se que os corpos de prova da Figura 14 estão “verdes”, termo utilizado para designar concretos que não foram devidamente curados. Suas extremidades foram fragmentadas no procedimento de desforma após 24 horas de cura.

3.6. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

As normas brasileiras vigentes não contemplam ensaios de aderência de corpos de prova de concreto. Esta problemática fica evidente quando se necessita determinar as propriedades da interface entre concretos de diferentes idades, como é o caso do material de reparo depositado sobre a superfície de um substrato qualquer.

Para determinar a resistência de aderência entre a superfície do substrato e o MR, utilizaram-se outros parâmetros de ensaios conhecidos e previstos nas normas e em procedimentos consagrados na literatura ou nos centros de pesquisa reconhecidos. A seguir estão descritos os procedimentos inovadores executados para a determinação da resistência de aderência.

Os corpos de prova destinados aos ensaios de aderência visaram simular a interface de contato entre o concreto velho, chamado de substrato, e o concreto novo, chamado de material de reparo. O concreto de substrato consistiu nos testemunhos retirados do vertedouro da UHE Mourão, contados em serra disco diamantado com altura de, aproximadamente, 12 cm. Foram considerados materiais de reparo os concretos com adição de material polimérico.

Para promover a aderência entre o substrato e o material de reparo a superfície cortada foi escarificada manualmente com o uso de martelo de pedreiro e talhadeira de aço.

Foi encontrada grande dificuldade em preparar os corpos de prova cilíndricos pelo processo de apicoamento manual (martelo ou talhadeira), pois as bordas rompiam facilmente retirando lascas do material e comprometendo a face cortada. Essa dificuldade levou aos testes de aderência na superfície de corte.

3.6.1. Ensaios de Resistência de Aderência na Superfície de Corte

Para preparar os moldes foram utilizadas tubulações e conexões de PVC para esgoto de 100 mm. Nos CP's ensaiados na superfície de corte utilizou-se luva simples de esgoto de 100 mm (PVC), com diâmetro interno de 107 mm, cortada com serra fita, retirando-se as alças de engate (Figura 15a). As rebarbas foram removidas

com lixa nº 700.

A superfície do concreto foi preparada com escova de aço. O CP do testemunho foi depositado sobre a conexão de PVC, sendo garantido o alinhamento do CP com a luva. O espaço restante entre a luva e o CP foi preenchido com cola de silicone transparente, proporcionando vedação, além de fixar o concreto à conexão de PVC (Figura 15b). A cola secou durante 24 horas.



FIGURA 15 - LUVA SIMPLES DE ESGOTO COM A ALÇA DE ENGATE CORTADA (A). PREENCHIMENTO DOS ESPAÇOS E FIXAÇÃO COM COLA DE SILICONE TRANSPARENTE (B).

Mesmo tendo as faces da conexão de PVC perfeitamente lisa, tomou-se o cuidado de aplicar óleo desmoldante no molde.

Com a finalidade de se analisar os possíveis materiais a serem utilizados como ponte de aderência entre o substrato e o MR, procedeu-se da seguinte forma:

a. **Ponte de aderência: nata de cimento.** A nata foi preparada com a mistura de cimento e água na razão 1:1. Com o uso de pincel a nata foi espalhada na superfície saturada do substrato em camada fina e uniforme.

b. **Ponte de aderência: adesivo acrílico, em pintura econômica de pasta de cimento.** A pasta foi confeccionada com o líquido e o cimento na proporção 1:1 e espalhada sobre a superfície saturada em água do substrato com pincel.

c. **Ponte de aderência: Adesivo estrutural à base de resina epóxi de alta viscosidade.** Foram misturados os componentes A e B na proporção de 77:23. Este material foi aplicado na superfície seca do substrato com a espessura de aproximadamente 2 mm, com o uso de uma espátula metálica.

Colocou-se cada um dos concretos estudados como materiais de reparo sobre a superfície preparada e ainda úmida com espessura de 35 mm. Procedeu-se o adensamento manual com o uso de um bastão de vidro.



(a)



(b)

FIGURA 16 - APLICAÇÃO DE PONTE DE ADERÊNCIA DE RESINA EPÓXI (A). SUPERFÍCIE APÓS APLICAÇÃO DE PONTE DE ADERÊNCIA DE ADESIVO ACRÍLICO (B).

Cobriram-se os moldes com o material de reparo com filme de PVC para manter a água do concreto durante as primeiras horas. O desmolde aconteceu após 72 horas de cura. Retirou-se a cola de silicone integralmente, cortando-se com lâmina de estilete. Executaram-se com batidas laterais na luva de PVC para soltar o concreto do molde. Com cilindro de aço com diâmetro de 75 e 100 mm altura (Figura 17b), colocado no concreto de reparo, retirou o material do molde com golpes verticais na luva de PVC até soltá-la. A limpeza dos resíduos de cola de silicone e excesso de concreto nas bordas aconteceu com o uso de escova de aço.



(a)



(b)

FIGURA 17 - RETIRADA DA COLA DE SILICONE COM USO DE ESTILETE (A). RETIRADA DO MOLDE (B).

Ao final da preparação dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência de aderência os materiais foram levados à câmara úmida a 23 °C até os 28

dias de cura. Aos 23 dias foi aplicado cola epóxi e fixado as placas de aço para realização do ensaio de aderência (Figura 18a), seguindo-se o proposto nos procedimentos para ensaios de tração direta.

Os corpos de prova formados pelos conjuntos substrato/material de reparo foram ensaiados em prensa universal monitorada por microcomputador sob tração direta (Figura 18b).



(a)



(b)

FIGURA 18 - DETALHE DO CP PREPARADO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (A).
CONJUNTO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO (B).

3.6.2. Ensaios de Resistência de Aderência na Superfície de Fratura

Notadamente, os ensaios de resistência de aderência nos corpos de prova com a interface na superfície de corte apresentaram valores relativamente baixos, pois a superfície estuda era lisa não oferecendo a devida aderência. Utilizando-se a superfície de ruptura como interface do substrato e material de reparo, aumentou-se a rugosidade favorecendo a aplicação da ponte de aderência e, conseqüentemente, sua resistência de aderência.

Como o sistema adotado para a superfície de corte não foi possível, visto que o topo na superfície não era perpendicular às faces laterais, foi empregado outro método similar de formas de PVC (tubo de esgoto 100 mm). Os tubos de esgoto foram cortados com comprimento de 12 cm. Confeccionou-se um corte lateral do tubo com a finalidade de aumentar o diâmetro interno, conforme a Figura 19.

O aumento no diâmetro dos tubos gerou um espaçamento que foi preenchido

com uma lâmina de cerca de 2 cm de largura proporcionando o fechamento do vazio.

Para melhor vedação outro tubo de PVC cortado na lateral, igual ao anterior foi colocado, externamente, eliminando possíveis vazamentos laterais. No molde fez-se uma marcação para limitar a altura de concretagem. Com o uso de fita adesiva transparente completou-se a vedação na parte inferior da forma montada em PVC.



FIGURA 19 - CORTE NO COMPRIMENTO (A). MARCAÇÃO DA ALTURA DE CONCRETAGEM (B).

Os procedimentos de lançamento, adensamento e cura foram iguais aos utilizados nos corpos de prova nas superfícies de corte.

3.6.3. Avaliação da Ponte de Aderência

Com a finalidade de determinar o material e método mais indicados para promover a ligação entre o substrato e o material de reparo foram analisadas diferentes aplicações de ponte de aderência.

Todos os corpos de prova foram saturados em água, exceto o que utilizou adesivo estrutural à base de resina epóxi, que foi aplicado em superfície limpa e seca. Os tipos de ponte de aderência e os tempos de cura estudados estão apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 – TIPOS DE PONTE DE ADERÊNCIA APLICADOS.

Tipo de interface	Tempo de cura (dias)
Sem ponte de aderência	28
Nata de cimento	28
Pintura com adesivo acrílico com nata de cimento	28
Pintura com adesivo acrílico com nata de cimento	7
Adesivo estrutural à base de resina epóxi	7

Também foram avaliadas as resistências de aderência em função do tipo de material de reparo de concreto confeccionado com adição de PET, PEBD e pneu nos teores de adição de 2,5 e 5,0%, para cada tipo de material reciclado. Na avaliação em função do tipo de MR não foi empregada ponte de aderência, apenas tomou-se o cuidado de umedecer a superfície de contato do concreto antigo.

3.7. APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO NO VERTEDOIRO DA UHE MOURÃO

Com o objetivo de verificar o desempenho do material de reparo aplicado na estrutura hidráulica, foi realizada a aplicação dos materiais estudados na calha do vertedouro da Usina Hidroelétrica Mourão, concretos com adição de materiais poliméricos reciclados e industrializados.

A aplicação dos materiais de reparo compreendeu as etapas de seleção pontos de aplicação, corte e escarificação, dosagem dos concretos e aplicação propriamente dita.

3.7.1. Seleção dos Pontos de Aplicação

Os pontos de aplicação dos materiais de reparo foram selecionados no vertedouro após observação completa do estado de degradação da barragem e localização das patologias expostas nos blocos de concretagem dos quais foram retirados os testemunhos anteriormente.

Na escolha dos pontos também foi levada em consideração a possibilidade de execução dos trabalhos sem a necessidade da instalação de andaimes, plataformas ou uso de escadas, evitando-se os trabalhos em altura e reduzindo os riscos de acidentes.

As regiões com curvatura no vertedouro também foram evitadas para a aplicação do material de reparo devido à existência de fortes efeitos de cavitação diferencial, o que poderia comprometer os ensaios comparativos de campo.

Inicialmente, os pontos que apresentavam manifestações patológicas

superficiais e/ou sinais de reparos anteriores foram marcadas com giz branco, limitando-se as áreas. A dimensão em moda foi de 75 x 75 cm.

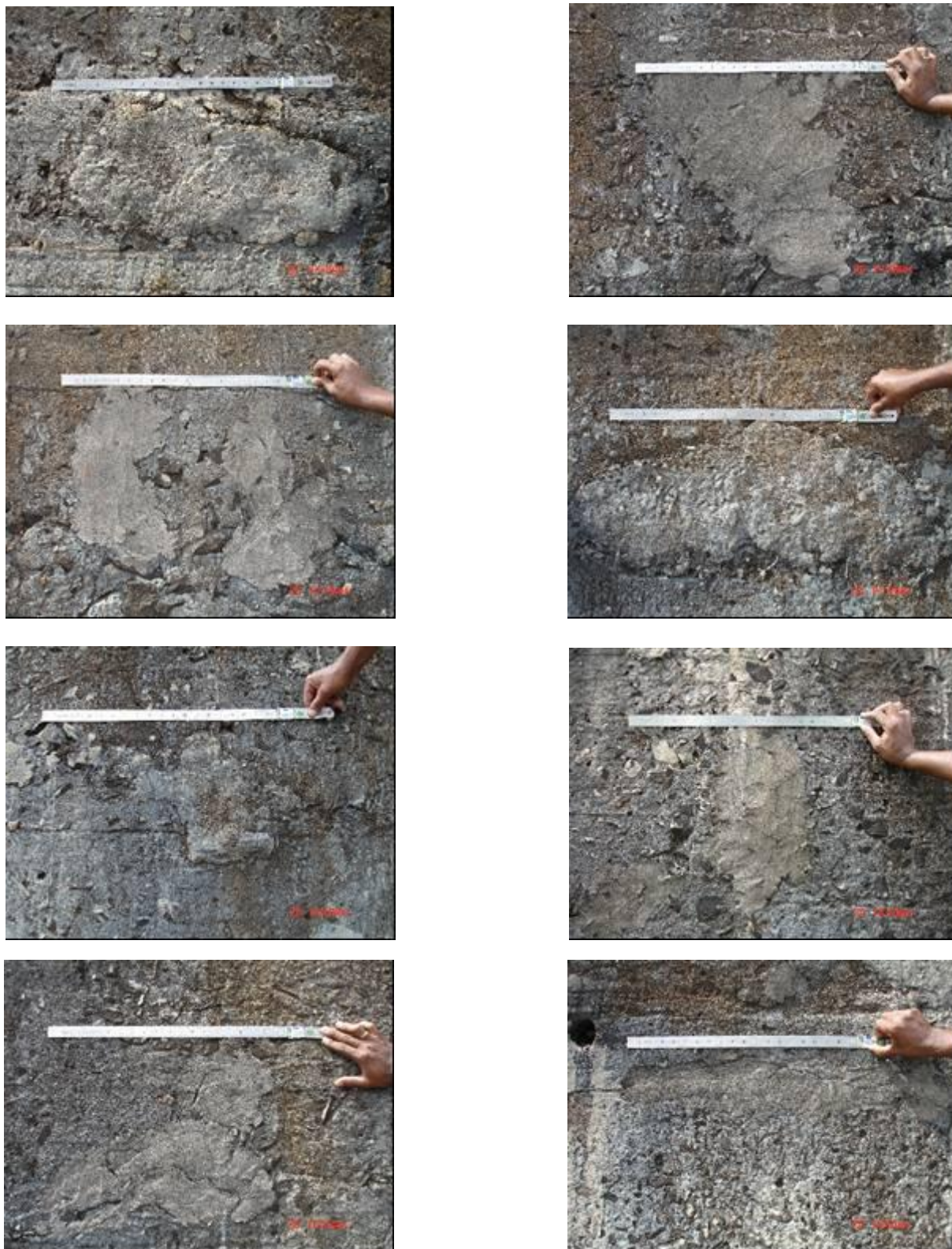


FIGURA 20 - IDENTIFICAÇÃO DAS PATOLOGIAS SUPERFICIAIS E ESCOLHA DOS PONTOS DE APLICAÇÃO

O padrão de área determinado para a aplicação dos materiais de reparos foi o quadrado de 75 x 75 cm. Nos pontos onde extensão da patologia excedia aos 75 cm demarcaram-se retângulos com área constante de 5625 cm².

Após a definição dos pontos e limitação das áreas, esses foram identificados e marcados com tinta. Para cada ponto foi determinado o tipo material de reparo a ser utilizado.



FIGURA 21 - LIMITAÇÃO DAS ÁREAS COM MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS SUPERFICIAIS (A). IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS E DO TIPO DE MR A SER APLICADO (B).

3.7.2. Cortes e Escarificação

Os pontos foram inicialmente cortados nas linhas limites das áreas selecionadas, delimitando a região do corte. No processo de corte úmido utilizou-se serra de disco diamantado, conforme ilustra a Figura 22a.

Após o corte na linha limite iniciou-se a escarificação com martelo elétrico-mecânico. Neste procedimento empregaram-se três equipamentos de diferentes potências e bitolas de ferramenta. Os equipamentos mais pesados foram empregados no trabalho inicial e remoção do volume de material degradado até encontrar-se concreto íntegro (Figura 22b). Outro equipamento mais leve foi usado para acabamento e retirada do material degradado nas extremidades do ponto.

Para facilitar a escarificação executaram-se, com a serra de disco, cortes verticais na profundidade de remoção do material dentro da área limitada no ponto de aplicação do material de reparo.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 22 - CORTE COM SERRA DE DISCO NA ÁREA LIMITADA (A). ESCARIFICAÇÃO DO PONTO (B). EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS PROCEDIMENTOS DE CORTE E ESCARIFICAÇÃO (C). PONTOS PREPARADOS PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL DE REPARO (D).

3.7.3. Dosagens dos Concretos Aplicados como MR

Observando-se as condições de segurança e logística, as dosagens foram efetuadas na ombreira esquerda da barragem. O concreto fresco foi transportado até o vertedouro no ponto de aplicação do material de reparo.

Os materiais e equipamentos foram transportados sobre a ombreira esquerda da barragem até as proximidades com o vertedouro onde, com a ajuda de um guincho elétrico alimentado por um gerador elétrico a gasolina, eram içados. O guindaste foi fixado à barragem por um sistema de encaixe, sem a necessidade de perfurações ou outro tipo de dano à estrutura de concreto (Figura 23).



(a)



(b)

FIGURA 23 - SISTEMA DE TRANSPORTE VERTICAL DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS (A). DETALHE DA FIXAÇÃO DE BASE DO GUINDASTE À BARRAGEM (B).

Na correção das massas dos materiais empregados nas dosagens utilizou-se o ensaio de campo para a determinação da umidade dos agregados miúdos e graúdos.

O volume de concreto dosado foi compatível com a necessidade do preenchimento dos pontos de aplicação dos materiais de reparo e com a moldagem de corpos de prova de dimensão 10 x 20 cm destinados aos ensaios de resistência à compressão axial.

As dosagens executadas em campo atenderam as mesmas condições das elaboradas em laboratório. Manteve-se constante a relação água/cimento em 0,45. O abatimento de cone foi estipulado em 30 ± 10 mm. O teor de aditivo plastificante utilizado foi semelhante ao empregado em laboratório, com os teores variando, em geral, de 0,2 a 0,4 % em relação à massa de cimento.

Depois de cada mistura do concreto foi determinada a consistência do material fresco pelo abatimento do tronco de cone. Geralmente, na primeira mistura não era utilizado aditivo plastificante, somente nas misturas subsequentes eram acrescentados os devidos teores de aditivo até atingir-se o abatimento estipulado.

Como material de reparo foram empregados dez tipos diferentes de concretos com adição de material polimérico reciclado e fibras industrializadas. Nas Tabelas 11 a 20 estão apresentados os dados das dosagens dos concretos aplicados no vertedouro da UHE Mourão.

TABELA 11 – DOSAGEM 1 - PEBD (2,5%) E DOSAGEM 2 - PET (2,5%), VOLUME DE 60 LITROS.

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	71,60	0,76	2,2	-1,03	70,57
Areia natural (kg)	45,00	1,44	0,2	0,56	44,42
Fibra 2,5% (kg)	1,13				1,14
Cimento (kg)	23,32				23,32
Água (kg)	10,48			-0,47	10,01
Aditivo Plastificante 0,2% (g)	46,64				46,64

TABELA 12 – DOSAGEM 3 - FIBRA DE PNEU (2,5%), VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	1,18	2,2	-0,55	53,15
Areia natural (kg)	33,75	1,78	0,2	0,53	33,43
Fibra 2,5% (kg)	0,84				0,86
Cimento (kg)	17,49				17,49
Água (kg)	7,86			-0,01	7,85
Aditivo Plastificante 0,2% (g)	34,98				34,98

TABELA 13 – DOSAGEM 4 - FIBROMAC 12, VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	1,18	2,2	-0,55	53,15
Areia natural (kg)	33,75	1,78	0,2	0,53	33,77
Fibra 1,75% (kg)	0,59				0,60
Cimento (kg)	18,60				18,60
Água (kg)	8,36			-0,01	8,35
Aditivo Plastificante 0,6% (g)	111,60				111,60

Na dosagem de número 4 que utilizou a fibra comercial FibroMac 12 (Tabela 13), o teor utilizado foi de 1,75%, objetivando-se a comparação com o material reciclado aplicados nos teores de 2,5 e 5,0%. Esse teor de fibra comercial foi excessivo e o concreto obtido apresentou abatimento nulo.

Nas misturas subsequentes com esta fibra foram acrescentados variados teores de aditivo plastificante, chegando ao limite verificado em laboratório de 0,6% (acima deste teor limite o concreto resultante tem a cura comprometida). Para que o concreto apresentasse o abatimento desejado acrescentou-se 0,5 kg de água e 1,11 kg de cimento, mantendo-se constante a relação a/c. O concreto resultante foi de difícil aplicação no ponto de reparo apresentando o processo de segregação dos materiais. Motivo pelo qual esse material não foi aplicado como material de reparo.

TABELA 14 – DOSAGEM 5 - FIBRA PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	1,18	2,2	-0,55	53,15
Areia natural (kg)	33,75	1,78	0,2	0,53	32,57
Fibra 5,0% (kg)	1,69				1,71
Cimento (kg)	17,49				17,49
Água (kg)	7,86			-0,01	7,85
Aditivo Plastificante 0,2% (g)	34,98				34,98

TABELA 15 – DOSAGEM 6, CONCRETO DE REFERÊNCIA, VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	2,4	2,2	0,10	53,80
Areia natural (kg)	33,75	3,2	0,2	1,01	34,76
Fibra 0% (kg)					-
Cimento (kg)	17,49				17,49
Água (kg)	7,86			-1,11	6,75
Aditivo Plastificante 0,2% (g)	34,98				34,98

TABELA 16 – DOSAGEM 7 - FIBRA PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	2,4	2,2	0,11	53,81
Areia natural (kg)	33,75	3,2	0,2	1,01	33,03
Fibra 5,0% (kg)	1,69				1,73
Cimento (kg)	17,49				17,49
Água (kg)	7,86			-1,11	6,75
Aditivo Plastificante 0,4% (g)	69,96				69,96

TABELA 17 – DOSAGEM 8 - FIBRA PET (5,0%), DOSAGEM 9 – PNEU (5,0%) E DOSAGEM 11 – PEBD (5,0%), VOLUME DE 45 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	53,70	3,3	2,2	0,59	54,29
Areia natural (kg)	33,75	3,0	0,2	0,95	32,96
Fibra 5,0% (kg)	1,69				1,73
Cimento (kg)	17,49				17,49
Água (kg)	7,86			-1,43	6,32
Aditivo Plastificante 0,4% (g)	69,96				69,96

TABELA 18 – DOSAGEM 10 - FIBRA CORRUGADA PET, VOLUME DE 40 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	47,73	3,3	2,2	0,53	48,26
Areia natural (kg)	30,00	3,0	0,2	0,84	30,84
Fibra 900 g/m ³ (g)*	36,00				36,00
Cimento (kg)	15,55				15,55
Água (kg)	6,99			-1,37	5,62
Aditivo Plastificante 0,0% (g)	-				-

* Conforme instruções do fabricante.

TABELA 19 – DOSAGEM 12 - MULTIFILAMENTO DE POLIPROPILENO, VOLUME DE 40 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	47,73	3,3	2,2	0,53	48,26
Areia natural (kg)	30,00	3,0	0,2	0,84	30,84
Fibra 300 g/m ³ (g)*	12,00				12,00
Cimento (kg)	15,55				15,55
Água (kg)	6,99			-1,37	5,62
Aditivo Plastificante 0,4% (g)	62,20				62,20

* Conforme instruções do fabricante.

TABELA 20 – DOSAGEM 13 - MICROFIBRA DE PET E PE, VOLUME DE 40 LITROS

Material	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a Corrigir	Massa Corrigida
Brita 9,5 mm (kg)	47,73	3,3	2,2	0,53	48,26
Areia natural (kg)	30,00	3,0	0,2	0,84	30,84
Fibra 900 g/m ³ (g)*	36,00				36,00
Cimento (kg)	15,55				15,55
Água (kg)	6,99			-1,37	5,62
Aditivo Plastificante 0,4% (g)	62,20				62,20

* Conforme instruções do fabricante.

Na Tabela 21 estão apresentados os dados complementares das dosagens.

TABELA 21 – DADOS COMPLEMENTARES DAS DOSAGENS

	DOSAGEM												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Data (dd/mm)	27/02	27/02	28/02	28/02	28/02	11/03	11/03	13/03	13/03	13/03	13/03	13/03	13/03
Hora (hh:min)	15:30	17:30	13:30	14:15	15:00	13:15	14:00	9:00	10:00	10:45	12:30	13:20	14:40
Aplicação nº	7	8	9	*	*	1	*	5	6	4	3	2	10
Cimento (° C)	33,3	33,5	26,3	25,1	25,0	31,5	31,6	27,8	27,0	25,6	32,0	32,0	31,0
Água (° C)	34,3	34,5	26,6	24,4	23,6	26,4	28,0	25,8	26,3	26,0	27,2	26,8	29,0
Ambiente (° C)	39,9	42,7	24,5	23,7	22,4	32,4	32,7	25,1	25,2	27,5	28,7	28,5	34,4
Concreto (° C)	30,6	33,2	25,5	24,6	24,4	31,0	28,5	26,0	26,8	26,4	28,6	30,2	31,8
U. R. (%)	**	**	52	67	76	29	28	60	70	56	40	42	39
Slump (cm)	3,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,0

* Aplicação do MR não pode ser executada devido à chuva e/ou excesso de umidade no ponto.

** Valor de umidade relativa superior ao limite máximo de leitura do equipamento.

3.7.4. Aplicações dos Materiais de Reparo

Executou-se a limpeza dos pontos de aplicação dos materiais de reparos com jatos de água removendo-se toda a poeira e pequenos fragmentos do material retirado do local.

Como ponte de aderência aplicou-se, sobre a superfície seca substrato,

adesivo estrutural à base de resina epóxi de alta viscosidade (Figura 24a). Esse cuidado foi tomado para garantir boa resistência de aderência entre o substrato e o material de reparo.

O concreto do material de reparo foi lançado no ponto de aplicação do substrato com colher de pedreiro e adensado com pilão, removendo-se as bolhas de ar do material.

O acabamento superficial final foi obtido com desempenadeira metálica. Ficando a superfície acabada com aspecto alisado (Figura 24).



(a)



(b)

FIGURA 24 - APLICAÇÃO DA PONTE DE ADERÊNCIA (A). LANÇAMENTO DO MR (B).

A Figura 25 exibe o aspecto da superfície acabada e a vista geral das áreas do vertedouro da barragem da Usina Hidroelétrica Mourão, onde foram aplicados como materiais de reparo o concreto de referencia sem adições, os concretos com adição de materiais poliméricos reciclados, PET, PEBD e pneu nos teores de 2,5 e 5,0%, e os concretos reforçados com fibras industrializadas multifilamento de PP, fibras corrugadas de PET e microfibras de PET e PE.



FIGURA 25 - VERTEDOIRO DA BARRAGEM DA UHE MOURÃO COM DESTAQUE NOS PONTOS DE APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO ESTUDADOS.

3.8. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Buscando-se verificar a durabilidade dos materiais de reparo aplicados em campo foram preparados corpos de prova prismáticos dotados de vergalhões de aço, neste caso foi empregada a técnica de potencial de corrosão.

A técnica de potencial de corrosão da armadura metálica foi aplicada com o objetivo de analisar o desempenho dos MRs, neste caso armado, ao longo do envelhecimento acelerado. Para tanto, o potencial de corrosão considerado em cada medida foi o potencial de repouso obtido no início do teste, e após um período de envelhecimento superior a 120 dias em banhos aquosos e independentes contendo sulfato de sódio a 2,1%, em peso, cloreto de sódio a 3,4%, em peso, ambos na temperatura ambiente.

Também, foi implantado um sistema de envelhecimento acelerado dos CPs em câmara de dióxido de enxofre a 0,07% em volume, conforme métodos ASTM G 87 e NBR 8096/83, em ciclos intermitentes de injeção de gás a cada 24 h.

Ainda, foram destinados CPs para cura em água destilada com o objetivo de ser acompanhado um processo considerado padrão de referência e comparação aos demais processos de cura e envelhecimento acelerado.

A principal função prevista para estes CPs foi a avaliação do desempenho do MR quanto à migração de íons sulfato até atingir a armadura metálica, disposta em barras paralelas. Tais barras funcionaram como eletrodos metálicos para promover as medidas citadas.

O eletrodo de referência utilizado foi o eletrodo de cobre/sulfato de cobre. O contato do eletrodo com as superfícies superiores dos CPs foi feito com almofadas de feltro, embebidas em água destilada. Todos os potenciais de eletrodo foram referidos ao eletrodo de ESC.

Um desenho esquemático (unidades em mm), indicando a geometria e dimensões dos corpos de prova de concreto conformados, bem como a disposição das armaduras, está apresentado na Figura 26.

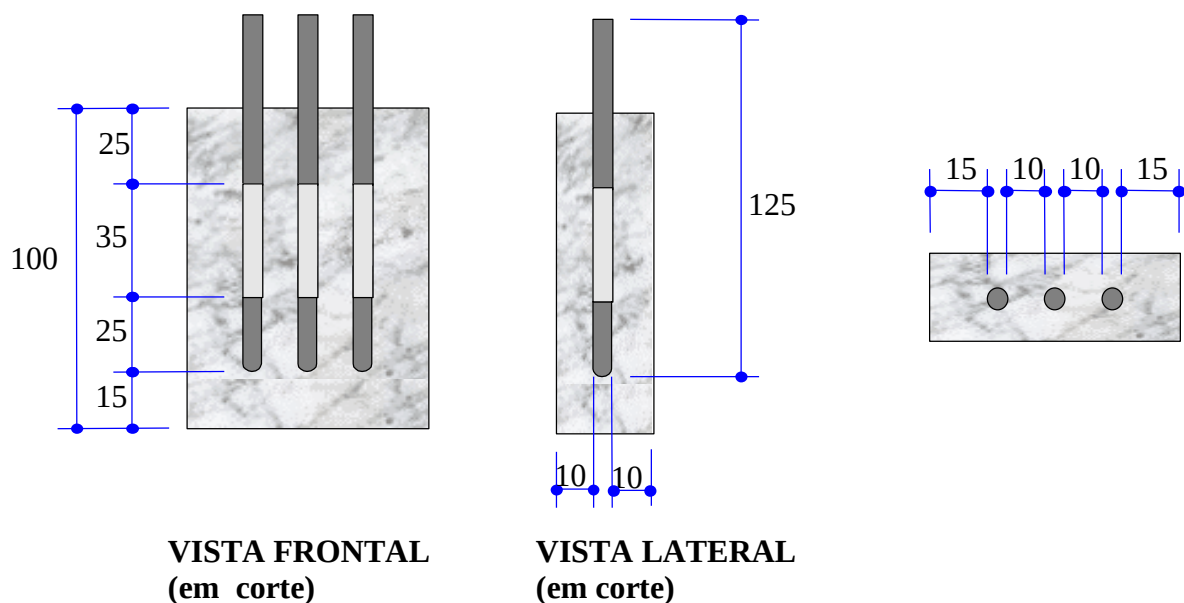


FIGURA 26 - CPS COM MR E BARRAS METÁLICAS SIMULANDO A ARMADURA EM CONCRETOS ARMADOS PARA OS TESTES DE POTENCIAL DE CORROSÃO.

3.8.1. Preparo das Barras Metálicas

O preparo das barras metálicas (diâmetro nominal 6,3 mm) para os corpos de prova destinados às análises elétricas iniciou-se com corte o das mesmas em pedaços

com 12,5 cm de comprimento. Ambas as extremidades de cada barra foram chanfradas por meio de um esmeril. Isto foi realizado de forma a evitar-se o surgimento de efeitos de borda, pela existência de cantos vivos, quando as barras estivessem no interior do concreto.

Em virtude da exposição ao ar atmosférico, as barras de aço para o concreto armado adquirem uma camada de óxido passivante (não ativa), apresentando uma cor laranja característica de ferrugem. Esta camada, apesar de proteger o metal contra a corrosão, foi totalmente eliminada das barras, para evitar-se a inclusão de mais uma variável no sistema eletroquímico. Desta forma, para extrair toda a camada de óxido, utilizou-se uma escova de aço acoplada a um motor de esmeril, a barra então foi toda polida até obter um aspecto metálico brilhante, isentando-se de qualquer zona oxidada. Para evitar o contato de substâncias que pudessem promover a oxidação em curto prazo (como o cloreto presente no suor, por exemplo), utilizou-se constantemente luvas de raspa de couro no manuseio das barras, as quais foram acondicionadas em dessecadores.

Após o polimento, procedeu-se à pintura das extremidades das barras, a fim de se obter apenas um trecho exposto das mesmas, na sua parte central. A tinta utilizada para a pintura consistiu de uma tinta de fundo ou acabamento, anticorrosiva, bicomponente, à base de epóxi, curada com poliamida; apresentando textura semibrilhante, alta espessura, alto teor de sólidos e, portanto, elevada viscosidade. O seu preparo seguiu as instruções do fabricante.

Primeiramente, foi pintada uma das barras, pela imersão de 65 mm da sua extensão. As barras foram então colocadas para cura inicial e secagem ao ar ambiente (capela) por 24 h. Com a tinta já seca ao toque, procedeu-se à pintura da outra extremidade, da mesma maneira que a anterior, sendo a extensão pintada de 25 mm, de forma que cada barra resultou com um comprimento exposto de 35 mm.

Na Figura 27, encontram-se ilustradas as barras de aço preparadas para serem incluídas nos corpos de prova prismáticos.

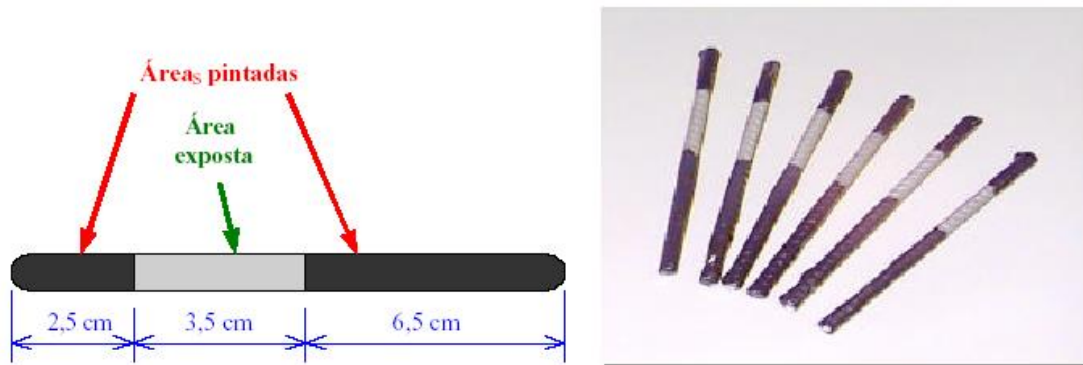


FIGURA 27 - CPS COM MR E BARRAS METÁLICAS SIMULANDO A ARMADURA EM CONCRETOS ARMADOS PARA OS TESTES DO POTENCIAL DE CORROSÃO.

3.8.2. Preparo dos Corpos de Prova Prismáticos

Como não existe normalização técnica que indique a forma ou dimensões de corpos de prova de concreto armado para a execução de ensaios elétricos, foram idealizados corpos de prova prismáticos de pequenas dimensões, com base nos experimentos de diversos pesquisadores.

Após o lançamento do concreto nos moldes o conjunto foi adensado em mesa vibratória. O concreto foi protegido com filme de PVC para ser mantida a umidade nos CP durante um período de 24 horas, quando aconteceu a desmoldagem e os CP foram levados à cura durante um período de 28 dias em câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura controlada em $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

3.8.3. Ensaios de Envelhecimento Acelerado em Câmara Úmida

O método seguido foi o especificado na NBR 8096/83 e o ciclo utilizado seguiu o método A (exposição contínua) da ASTM G87.

A norma NBR 8096 prescreve o método de Kesternich para a execução de ensaios de exposição ao dióxido de enxofre, em materiais metálicos revestidos e não revestidos.

Para a execução deste ensaio os corpos de prova de concreto com as diferentes adições de fibras foram depositados dentro da câmara de envelhecimento artificial (câmara de umidade saturada de SO_2 - marca Equilam).

A geração do gás SO_2 procedeu-se com a reação de ácido sulfúrico 1:1 em solução de bissulfito de sódio. Por intermédio de cálculos estequiométricos, verificou-se que, aproximadamente, 0,70 g de NaHSO_3 era quantidade necessária para a formação de 0,2 l de gás SO_2 em um ambiente de 300 l (0,07%, em volume), satisfazendo o método foi, e a quantidade de ácido necessária para reagir com o bissulfito em meio aquoso foi de 3 ml.

A câmara permaneceu na temperatura de $40 \pm 2^\circ \text{C}$. A reação entre o bissulfito e o ácido foi realizada em ciclos de duração de 24 h. A leitura dos potenciais de corrosão foi feita mensalmente com a retirada dos corpos de prova, os quais eram colocados novamente na câmara após essa leitura.

3.8.4. Ensaio de Envelhecimento por Imersão em Solução de Na_2SO_4 e NaCl

Em recipientes de plásticos transparentes os CPs ficaram parcialmente imersos em solução contendo sulfato de sódio 2,1% e cloreto de sódio 3,4%. A cada 30 dias os CP foram levados aos ensaios de potencial de corrosão e após a leitura retornaram ao banho. Os testes foram realizados mensalmente acompanhando os dias em que foram realizados os testes de corrosão nos corpos de prova que estavam na câmara.

Visando confrontar os resultados dos ambientes de envelhecimento acelerado (câmara e banhos) foram colocados CPs em recipientes de plásticos transparentes, onde estes ficaram parcialmente imersos em água destilada proporcionando uma cura úmida de referência, chamando-se o processo de banho de referência.

3.9. POTENCIAL DE CORROSÃO

Para o emprego da técnica de potenciais de corrosão foram utilizados os corpos de prova prismáticos dotados de barras de aço preparados para os ensaios eletroquímicos.

Equipamento utilizado para o ensaio de potencial de corrosão:

- Voltímetro de alta impedância de entrada, com resolução de milivolts;

- Eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre - Cu/CuSO_4 ;
- Esponja de alta condutividade (esponja umedecida destinada a melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto); e
- Conexões elétricas.

Na Figura 28 está apresentado o esquema de conexão elétrica dos eletrodos utilizados nos ensaios eletroquímicos.

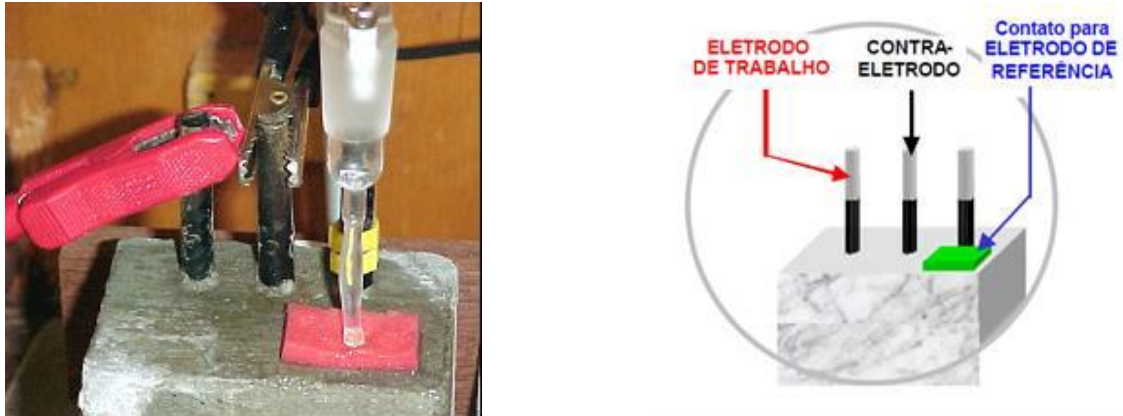


FIGURA 28 – ESQUEMA DE CONEXÃO ELÉTRICA DOS ELETRODOS (FONTE: JOUKOSKI, 2003).

O potencial de corrosão (E_{corr}) foi medido no eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo ESC. As medidas foram tomadas, aproximadamente, a cada 30 dias até 660 dias formando um gráfico de potencial de corrosão em função do tempo de envelhecimento. Os métodos de envelhecimento analisados pela técnica de potencial de corrosão foram os banhos de imersão em cloreto de sódio, sulfato de sódio, comparados com o banho de referência em água destilada.

3.10. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As amostras destinadas à microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram preparadas a partir dos testemunhos de concreto retirados da UHE Mourão. Os pontos de extração dos blocos foram denominados, com a finalidade de identificação, como pontos A, B e C. Utilizou-se esse tipo de amostra com o intuito de analisar microscopicamente ações deletérias que causam manifestações patológicas na barragem UHE Mourão.

Também, foram analisadas amostras de concretos confeccionados com

adição de resíduos poliméricos, fibras de pneu, PET e PEBD, envelhecidos em câmara úmida com SO_2 na temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Após um período de, aproximadamente, 180 dias de envelhecimento em câmara úmida.

Ambos os tipos de amostras foram analisadas por MEV, em equipamento Philips, modelo XL30, equipado com microsonda analítica de raios X (EDS).

3.11. ENSAIOS DE ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO

Para a análise de resistência à abrasão pelo método submerso seguiu-se a norma ASTM C 1138/97. Foram confeccionados CPs de concreto com diâmetros de 300 mm e altura de 100 mm. Em parte dos CPs elaborados foi deixado um vazio superior central de diâmetro aproximado de 200 mm e altura de 50 mm. O CP resultante desse processo foi considerado o substrato da estrutura. Após a sua cura aos 28 dias, os vazios resultantes dos diversos CPs foram preenchidos com os MR estudados. O procedimento de preparo destes CPs encontra-se ilustrado na Figura 29. Após 28 dias de cura do CP substrato + MR, em câmara úmida com umidade relativa maior que 95% e temperatura controlada em $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, avaliou-se a resistência à abrasão dos concretos confeccionados com as fibras comerciais e com os resíduos poliméricos nos teores de 2,5 e 5%.

Uma das dificuldades encontradas no preparo desse tipo de CP foi a retirada do anel metálico localizado no centro deste. O qual formou o vazio no CP na desmoldagem. A solução encontrada foi o corte do concreto com serra tipo copo e posterior retirada deste anel de metal.

Depois de 28 dias de cura em câmara úmida, com umidade relativa maior que 95% e temperatura controlada em $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Foi avaliada a resistência à abrasão pelo método submerso dos MR nos teores de 2,5 e 5,0%, para os três materiais estudados provenientes da indústria de reciclagem e, também, para os materiais industrializados, além do CR.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 29 - PREPARAÇÃO DOS CPS PARA O TESTE DE ABRASÃO (A). LANÇAMENTO E ADENSAMENTO DO CONCRETO (B). ALISAMENTO DA SUPERFÍCIE (C). SUBSTRATO PREPARADO PARA RECEBER O MR (D).

3.11.1. Avaliação do Desgaste de Superfície nos Ensaios de Resistência à Abrasão pelo Método Submerso

Nos testes de resistência à abrasão pelo método submerso pode-se verificar a forma de desgaste das superfícies, principalmente, na interface entre o substrato e o MR e o respectivo “efeito de borda”. Esse efeito acontece quando as condições de resistência mecânica são diferentes entre o MR e o material da base (substrato). Esta metodologia aborda uma condição similar à que acontece nas superfícies hidráulicas, porém, tem-se que considerar que no laboratório o equipamento pode vir a acelerar o efeito de borda na junção das superfícies de ambos os materiais, devido sua

geometria. Assim, após iniciado o desgaste, o meio de abrasão tende a permanecer na região da amostra afetada ampliando este resultado (GALVÃO *et al.*, 2009).

Para melhor caracterizar o desgaste superficial a profundidade das erosões causadas foram medidas após o ensaio de abrasão, com um paquímetro de precisão e uma placa de acrílico com dimensão de (300 x 300 x 2) mm, perfurada a cada centímetro, formando uma malha de 1 x 1 cm de espaçamento. Com esse aparato, foram medidas as profundidades de desgaste da superfície dos CPs e, posteriormente, montados gráficos esquemáticos 3D.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados e as discussões dos mesmos conforme os procedimentos experimentais aplicados no trabalho.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Cimento

O cimento caracterizado foi o Cimento Portland tipo CP II – Z 32, apresentando as seguintes características físicas e químicas (Tabelas 22 e 23).

TABELA 22 – ENSAIOS FÍSICOS DO CIMENTO CP II – Z 32.

Ensaio Físico	
Resíduo peneira # 200	1,5%
Resíduo peneira # 325	11,2%
Finura Blaine	3440 cm ² /g
Expansão à quente	0
Início de pega	5 h 10 min
Fim de pega	6 h 10 min
Massa específica	2,97 g/cm ³

TABELA 23 – ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO CP II – Z 32.

Amostra	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	P.F.	Soma
(%)	52,68	22,54	6,80	3,22	6,13	2,77	1,07	0,29	0,06	0,35	0,03	3,25	99,20

4.1.2. Agregados

4.1.2.1 Agregado graúdo

Na Tabela 24 está apresentada a distribuição granulométrica do agregado graúdo.

A dimensão máxima característica do agregado graúdo foi de 9,5 mm e o módulo de finura de 5,64. Conforme a NBR 7211/05 a distribuição granulométrica do agregado graúdo ficou na faixa entre 4,75/12,5. Comercialmente este agregado

considera-se como brita zero ou pedrisco.

TABELA 24 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO.

Peneiras		Material Retido		Porcentagem Retida			
Número	mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulada
3"	76						
2 ½"	64						
2"	50						
1 ½"	38						
1 ¼"	32						
1"	25						
¾"	19						
½"	12,5						
3/8"	9,5	6,5	0,0	0,3	0	0	0
¼"	6,3	556,7	557,3	25,3	25,9	26	26
4	4,8	1017,9	1015,6	46,3	47,1	47	72
8	2,4	562,7	514,8	25,6	23,9	25	97
16	1,2	19,9	27,5	0,9	1,3	1	98
30	0,6	3,2	4,8	0,1	0,2	0	99
50	0,3	1,7	2,0	0,1	0,1	0	99
100	0,15	1,4	1,7	0,1	0,1	0	99
Fundo		28,5	31,1	1,3	1,4	1	100
Massa Final		2198,5	2154,8	100	100	100	-
Massa Inicial		2200,2	2156,7				

A análise petrográfica indicou as seguintes características: rocha de cor cinza amarronzada com matriz de granulação fina (< 0,2 mm) constituída por plagioclásio (labradorita 45%), clinopiroxênio (augita 40%) e minerais opacos (magnetita / hematita 15%).

O agregado graúdo empregado na confecção dos concretos estudados apresentou a seguinte classificação: agregado formado por fragmentos rochosos de composição basáltica.

Portanto, a análise petrográfica e a análise de difração de raios-x (DRX) indicaram que o material utilizado como agregado graúdo tem a seguinte nomenclatura da rocha: Basalto.

Na Figura 30 está apresentado o resultado da difração de raios-x para o agregado graúdo e na Tabela 25 estão indicados os minerais constituintes da rocha conforme a DRX.

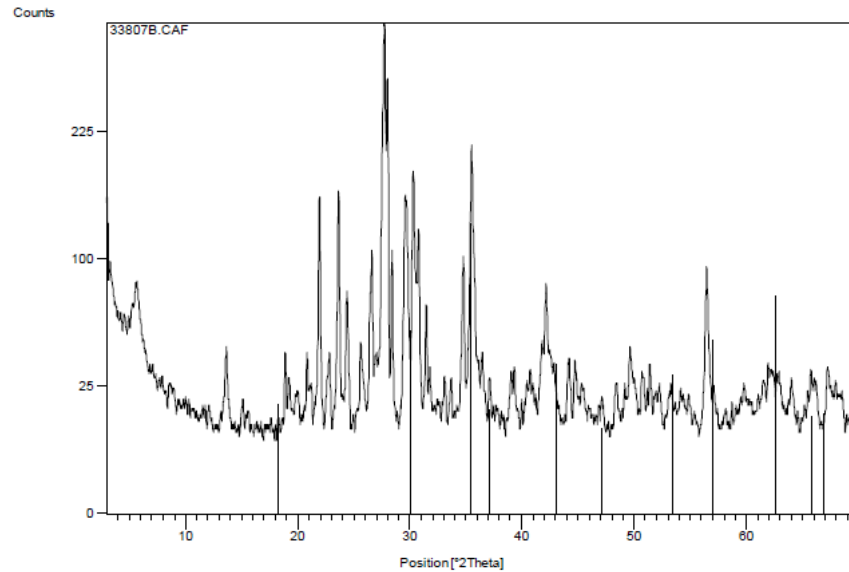


FIGURA 30 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DO AGREGADO GRAÚDO.

TABELA 25 – MINERAIS CONSTITUINTES DO AGREGADO GRAÚDO.

Referência	Mineral	Fórmula
78-0434	Labradorita	Na _{0.45} Ca _{0.55} Al _{1.55} Si _{2.45} O ₈
76-0544	Augita	Ca _{0.61} Mg _{0.76} Fe _{0.49} (Si O ₃) ₂
80-0390	Magnetita	Fe _{0.65} Fe _{1.81} Mg _{0.42} Al ₁ Ti _{0.03} O ₄
85-0987	Hematita	Fe ₂ O ₃

Na Tabela 26 estão apresentadas as propriedades do agregado graúdo.

TABELA 26 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO GRAÚDO.

Propriedade	Valores
Massa específica seca	2,88 g/cm ³
Massa específica SSS	2,93 g/cm ³
Distribuição granulométrica	4,75 – 12,5 mm
Dimensão máxima característica	9,5 mm
Módulo de finura	5,64
Teor de material pulverulento	1,3%
Teor de torrões de argila	0,1%
Absorção	2,0%

Na Figura 31 está apresentada a expansibilidade em função do tempo para o ensaio de reatividade, segundo a ASTM C 1260/94, entre o agregado graúdo e o cimento CP II – Z 32, utilizados nos trabalhos.

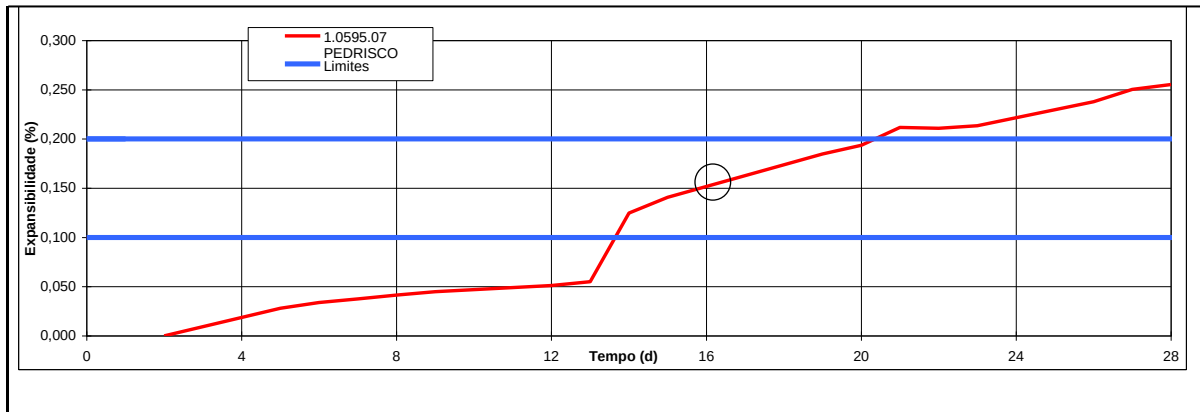


FIGURA 31 - EXPANSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O ENSAIO DE REATIVIDADE ENTRE O AGREGADO GRAÚDO E O CIMENTO CP II – Z 32.

No ensaio de reatividade potencial de álcalis em combinações cimento - agregado (Método Acelerado) o agregado apresentou expansibilidade de 0,15% aos 16 (dezesesseis) dias. Conforme a ASTM C 1260/94, expansões situadas entre 0,1 e 0,2 % aos 16 dias de idade sugerem a realização de mais ensaios para a análise de comportamento do material.

4.1.2.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado areia natural lavada. A distribuição granulométrica do agregado miúdo ficou próxima do recomendável em norma, conforme demonstrado na Figura 32.

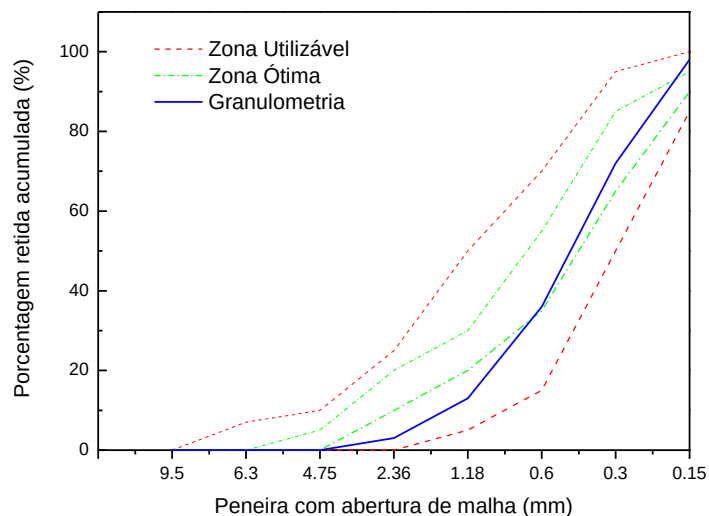


FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.

As propriedades do agregado miúdo estão listadas na Tabela 27.

TABELA 27 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO MIÚDO.

Propriedade	Valores
Massa específica	2,61 g/cm ³
Módulo de finura	2,22
Teor de material pulverulento	0,3%
Teor de torrões de argila	0,2%
Absorção	0,2%

Na Figura 33 está apresentada a expansibilidade em função do tempo para o ensaio de reatividade, segundo a ASTM C 1260/94, entre o agregado miúdo e o cimento CP II – Z 32, utilizados nos trabalhos.

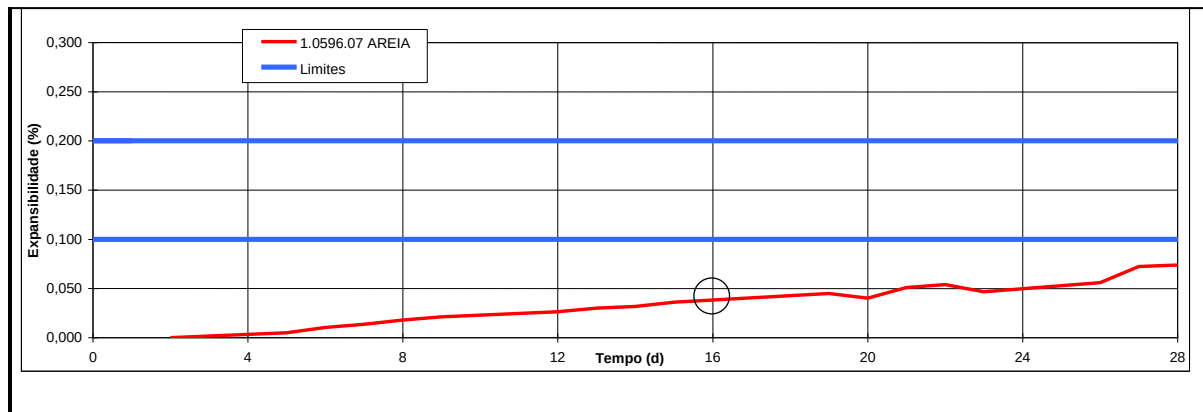


FIGURA 33 - EXPANSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O ENSAIO DE REATIVIDADE ENTRE O AGREGADO MIÚDO E O CIMENTO CP II – Z 32.

O agregado miúdo não apresentou reatividade potencial com o cimento CP II – Z 32, pois segundo a ASTM C 1260 expansões menores que 0,1 % aos 16 dias de idade indicam um comportamento inócuo na maioria dos casos.

4.1.3. Materiais Poliméricos Reciclados

Foram empregados dois polímeros provenientes das indústrias de reciclagem de plástico: o PEBD e o PET. O PEBD aglutinado foi resultante do processamento de embalagens plásticas (sacos de lixo e sacolas). Na indústria de reciclagem esse material foi selecionado, separado, lavado, moído e aglutinado em processo mecânico à temperatura de, aproximadamente, 60 °C. O PET foi proveniente de embalagens de desodorante líquido. Após a coleta seletiva, o material passou pelo processo de separação, tendo sido previamente lavado e moído.

Na complementação do trabalho, foram, também, utilizadas fibras de

borracha natural vulcanizada (elastômeros), retiradas das regiões da banda de rolagem e dos flancos de pneus inservíveis, oriundos da indústria de sua remoldagem.

As propriedades dos materiais poliméricos reciclados estão apresentadas na Tabela 28.

TABELA 28 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS RECICLADOS.

Propriedade	PEBD	Material PET	PNEU
Massa específica SSS (g/cm ³)	0,90	1,31	0,73
Absorção (%)	4,4	3,9	2,12

Os materiais poliméricos reciclados foram caracterizados conforme as normas do Mercosul, NBR NM 248/03, 52/03, 53/03 e 30/01. Essas normas são referentes aos materiais empregados como agregados do concreto. Considerando que os materiais poliméricos reciclados foram empregados em substituição parcial da areia, então a sua forma, textura, dimensão e distribuição granulométrica podem influenciar, significativamente, as propriedades do concreto.

Na Tabela 29 são apresentadas as distribuições granulométricas dos materiais poliméricos reciclados, comparativamente, com a granulometria do agregado miúdo.

TABELA 29 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS E DA AREIA.

Peneira		Porcentagem Retida (%)			
Número	mm	PET	PEBD	Pneu	Areia
1/2"	12,5	4	0	0	0
3/8"	9,5	19	0	0	0
1/4"	6,3	46	0	0	0
4	4,8	62	2	0	0
8	2,4	92	24	1	3
16	1,2	96	73	14	13
30	0,6	100	93	41	36
50	0,3	100	99	84	72
100	0,15	100	100	98	98

Observa-se na Tabela 29 que dentre os materiais poliméricos reciclados o pneu é o material que tem a distribuição granulométrica mais próxima da areia. O PET moído tem uma dimensão característica considerada como agregado graúdo. O PEBD aglutinado tem granulometria intermediária entre os outros dois materiais poliméricos. Para efeitos de comparação todos os materiais poliméricos reciclados foram aplicados na confecção do concreto com adição de fibras em substituição parcial da areia.

4.1.4. Fibras Poliméricas Industrializadas

Na Tabela 30 estão apresentadas as principais propriedades das fibras comerciais utilizadas na pesquisa.

TABELA 30 – PROPRIEDADES DAS FIBRAS COMERCIAIS.

Propriedade	Material		
	Fibra corrugada PET	Microfibra PE e PET	Fibra multifilamento PP
Comprimento (mm)	35	3	30
Diâmetro (mm)	0,75	0,018	1,0 (filamentos de 5 μm)
Densidade (g/cm ³)	0,90	0,85	0,70
Absorção (%)	3,7	4,1	2,5

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS TESTEMUNHOS DA UHE MOURÃO

Foram selecionados corpos-de-prova a partir dos testemunhos de concreto extraídos da calha do vertedouro da UHE Mourão com diâmetro de, aproximadamente, 105 mm. Os testemunhos foram cortados em seu comprimento. Primeiro retirando-se a face superior (face exposta do CP) com altura de 5 cm e um segundo corte proporcionado à altura do corpo de prova igual a duas vezes seu diâmetro. Cada ponto de retirada dos testemunhos teve um corpo de prova ensaiado (CP de nº 3 de cada ponto), verificando-se, assim, a resistência à compressão de cada bloco estudado. Os corpos de prova extraídos da barragem da UHE Mourão estão ilustrados na Figura 34.



FIGURA 34 - TESTEMUNHOS DE CONCRETO DA UHE MOURÃO.

Na Tabela 31 estão listados os parâmetros e resultados dos ensaios de resistência à compressão dos testemunhos de concreto extraídos da calha do vertedouro UHE Mourão.

TABELA 31 – RESULTADOS DOS TESTES DO AGREGADO GRAÚDO.

Identificação	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura
A 3	103,9	217,2	227,755	26,9	E
B 3	104,6	219,4	267,038	31,1	G
C 3	103,8	213,5	215,636	25,5	E

Verifica-se a partir dos resultados apresentados na Tabela 31 que a resistência média dos blocos de concretagem foi de 27,8 MPa. Como resistência do substrato foi considerado o valor de 25,5 MPa, menor valor dentre os testemunhos medido no bloco C.

4.3. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

Como comentado, anteriormente, não existem normas para ensaios de resistência de aderência, desta forma utilizou os procedimentos de tração direta utilizados no Laboratório de Materiais Estruturas (LAME) do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Verificou-se que os ensaios de resistência de aderência realizados na superfície de corte não são representativos. Os valores de resistência de aderência foram muito baixos. Conclui-se que a superfície lisa de corte não proporcionou uma interface adequada entre o substrato e o material de reparo.

Na aplicação em campo, a superfície do substrato apresenta-se, invariavelmente, como rugosa devido ao processo de retirada do material por cortes e por apicoamento manual ou mecânico.

Nos ensaios de resistência de aderência as rupturas dos corpos de prova aconteceram de formas distintas: ruptura na interface, ruptura no substrato (concreto velho) e ruptura ligação entre o corpo de prova e a placa metálica de fixação no equipamento de tração. Não foram verificadas rupturas no material de reparo (concreto novo).

A Figura 35 ilustra duas formas diferentes de ruptura do corpo de prova confeccionado com o substrato e MR. Nestes casos a resistência de aderência (substrato/MR) é maior do que a resistência à tração do substrato e maior que a resistência da ligação entre o CP e a placa de fixação.



FIGURA 35 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA. RUPTURA NO SUBSTRATO (A). RUPTURA LIGAÇÃO ENTRE O CORPO DE PROVA E A PLACA METÁLICA (B)

Com a finalidade de determinar o melhor material e método foram analisadas variadas aplicações de ponte de aderência. Concretos com teores de adição de 2,5 e 5,0% de PEBD, PET e pneu, além do concreto de referência, foram analisados sem ponte de aderência verificando-se a influência do tipo de material na ligação entre o substrato e o material de reparo. Diferentes tipos de aderência foram analisadas com o emprego do concreto de referência (Tabela 32).

TABELA 32 – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA ENTRE SUBSTRATO E MR.

Material	Tipo de interface	Idade (dias)	Resistência de aderência (MPa)
PEBD 2,5	Sem ponte de aderência	28	0,11
PEBD 5	Sem ponte de aderência	28	0,04
PET 2,5	Sem ponte de aderência	28	0,06
PET 5	Sem ponte de aderência	28	0,08
PNEU 2,5	Sem ponte de aderência	28	0,01
PNEU 5	Sem ponte de aderência	28	0,08
CR	Sem ponte de aderência	28	0,09
CR	Nata de cimento	28	1,45
CR	Pintura com adesivo acrílico com nata de cimento	28	1,37
CR	Pintura com adesivo acrílico com nata de cimento	7	0,65
CR	Adesivo estrutural à base de resina epóxi	7	1,50

Verifica-se na Tabela 32 que, quando não foi empregada ponte de aderência entre o substrato (concreto velho) e o material de reparo (concreto novo), os valores de resistência de aderência foram muito baixos, independentemente do tipo de material que foi empregado como material de reparo. Nestes casos, a aderência aos 28 dias de idade não foi suficientemente forte para promover uma ligação adequada entre o substrato e o material de reparo. Assim, não foi possível estabelecer uma relação entre

o tipo de material reciclado adicionado ao concreto e a sua resistência de aderência.

Quanto ao tipo de ponte de aderência (Tabela 32), observa-se que as aplicações de nata de cimento e de pintura com adesivo acrílico com nata de cimento apresentaram, aos 28 dias, resistências de aderência de 1,45 MPa e 1,37 MPa, respectivamente. Entretanto, quando analisada aos 7 dias a pintura com adesivo acrílico com nata de cimento apresentou a resistência de aderência de 0,65 MPa, este valor não foi suficiente para garantir uma boa ligação entre o substrato e MR na idade considerada. O adesivo estrutural à base de resina epóxi, quando aplicado como ponte de ligação entre o substrato e o MR, apresentou a resistência de aderência de 1,50 MPa aos 7 dias. Esse valor de resistência de aderência pode promover boa ligação entre o concreto velho e o concreto novo, com tendência de aumentar essa resistência para maiores idades. Segundo o Manual de Reparo do *American Concrete Institute* (ACI, 1999) os valores de resistência de aderência superiores a 0,9 MPa são recomendados, sendo o mínimo requerido de 0,7 MPa.

Considerando que, em questões de ordem prática, a solicitação do material de reparo de superfície pode ocorrer em pouco tempo após sua aplicação, além da necessidade de uma resistência de aderência mínima que garanta a boa ligação entre o concreto novo e o velho, indica-se a aplicação da ponte de aderência de adesivo estrutural à base de resina epóxi.

4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO

Nos gráficos das Figuras 36, 37 e 38 são apresentadas as curvas das resistências à compressão axial dos concretos confeccionados com adição de material polimérico reciclado, em função do tempo de cura.

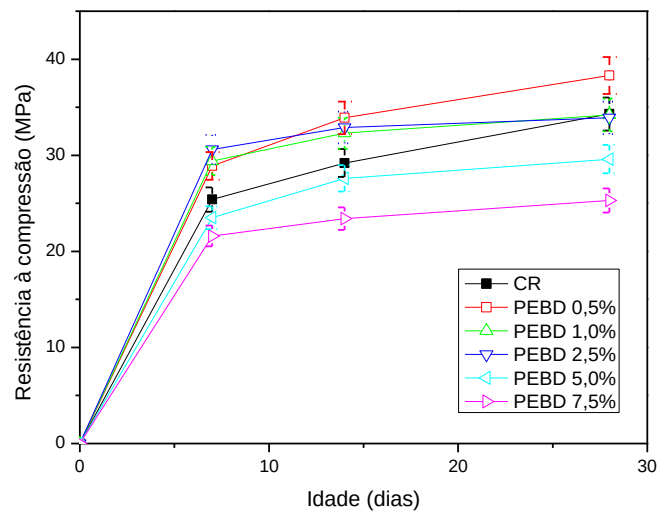


FIGURA 36 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PEBD RECICLADO

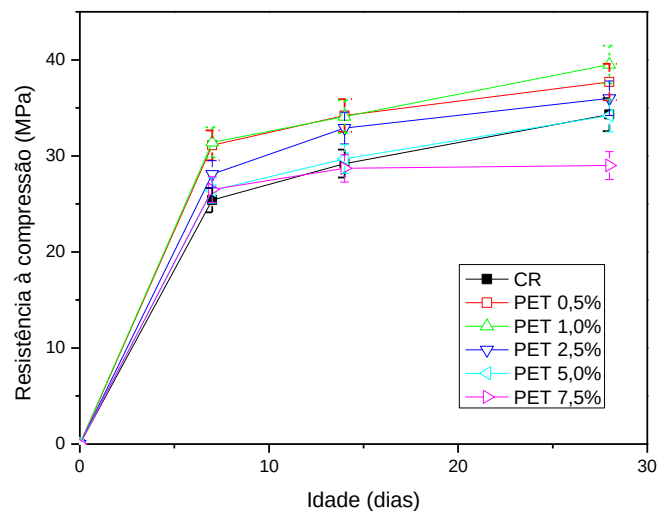


FIGURA 37 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PET RECICLADO

Para os três diferentes materiais estudados e em seus respectivos teores constatou-se que os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão em função do tempo de cura foram inversamente proporcionais ao teor de adição de fibras recicladas. Essa tendência também foi constatada por CHOI *et al.*(2005) quando estudaram os efeitos da adição de resíduos de garrafas PET nas propriedades do concreto e, por ISMAIL e AL-HASHMI (2008), na resistência de aderência entre a superfície dos resíduos poliméricos e a pasta de cimento.

A redução na resistência das misturas de concreto com adição de agregados plásticos foi devido à menor resistência dessas partículas, se comparadas ao agregado natural (BATAYNEH *et al.*, 2007).

AL-MANASEER e DALAL (1997) e SOROUSHIAN *et al.* (2003) também verificaram que a resistência à compressão diminuiu com o aumento no teor de agregados de plásticos.

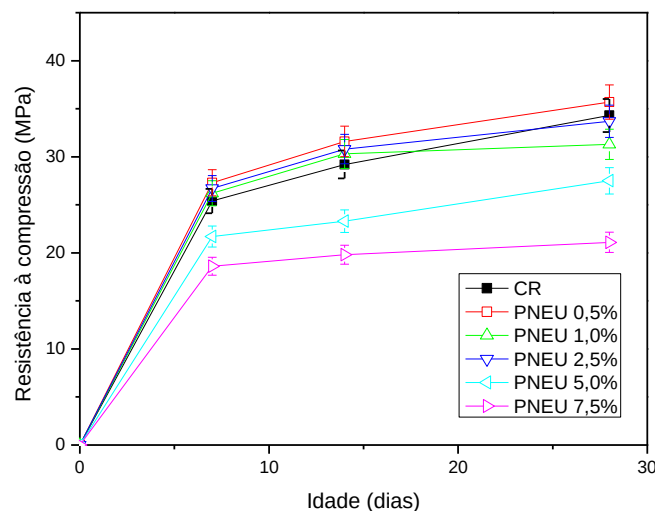


FIGURA 38 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO DE PNEU RECICLADO

LI *et al.* (2005) verificaram uma redução na resistência à compressão axial do concreto com fibras de pneu, não sendo relacionada tal perda a alguma característica do material.

Nos estudos de FREITAS *et al.* (2009) foi verificada uma redução da resistência à compressão com o aumento do teor de adição de borracha.

Complementarmente, os testes indicaram resistências à compressão axial aproximadamente iguais e superiores à apresentada pelo CR, nas composições PEBD 0,5, PEBD 1 e PEBD 2.5; PET 0.5, PET 1, PET2.5 e PET5; e, PNEU0.5 e PNEU2.5, aos 7, 14 e 28 dias. Avaliando-se os traços com pneu, atribuiu-se a estes a necessidade de melhorar o processo de dosagem e conformação, uma vez que a composição intermediária PNEU 1, teve, aos 28 dias, resistência à compressão axial comparativamente menor, ficando, inclusive, abaixo do valor correspondente ao do concreto de referência.

Para os três materiais, o teor limite ideal na mistura, ficou estabelecido em 2,5%, em peso, tendo o PET2.5 o melhor desempenho, com $(36,0 \pm 0,5)$ MPa, seguido pelos outros dois materiais PEBD2.5 e PNEU2.5, com valores muito próximos entre si, de $(33,9 \pm 0,5)$ MPa e $(33,7 \pm 0,5)$ MPa, respectivamente, aos 28 dias, conforme ilustrado na Figura 39.

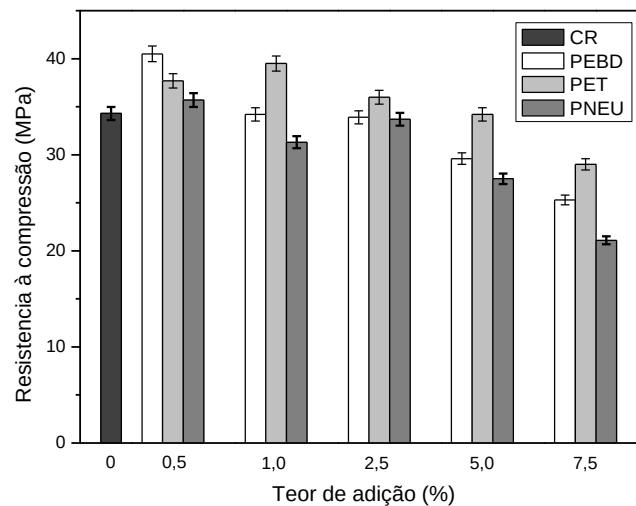


FIGURA 39 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS E SEUS RESPECTIVOS TEORES, AOS 28 DIAS.

Apesar da diminuição verificada na resistência à compressão axial destes traços de concreto, os valores ainda se encontram na faixa de resistência de moderada a alta (NEVILLE, 1997). Tais traços podem ser empregados em postes e cruzetas de concreto armado para as linhas de distribuição de energia elétrica, podendo, portanto, serem também utilizadas na própria área de energia. Como o valor limite inferior desta propriedade, recomendado para tais estruturas é de 25 MPa (NBR 8451), somente o traço PNEU7.5 foi ser excluído.

A vantagem ambiental pelo uso da borracha em traços de concreto, pode ser evidenciada no experimento realizado com o traço PNEU2.5 em postes-teste, direcionados à rede de distribuição de energia elétrica na região nordeste do Brasil (PORTELLA *et. al.*, 2008b). Foram conformadas 4 estruturas, imobilizando cerca de 20 kg de material, ou 5 kg/poste. Considerando-se que pode ser retirada de um pneu de passeio, cerca de 4 kg de borracha fragmentada ou, da região da sua banda de rodagem, cerca de 0,8 kg, as situações dispostas imobilizam um pneu inteiro por poste

ou 6 pneus, se for utilizada, apenas, a borracha da sua banda de rodagem.

4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO

Quando os concretos com adição de material reciclado foram comparados em função da resistência à tração por compressão diametral, os resultados indicaram um comportamento diferenciado e sem relação direta entre resistência, teor ou tipo de resíduo adicionado ao concreto. Segundo SIDDIQUE *et al.* (2008), este comportamento acontece devido a não haver uma falha frágil típica similar à dos concretos convencionais.

Na Figura 40, está apresentado um gráfico comparativo entre as resistências à tração por compressão diametral dos concretos com adição de PEBD, PET, pneu e concreto de referência sem adições aos 28 dias de idade.

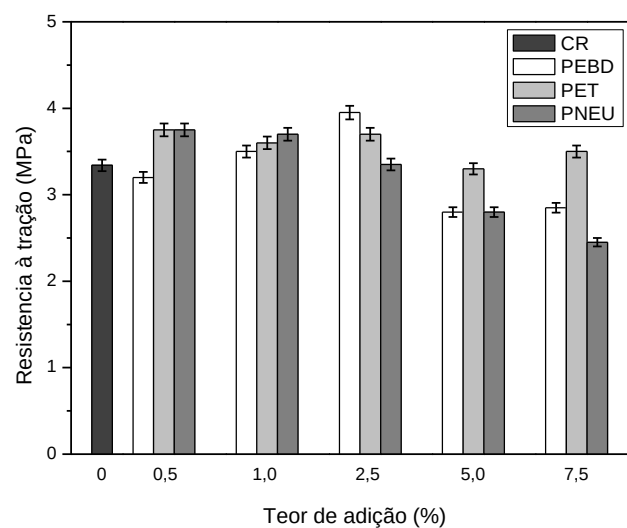


FIGURA 40 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS E SEUS RESPECTIVOS TEORES.

Não foi verificada uma relação direta entre a resistência à tração por compressão diametral e o teor de material adicionado. Em média, os melhores resultados foram, também, para os teores de 1 e 2,5%, em peso, para os três materiais, destacando-se o PEBD2.5 com resistência à tração por compressão

diametral de 3,95 MPa, aos 28 dias.

CHOI *et al.* (2005) verificam que as resistências à tração das misturas de concreto diminuíram com o aumento do teor de agregados de PET e para um determinado teor de agregado PET, a resistência de tração aumentou com a redução em relação a/c.

AL-MANASEER e DALAL (1997) concluíram que a resistência à tração diminuiu com o aumento do teor dos agregados de plástico.

A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o teor de material adicionado no estudo de FREITAS *et al.* (2009), também não foi linear. As perdas de resistência à tração por compressão diametral para o concreto com adição de 5 e 10% de fibras de pneu, em relação ao CR, foram de 10,5 e 21%, respectivamente. Para o concreto com adição de 15% a perda resultante foi de 19,3%.

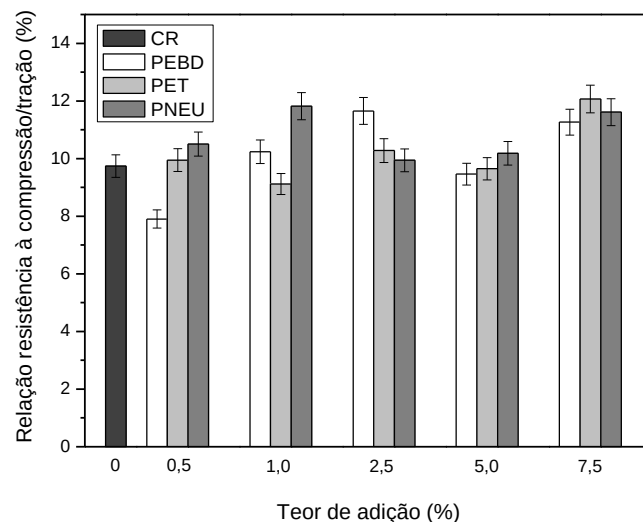


FIGURA 41 - GRÁFICO DA RELAÇÃO RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DOS DIFERENTES CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS E SEUS RESPECTIVOS TEORES.

Um dos fatores importantes a ser investigado quando se analisam concretos reforçados com fibras é a relação entre resistência à compressão e resistência à tração, conforme apresentado na Figura 41. Para os concretos convencionais a resistência à tração por compressão diametral é da ordem de 10% da resistência à compressão.

Nos ensaios realizados de resistências à compressão e à tração por

compressão diametral as amostras com adição de material polimérico reciclado foram capazes de resistir à carga por mais tempo se comparadas com as amostras sem adições. Esta tendência foi verificada por AL-MANASEER e DALAL (1997) onde relataram que as amostras de concreto contendo agregados plásticos, sob carga de compressão, não apresentaram ruptura tipo frágil como é normalmente observada no concreto convencional. Quando o teor de agregados de plástico foi aumentado, o tipo de falha tornou-se mais dúctil.

Para os materiais PEBD, PET e PNEU, nos teores analisados, a relação entre as resistências à compressão axial e tração por compressão diametral foi de $(10,4 \pm 0,8)\%$. Nesta situação, as fibras dos materiais adicionados agiram como reforço, evitando a propagação das trincas (PERET, 2003, ISMAIL e AL-HASHMI, 2008, SIDDIQUE *et al*, 2008).

4.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

4.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura dos Testemunhos da UHE Mourão

Nas Figuras 42 a 44 estão representadas as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos testemunhos da UHE Mourão.

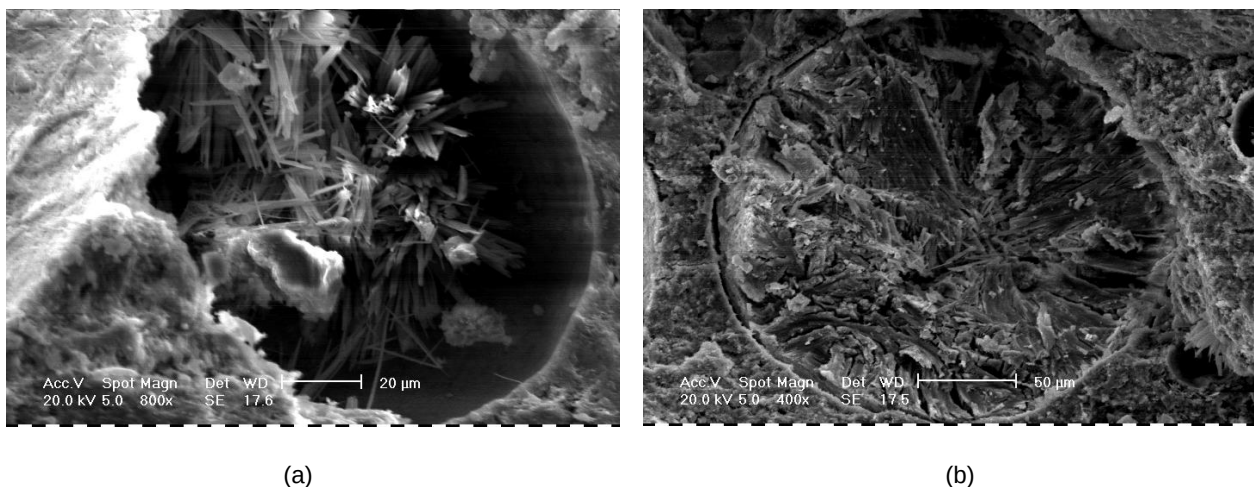


FIGURA 42 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO A. PORO COM FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). SUPERFÍCIE COM MICROTRINCA OCASIONADA POR EXPANSÃO (B).

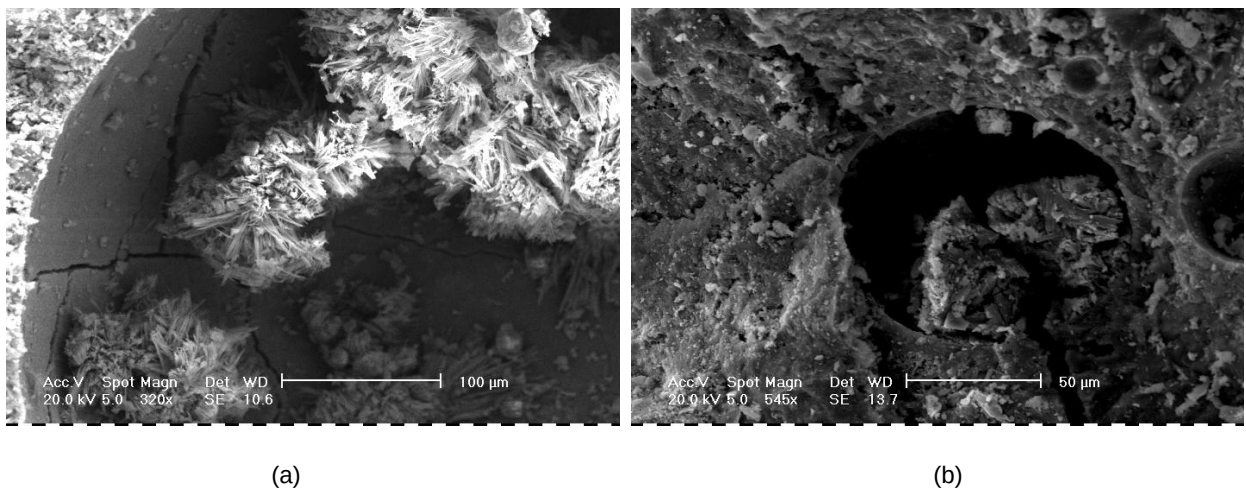


FIGURA 43 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO B. PORO COM FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). PORO COM MICROTRINCA. (B).

Nas Figuras 42a e 43a podem ser observadas as formações de etringita secundária na região interna de poro dos blocos identificados como Bloco A e Bloco B, respectivamente.

Nas Figuras 42b e 43b identificam-se poros contendo cristais de etringita secundária. O processo de formação desses cristais é contínuo e incessante, proporcionando uma expansão volumétrica. Nestes casos verifica-se que a formação da etringita secundária aconteceu no interior dos poros num processo expansivo ocasionando o surgimento de microtrincas. Esse processo é considerado deletério das estruturas de concreto.

No bloco de concretagem denominado Bloco C, também foi verificada a formação de cristais de etringita. Na Figura 44 são observados cristais de etringita secundária em regiões distintas da superfície da amostra. Na Figura 44a os cristais encontram-se na região próxima ao gel de CSH. Na Figura 44b constata-se que as estrutura em forma de “agulhas”, que representa a formação de cristais de etringita secundária, estão localizadas junto à superfície de fratura da estrutura. As trincas verificadas nesta figura podem ter sido ocasionadas, também, por reações do tipo RAA que representa outro processo deletério do concreto.

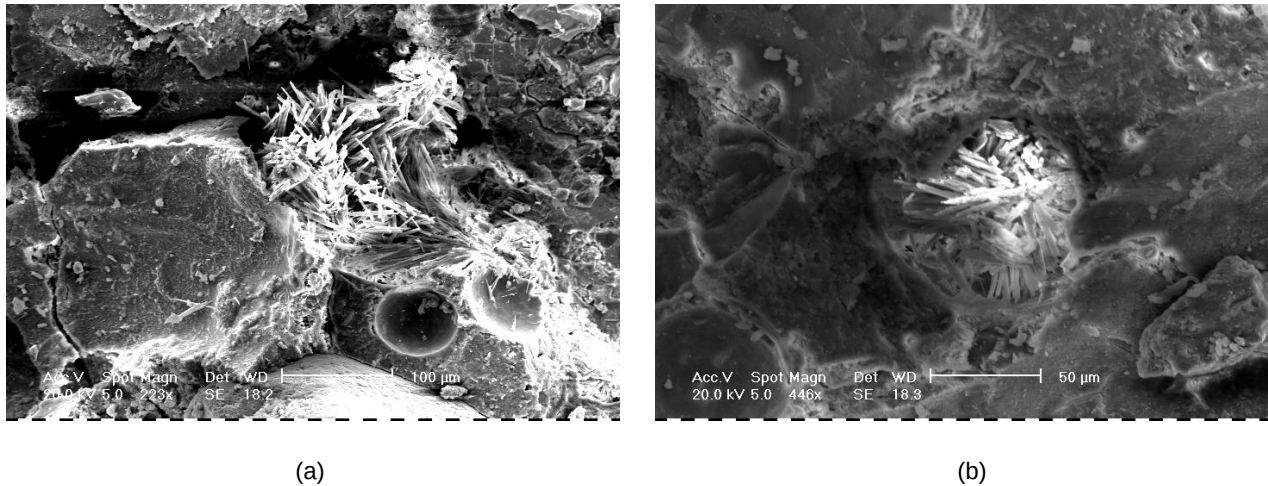


FIGURA 44 - MICROGRAFIAS DE TESTEMUNHO DE CONCRETO DA UHE MOURÃO – BLOCO C. REGIÃO APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (A). SUPERFÍCIE DE FRATURA APRESENTANDO FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA (B).

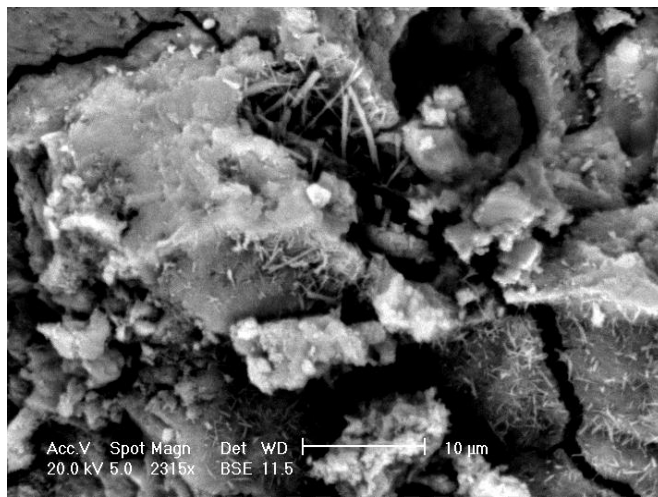
4.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura dos Concretos com Adição Materiais Poliméricos Reciclados

Os concretos com adição de material plástico reciclado (PEBD e PET) e o concreto com adição de elastômero (pneu) tiveram amostras depositadas em câmara úmida com dióxido de enxofre e mantidas nesse ambiente sulfuroso, à temperatura de 40 °C, durante 180 dias. Decorrido o período de envelhecimento artificial acelerado em câmara úmida as amostras foram rompidas com martelo e as superfícies de ruptura foram investigadas por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de energia dispersiva de raios-x.

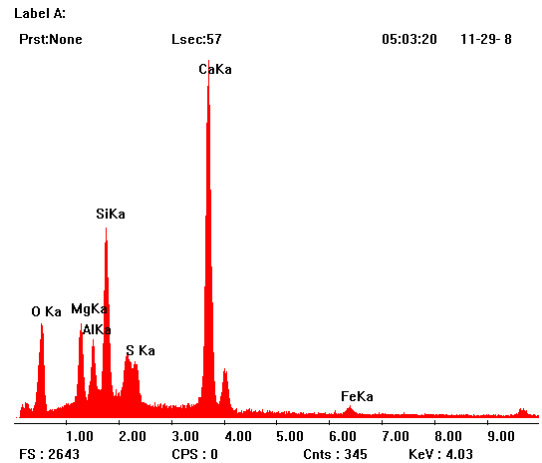
Na Figura 45 esta apresentada a micrografia da amostra de concreto com adição de 5% de fibras de pneus inservíveis.

Observa-se na Figura 45a microtrincas formadas na região onde se verifica um poro com cristais de etringita. Considera-se o processo de formação de etringita como sendo expansivo e um dos principais agentes da geração das microtrincas acima verificadas.

Na Figura 45b, verifica-se na espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) a presença de enxofre (S Ka) indicando que os cristais em forma de agulha podem ser considerados cristais de etringita.



(a)



(b)

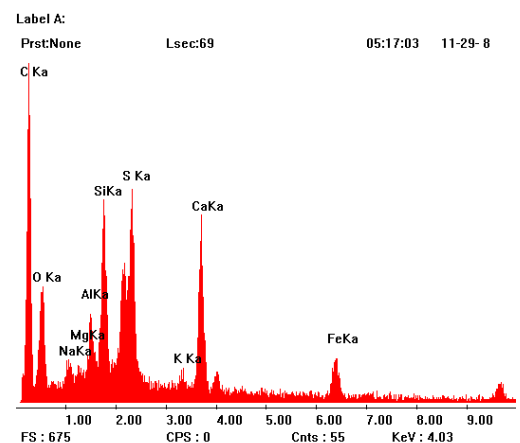
FIGURA 45 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE FIBRAS DE PNEU. MICROGRAFIA APRESENTANDO CRISTAIS DE ETRINGITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).

No caso das amostras de concretos velhos ou submetidas ao processo de envelhecimento acelerado esses cristais de etringita têm as seguintes denominações usuais: etringita secundária, etringita tardia ou, ainda, etringita retardada. Estas denominações são oriundas do termo de língua inglesa *delayed ettringite*.

Na Figura 46 está apresentada a micrografia da amostra de concreto com adição de 5% de fibras de pneus inservíveis.



(a)



(b)

FIGURA 46 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE FIBRAS DE PNEU. MICROGRAFIA APRESENTANDO FIBRA, AGREGADO E CRISTAIS (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).

Na Figura 46a, observa-se o detalhe da fibra de pneu. Na mesma região pode ser observado o agregado e a formação de cristais de etringita e fases de monossulfato.

Com Figura 46b, consta-se a presença de enxofre e carbono em elevado teor. Estes, além de outros identificados, são elementos constituintes da borracha de pneu.

Devido ao elevado teor de enxofre, a presença de partículas de pneu favoreceu a formação de cristais de etringita secundária, observada também em outras amostras confeccionadas com este material.

Nas Figuras 47, 48 e 49 estão apresentadas micrografias da amostra de concreto com adição de 5% de PET moído.

Observa-se na Figura 47a presença de material polimérico envolto pela argamassa. A interface entre o material PET e a argamassa apresenta-se bem definida. Verifica-se que a aderência entre estes dois elementos não se configura por completo, existindo um pequeno espaçamento entre a pasta e o agregado de material reciclado PET

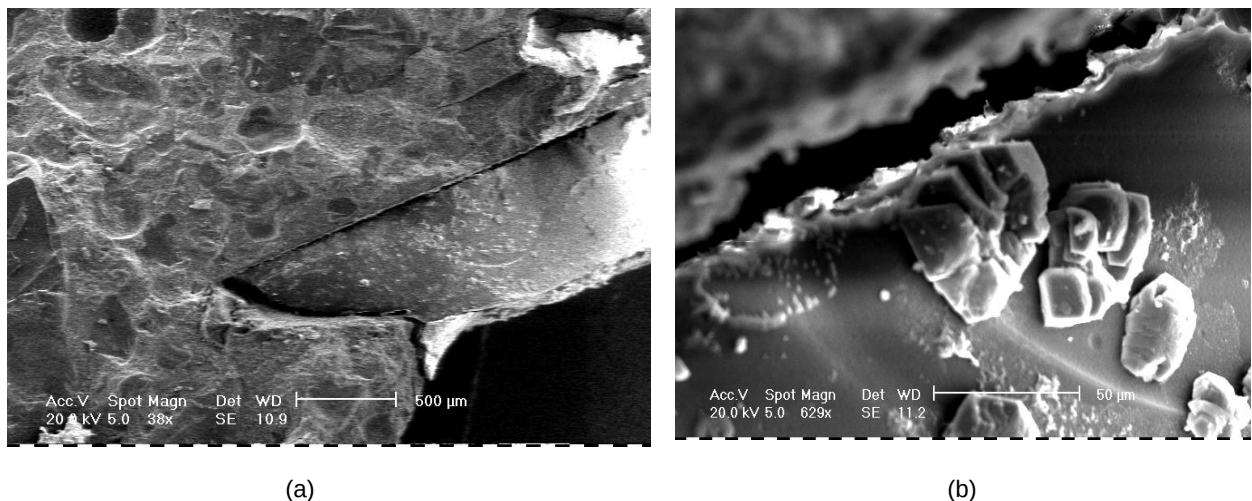
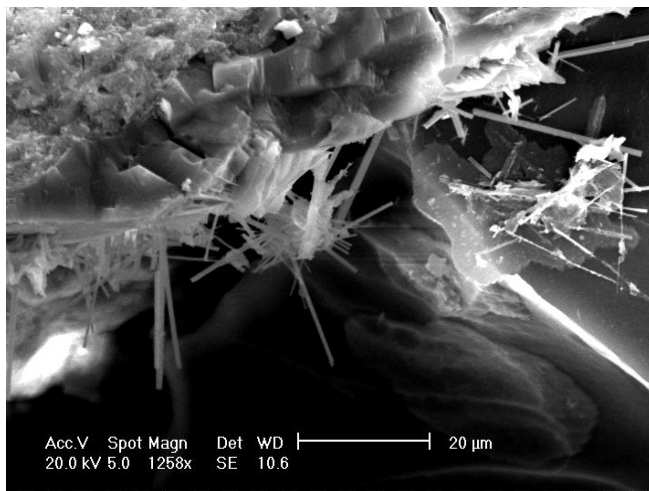


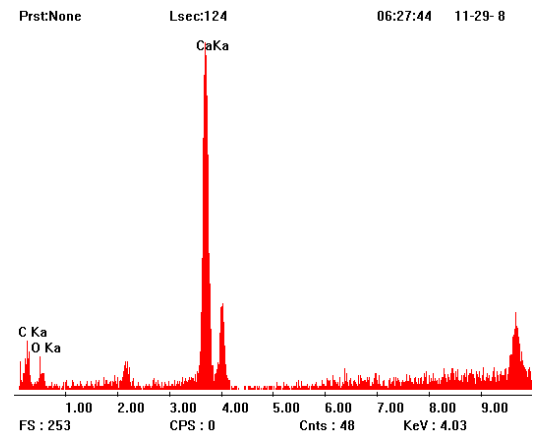
FIGURA 47 - DETALHE DA FIBRA DE PET NA AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET MOÍDO (A). DETALHE DA INTERFACE ENTRE A FIBRA DE PET MOÍDO E O CONCRETO (B).

A Figura 47b mostra o detalhe do espaçamento que pode estar em função da superfície lisa do agregado artificial, onde a falta de rugosidade permitiu a formação de uma película de água que após a hidratação completa do cimento gerou este pequeno vazio observado na interface de ligação dos materiais. Pode-se, ainda, inferir que tendo sido local de ruptura do corpo de prova existiu um deslocamento do material a PET.

Nas amostras de concreto com adição de material reciclado – PET moído – também foram identificadas as formações de cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H), etringita secundária, calcita e gipsita (Figura 49).

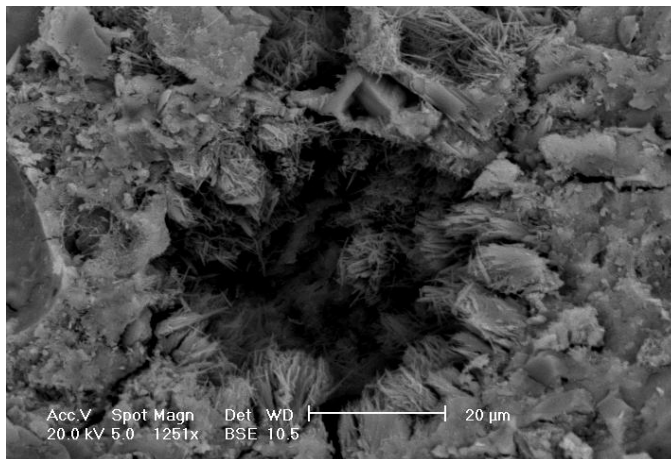


(a)

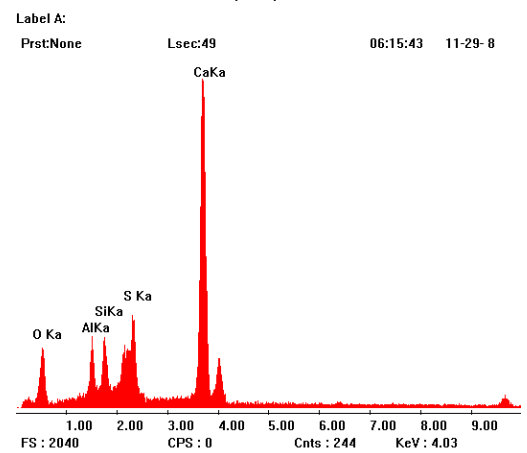


(b)

FIGURA 48 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET MOÍDO. MICROGRAFIA APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA E CRISTAIS DE CALCITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).



(a)



(b)

FIGURA 49 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PET. MICROGRAFIA APRESENTANDO CRISTAIS DE ETRINGITA, CSH E GIPSITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).

Nas Figuras 50 e 51 estão apresentadas micrografias da amostra de concreto com adição de 5% de PEBD aglutinado.

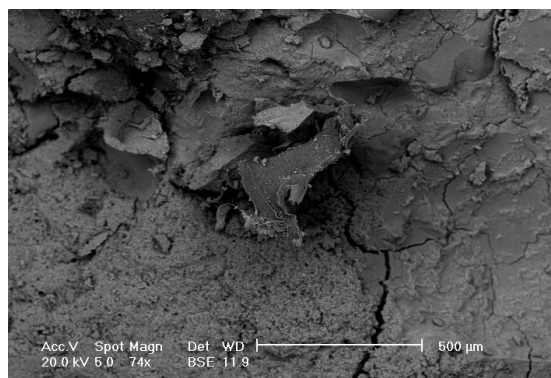


FIGURA 50 - DETALHE DA FIBRA DE PEBD AGLUTINADO ADICIONADO AO CONCRETO NO TEOR DE 5%, APRESENTANDO MICROFISSURAS NA SUPERFÍCIE DE FRATURA.

Na Tabela 33 estão indicados os valores do percentual atômico semiquantitativo dos elementos, conforme o espectro da composição química elementar apresentada na Figura 51b. O valor da relação Si/Ca próxima de 0,4 pode, também, ser indicativo de presença de gel expansivo (TAYLOR, 1997).

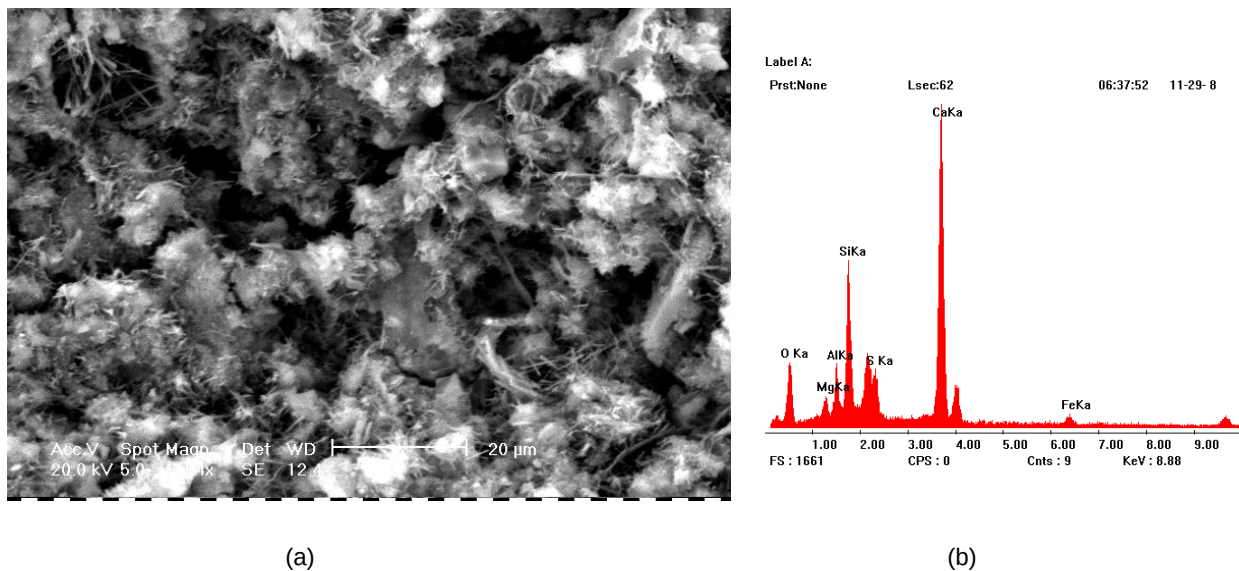


FIGURA 51 - AMOSTRA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE PEBD AGLUTINADO. MICROGRAFIA APRESENTANDO AGULHAS DE ETRINGITA (A). EDS DA ÁREA ANALISADA (B).

TABELA 33 – ANÁLISE QUÍMICA SEMIQUANTITATIVA DA COMPOSIÇÃO PEBD A 5%, EM PESO, POR EDS.

Elemento	% em peso	% atômico
O	45,731	65,072
Mg	02,236	02,094
Al	03,588	03,027
Si	8,919	07,229
S	3,586	02,546
Ca	33,558	19,061
Fe	2,382	00,971
Total	100	100

As micrografias analisadas indicam que os concretos confeccionados com adição de resíduos poliméricos, pneu, PET e PEBD envelhecidos durante 180 dias sofreram processos de degradação semelhantes. Os íons sulfatos presentes na câmara úmida de envelhecimento acelerado, possivelmente, provocaram a formação de cristais de etringita que estiveram presentes em todas as amostras analisadas. Esses cristais são expansivos e causam degradação das estruturas de concreto.

4.7. RESISTÊNCIA À ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO

Na Tabela 34, estão apresentados os valores de perda de massa por abrasão pelo método submerso do CR e dos concretos confeccionados com adição de materiais poliméricos reciclados e industrializados.

TABELA 34 – PERDA DE MASSA PERCENTUAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO.

Material	Perda de massa (%)		
	24 h	48 h	72 h
CR	2,50%	4,24%	6,57%
Pneu 2.5	3,26%	5,22%	8,41%
Pneu 5	3,19%	5,03%	7,39%
PET 2.5	3,37%	5,57%	8,07%
PET 5	2,86%	4,55%	5,04%
PEBD 2.5	3,44%	5,39%	7,46%
PEBD 5	1,95%	3,32%	3,94%
Microfibra de PE e PET	3,17%	5,61%	7,87%
Fibra multifilamento de PP	3,54%	6,03%	8,54%
Fibra corrugada de PET	2,49%	4,15%	6,32%

Na tabela acima, analisando-se a perda de massa às 72 horas no ensaio de resistência à abrasão pelo método submerso, observa-se que o CR obteve melhor desempenho quando comparado com os concretos com adição de resíduos poliméricos no teor de 2,5%. Entretanto no teor de 5% de resíduos poliméricos os concretos com adição de PET e PEBD apresentaram melhores resultados que o concreto sem adição. Examina-se que não existe linearidade na perda de massa para 24, 48 e 72 horas de ensaios. Para HORSZCZARUK (2005) o período de análise de resistência à abrasão pelo método submerso deve ser de pelo menos 72 h para o concreto de alta resistência em estruturas hidráulicas.

SOROUSIAN *et al.* (2003) observaram que a adição de plástico reciclado causou uma redução na resistência à abrasão do concreto. Os autores atribuíram este efeito ao fato de que as fibras próximas da superfície foram arrancadas sob efeitos de abrasão e a mudança nas características de desgaste do concreto com a presença de fibras de plástico reciclado modificou as características da superfície do material. Este efeito de alteração nas características da superfície pode ser analisado com mais propriedade perante o estudo proposto neste trabalho de avaliação do desgaste da superfície, apresentado na seção seguinte.

No trabalho de HORSZCZARUK (2005) o concreto confeccionado com fibra comercial polimérica foi o material que apresentou menor perda de massa nos ensaios de acordo com a ASTM C1138 para os intervalos de 24, 48, 72, 96 e 120 horas, quando comparado com o concreto sem fibras ou com os concretos com reforçados com fibras de aço.

Analizando-se o teor de adição de material polimérico reciclado constata-se que para uma maior quantidade de material adicionado ao concreto existe um ganho na resistência à abrasão. Este aumento acontece para todos os materiais analisados nos teores de 2,5 e 5,0%. Efeito semelhante foi verificado por SOROUSHAN *et al.* (2003) na resistência à abrasão em função do tipo de fibra plástica apenas para um incremento no teor fibras de polipropileno virgem de 0,075% para 0,15%, em relação ao volume de cimento.

Considerando o tipo de material reciclado utilizado na adição verifica-se que nos concretos confeccionados com resíduos PEBD têm-se o melhor desempenho para a resistência à abrasão. O material confeccionado com fibras de pneu apresentou os maiores valores de perda de massa, representando menor resistência à abrasão. Os concretos com adição de PET moído mostraram valores intermediários entres os outros dois tipos de resíduos estudados.

Quanto aos materiais poliméricos comerciais observou-se que o material de reparo confeccionado com fibra corrugada de PET obteve os melhores resultados de perda de massa para 24, 48 e 72 horas. O material preparado com fibra multifilamento de PP apresentou a maior perda de massa no ensaio de resistência a abrasão quando comparado aos demais materiais estudados. Conclui-se que do ponto de vista de resistência à abrasão, considerando-se apenas a perda de massa, a fibra corrugada de PET apresentou o melhor desempenho.

4.7.1. Avaliação do Desgaste de Superfície nos Ensaios de Resistência à Abrasão pelo Método Submerso

Nos ensaios de resistência à abrasão pelo método submerso pode-se

verificar a forma de desgaste das superfícies, principalmente, na interface entre o substrato e o material de reparo observando-se o chamado “efeito de borda”. Esse efeito acontece quando as condições de resistência mecânica são diferentes entre o MR e o material da base (substrato).

Na Figura 52 estão apresentadas as fotografias do corpo de prova constituído pelo conjunto substrato/material de reparo após 72 horas de ensaio de resistência à abrasão pelo método submerso.



FIGURA 52 – FOTOGRAFIA DO CP APÓS O ENSAIO DE ABRASÃO CONSTITUÍDO PELO SUBSTRATO E MR. CONCRETO DE REFERÊNCIA (A). CONCRETO COM ADIÇÃO DE PEBD NO TEOR DE 5% (B)

Nas Figuras 53 a 62 estão apresentados os gráficos esquemáticos em projeção 3D dos corpos de prova de concreto representados como substratos e os vários MR estudados.

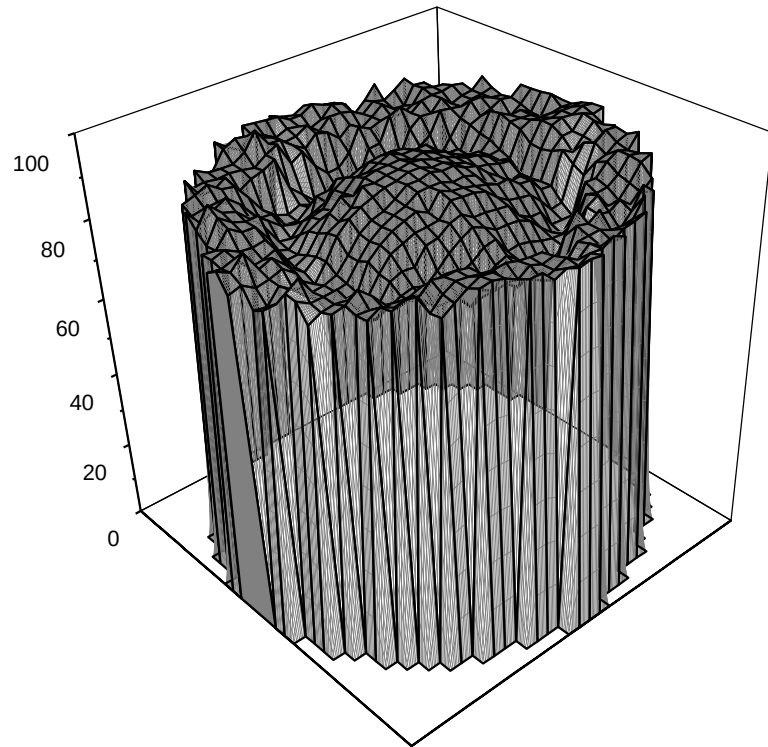


FIGURA 53 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR CONCRETO DE REFERÊNCIA.

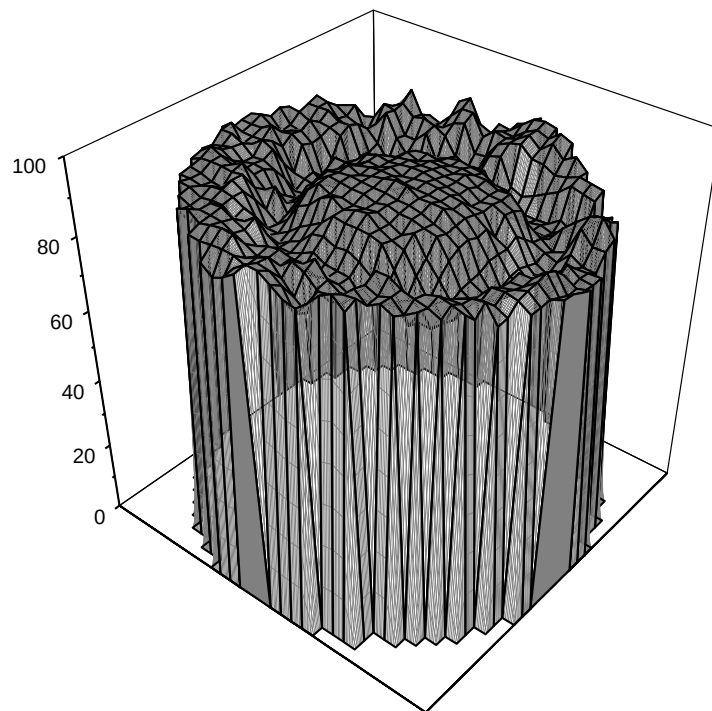


FIGURA 54 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PNEU A 2,5%.

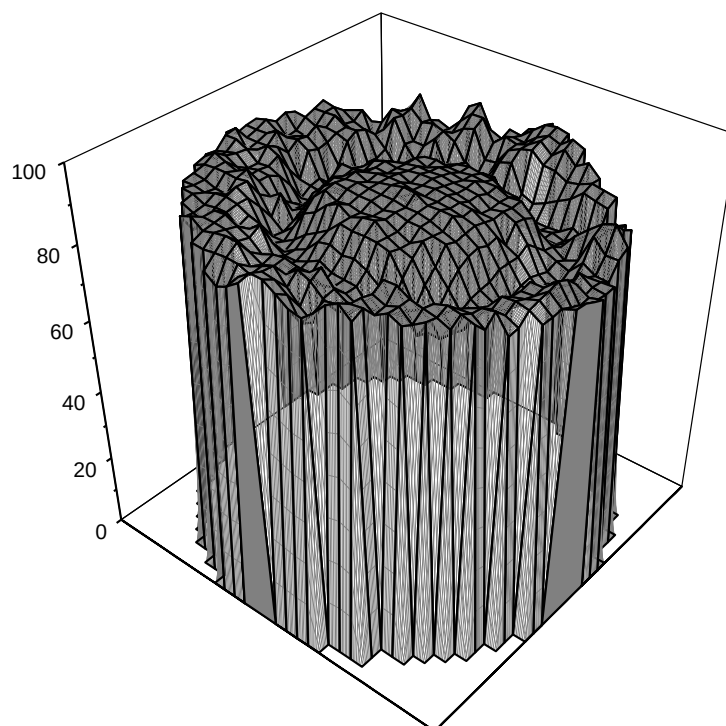


FIGURA 55 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PNEU A 5%.

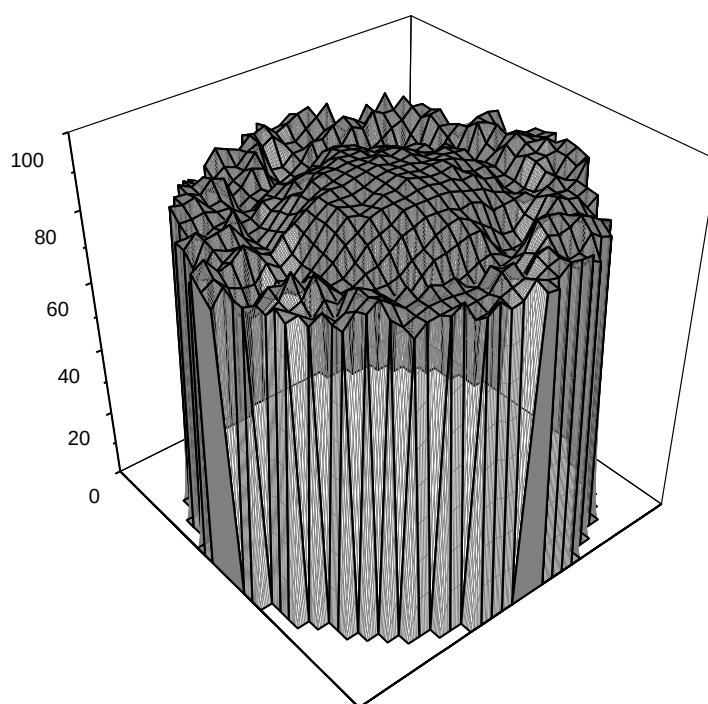


FIGURA 56 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PET A 2,5%.

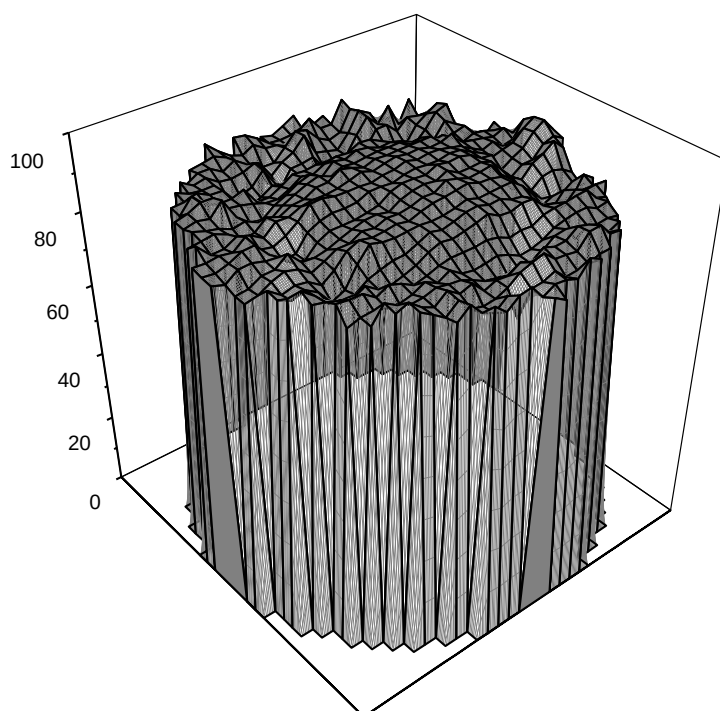


FIGURA 57 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PET A 5%.

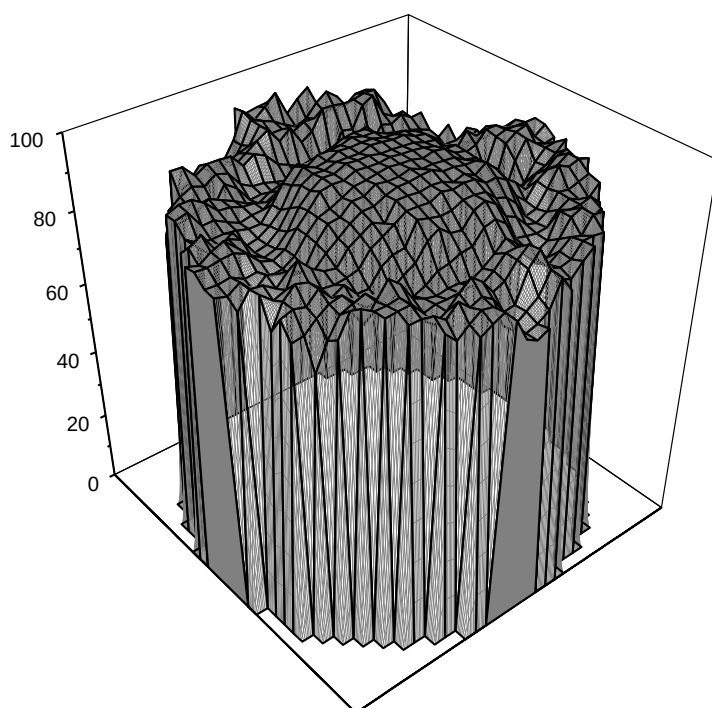


FIGURA 58 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PEBD A 2,5%.

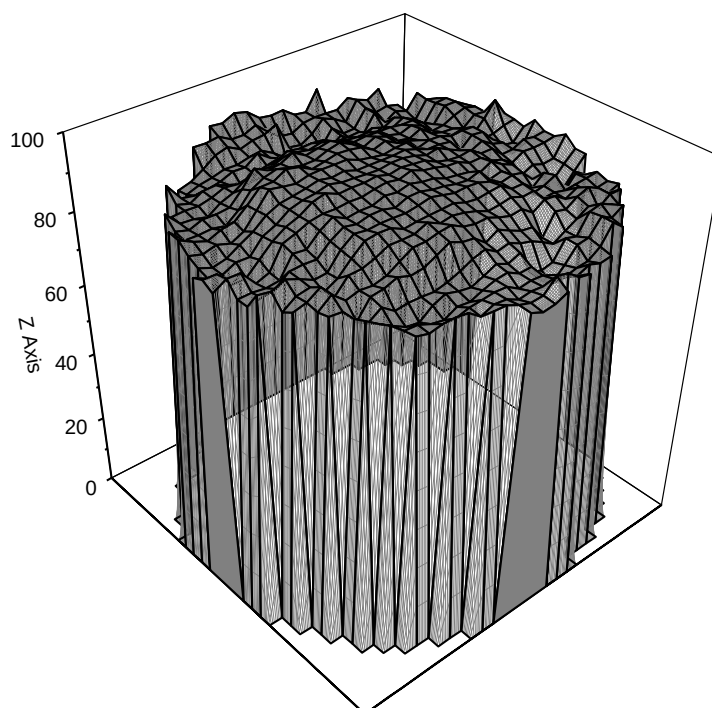


FIGURA 59 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM PEBD A 5%.

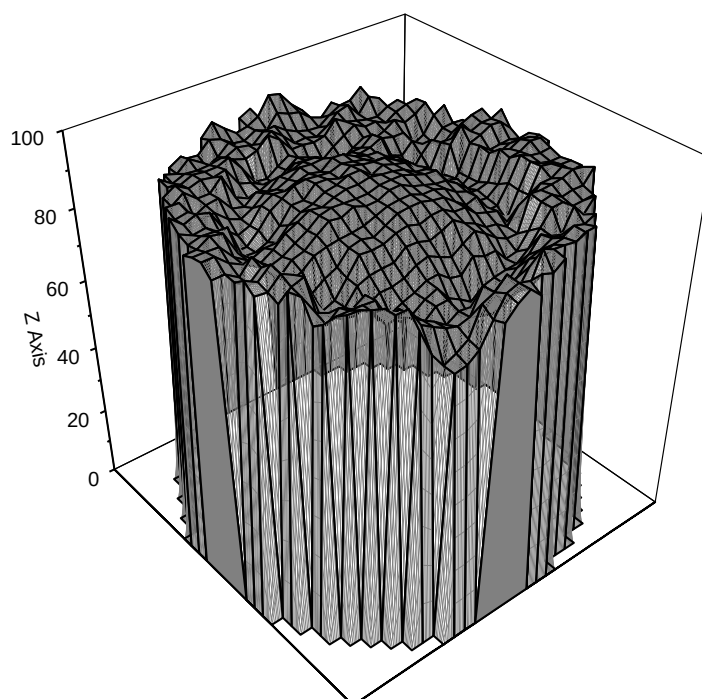


FIGURA 60 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM MICROFIBRA COMERCIAL DE PE E PET.

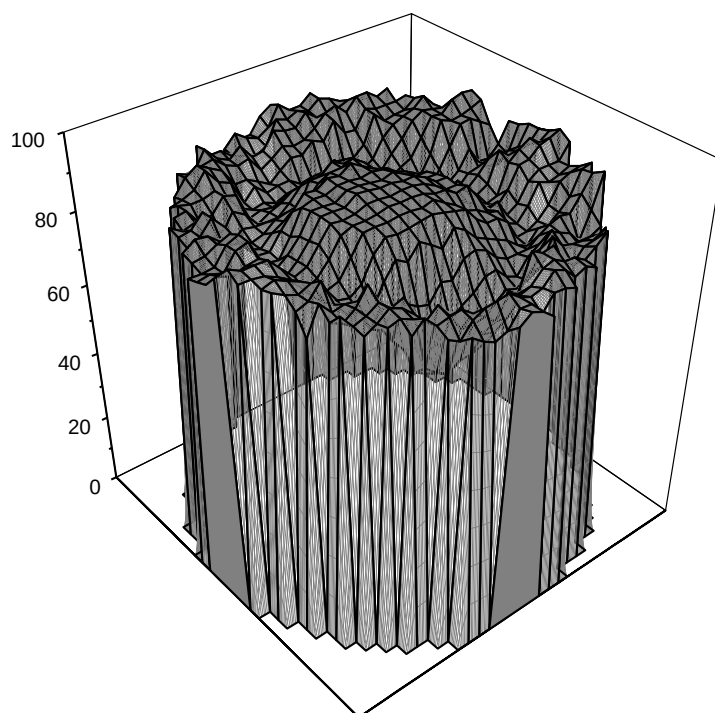


FIGURA 61 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR CONFECCIONADO COM O CONCRETO COM A ADIÇÃO DAS FIBRAS COMERCIAIS MULTIFILAMENTO DE PP.

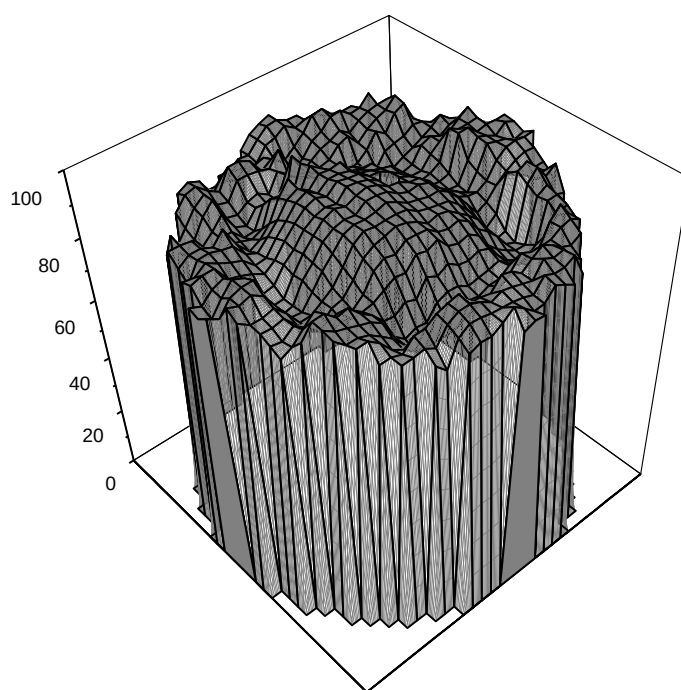


FIGURA 62 - GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO DO MR DE CONCRETO COM FIBRAS COMERCIAIS CORRUGADAS DE PET.

Observa-se na fotografia da Figura 52a que o corpo de prova constituído pelo conjunto substrato/material de reparo confeccionado com o concreto de referência sem adições de fibras apresentou um desgaste acentuado na borda entre o substrato e o material de reparo. Neste caso, o MR sofreu desgaste ligeiramente maior que o substrato conforme pode ser verificado no gráfico esquemático da Figura 53.

A fotografia na Figura 52b do corpo de prova com material de reparo confeccionado com concreto com adição de material reciclado de PEBD aglutinado no teor de 5% apresenta menor desgaste de superfície e um efeito de borda significativamente reduzido. O material de reparo sofreu desgaste menor do que o substrato, conforme pode ser constatado na Figura 59 no gráfico esquemático com escala vertical ampliada.

Nos corpos de prova com MR de concreto com fibras foi possível observar a presença das fibras na superfície de desgaste, conforme mostrado na Figura 63.

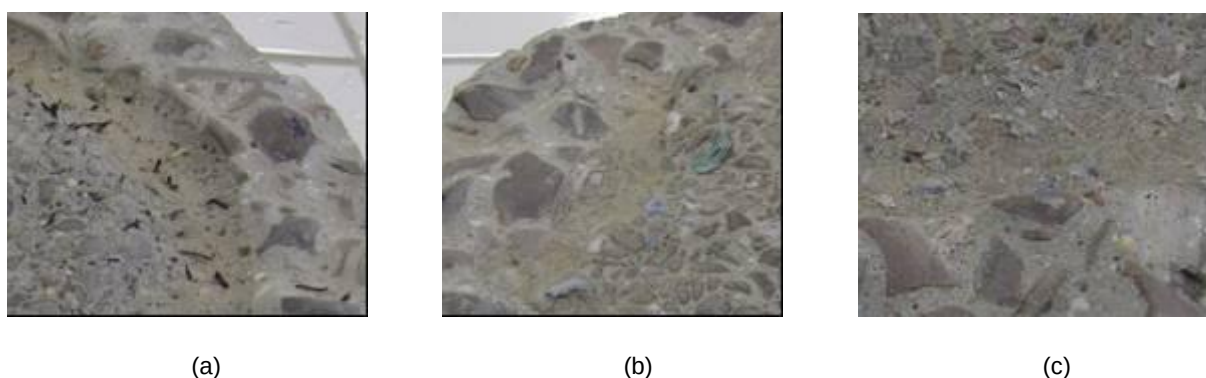


FIGURA 63 – DETALHE DOS CORPOS DE PROVA COM PRESENÇA DE MATERIAL POLIMÉRICO NA SUPERFÍCIE DE DESGASTE. PNEU (A). PET (B). PEBD (C)

HORSZCZARUK (2009) realizou estudo com o concreto de alto desempenho (CAD) e concreto de alto desempenho reforçado com fibras (CADRF) analisando o desempenho quanto à abrasão hidráulica. A autora verificou o efeito que chamou de “*shadow zone*” ou zona de sombra (Figura 64). Este efeito foi constatado mais especificamente no concreto reforçado com fibras de aço do que no concreto reforçado com fibras poliméricas de PP. O efeito da zona de sombra causou um ligeiro aumento na resistência abrasiva do CAD.

Dentre os materiais pesquisados, concreto sem adição de fibras, concretos

reforçados com fibras de aço de variadas dimensões e fibras de PP, HORSZCZARUK (2009) concluiu que as fibras de polipropileno utilizadas causaram aumento da resistência à abrasão dos concretos CAD, particularmente durante as primeiras 48 h do teste, sendo este o material analisado de maior resistência ao processo abrasivo hidráulico. A autora considera, ainda, a possibilidade de melhor proteção da armadura de aço estrutural contra a corrosão, quando utilizadas as fibras de polipropileno.

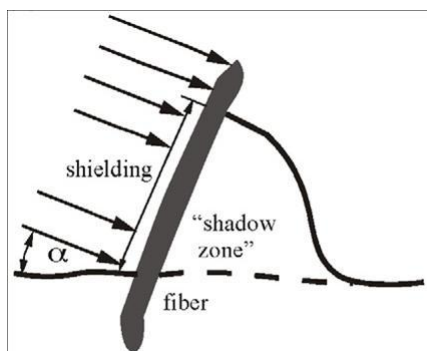


FIGURA 64 – ESQUEMA DA FORMAÇÃO DA ZONA DE SOMBRA NOS CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FONTE: HORSZCZARUK, 2009).

No *Concrete Repair Manual* do *American Concrete Institute* são apresentados estudos comparando o concreto convencional, com aditivos e adições tipo sílica ativa e fibras de aço. Os concretos com o valores menores do que 6,5% de perda de massa nos ensaios de abrasão foram considerados de bom desempenho quanto aos efeitos abrasivos.

KORMANN *et al.* (2003) avaliou o desempenho de quatro materiais de reparo: argamassa com sílica ativa, argamassa epoxídica, argamassa polimérica e concreto com fibras de aço. Na avaliação quanto ao desempenho verificou que a argamassa epoxídica apresentou menor perda de massa no valor de 2,03% e o desgaste foi mais acentuado no substrato. Tal efeito pode ser atribuído à resistência à compressão axial elevada do material (acima de 90 MPa). Outros materiais que apresentaram bom desempenho nos teste foram o CR e o concreto com adição de fibras de aço com perdas de massa de 2,67 e 3,65%, respectivamente. A autora concluiu que o sistema substrato-concreto com adição de fibras de aço apresentou bom desempenho e o desgaste verificado foi generalizado.

Quanto ao desgaste de superfície nos ensaios de resistência à abrasão pelo

método submerso pode-se concluir que o material de reparo confeccionado com concreto com adição de PEBD aglutinado no teor de 5% apresentou o melhor resultado, pois a superfície de desgaste foi similar entre o material de reparo e o substrato.

4.8. POTENCIAL DE CORROSÃO

Os materiais estudados foram avaliados quanto ao desempenho de durabilidade com o emprego da técnica do potencial de corrosão sob envelhecimento acelerado. Os corpos de prova representativos dos materiais estudados foram envelhecidos por imersão em soluções salinas à base de NaCl a 3,4% e Na₂SO₄ a 2,1%, ambos em peso. Estes métodos de envelhecimento foram confrontados com banho de imersão em água destilada, visando formular uma referência para os corpos de prova envelhecidos artificialmente.

Para melhor visualização dos resultados os gráficos foram divididos em função do material empregado. Estes grupos são formados pelos concretos com adição de materiais poliméricos reciclados nos teores de 2,5% e 5,0% e com adição de fibras comerciais, sendo em todos os casos comparados com o concreto de referência.

4.8.1. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Banho de Na₂SO₄

Na Figura 65 estão apresentados os potenciais de corrosão em relação ao tempo de envelhecimento dos corpos de prova do concreto de referência e das composições a 2,5%, em peso de adição material polimérico reciclado, por imersão em solução de Na₂SO₄, a 2,1%. O concreto confeccionado com pneu no teor de 2,5% apresentou o menor potencial de corrosão se comparado com o CR e os demais CPs confeccionados com PET e PEBD.

Considerando que, um potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre mais negativo que -350 mV indica a probabilidade de 95 % corrosão, o potencial mais positivo que -200 mV indica a probabilidade de 5%

e o potencial entre -200 e -350 mV apresenta probabilidade incerta corrosão das armaduras de concreto, pode-se constatar que o concreto de referência e os concretos com adição de material reciclado PET e PEBD no teor de 2,5% apresentam 95% de probabilidade de corrosão, enquanto o corpo de prova confeccionado com concreto com adição de 2,5% de fibras de pneus apresentou uma probabilidade incerta.

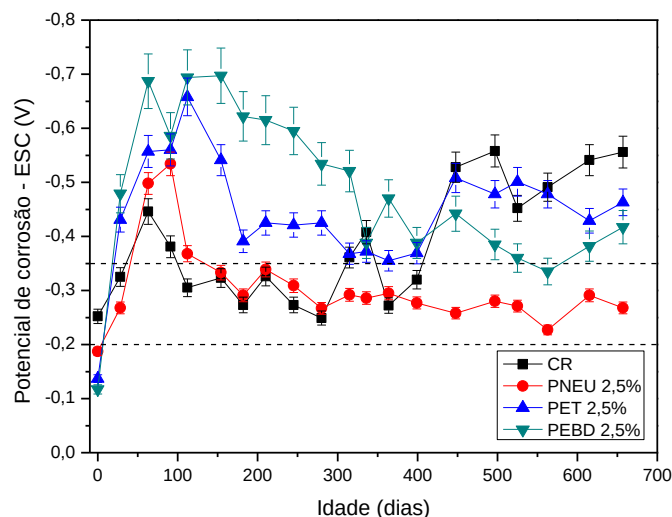


FIGURA 65 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.

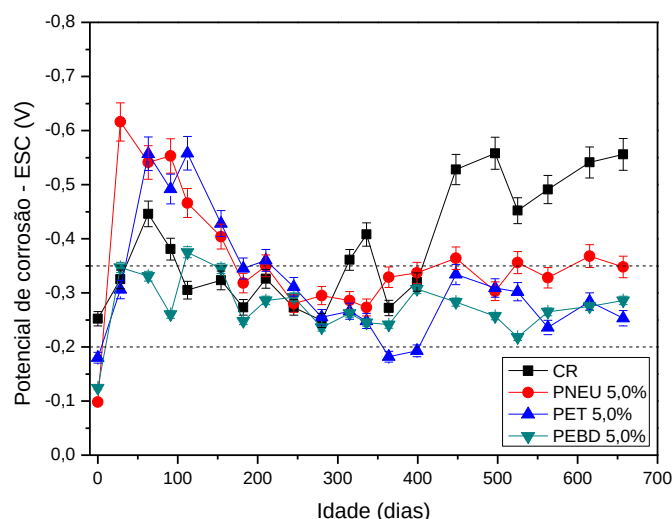


FIGURA 66 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.

Potenciais de corrosão menos negativos foram identificados no mesmo tipo de material, entretanto, com o teor de 5,0%, conforme observado na Figura 66. Tal resultado pode estar relacionado ao fato de uma melhora na durabilidade dos

concretos com adição de materiais poliméricos em maior teor. Os três materiais reciclados permaneceram durante o maior tempo em uma faixa incerta de probabilidade de corrosão.

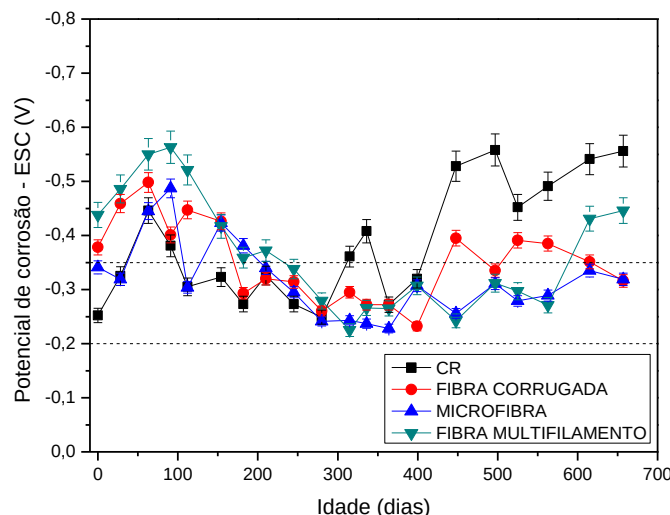


FIGURA 67 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE Na_2SO_4 A 2,1%.

Como observado na Figura 66, as fibras comerciais apresentaram comportamento semelhante aos dos CPs confeccionados com os resíduos poliméricos, entretanto estes últimos apresentam a vantagem de menor custo comercial e possibilidade de redução do impacto ambiental causado por esses resíduos.

No geral, as medidas do potencial de corrosão dos concretos trabalhados serviram para demonstrar um desempenho similar das composições, tendendo para valores na faixa probabilidade incerta de corrosão. As composições a 2,5% tiveram os piores potenciais de corrosão no período de análise, comparativamente, às composições de maior teor (5,0%).

O concreto de referência apresentou o maior potencial de corrosão em todos os grupos de análise. Pode-se atribuir à adição de materiais poliméricos ao concreto uma melhora na durabilidade do material conforme os parâmetros de análise de potencial de corrosão.

As informações obtidas por meio da técnica de potencial de corrosão são marcadamente qualitativas. Os corpos de prova estudados representam o volume total do concreto armado, isso engloba a pasta de cimento e argamassa, agregados e, neste

caso, os materiais poliméricos adicionados (eletrólito). Então o objeto de análise da técnica constituído pela armadura de aço (eletrodo) passa a ser afetado por todos esses outros materiais. Considera-se que a adição de materiais poliméricos ao concreto aumentou a resistividade do mesmo, isto acarretou em alterações nos potenciais de corrosão obtidos com uma consequente redução destes potenciais.

4.8.2. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Banho de NaCl

Na Figura 68, apresenta-se o potencial de corrosão em função do tempo de envelhecimento por imersão em solução de NaCl a 3,4% dos corpos de prova confeccionados de concreto com adição de materiais poliméricos reciclados no teor de 2,5% comparados com o concreto de referência sem adições.

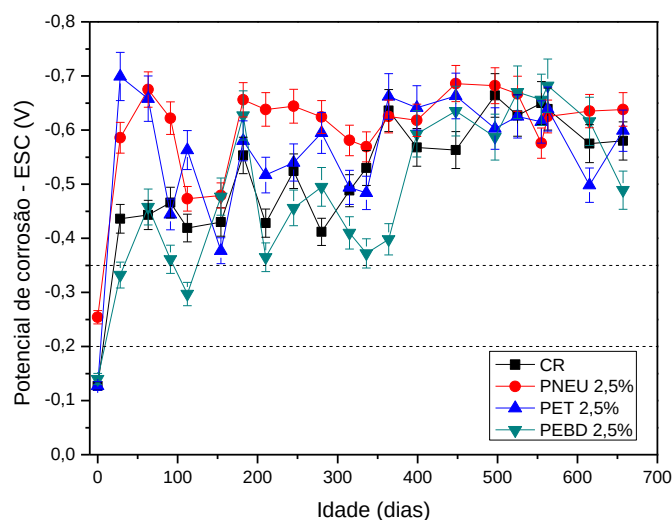


FIGURA 68 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.

Observa-se na Figura 68 que todos os corpos de prova entraram na faixa de probabilidade 95% de estado corrosivo a partir de, aproximadamente, 120 dias de envelhecimento em banho por imersão em NaCl. O PEBD apresentou os menores potenciais se comparado com os demais materiais. O concreto com adição de fibras de pneu foi o material que apresentou a tendência de maior potencial de corrosão.

Na Figura 69, apresenta-se o potencial de corrosão em função do tempo de envelhecimento por imersão em solução de NaCl a 3,4% dos corpos de prova confeccionados de concreto com adição de materiais poliméricos reciclados no teor de 5% comparados com o CR. Observa-se que os materiais concretos com adição de materiais poliméricos no teor de 5% tenderam a entrar na faixa de 95% de probabilidade nas primeiras idades. Em, aproximadamente, 100 dias de envelhecimento existiu uma leve tendência de recuperação do estado passivo do aço, após esse período verificou-se a desp passivação da armadura indicada pelos valores mais eletronegativos.

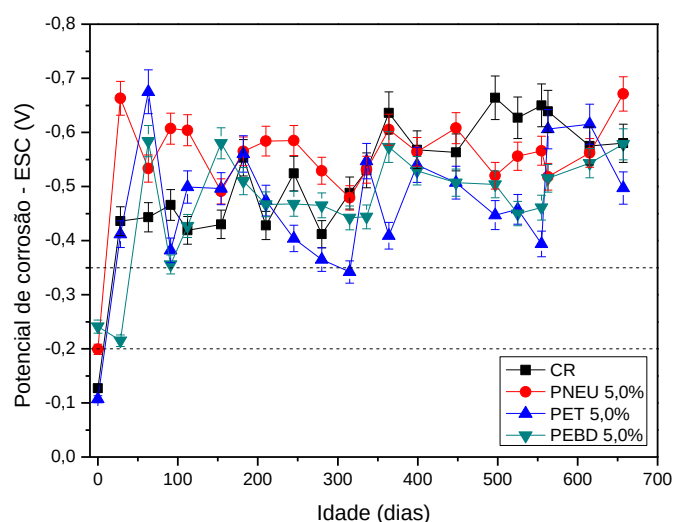


FIGURA 69 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.

No teor de 5% de materiais reciclados adicionados ao concreto o pneu foi o material que apresentou maior tendência eletronegativa se comparado com os demais. O PET e o PEBD apresentaram potenciais menos negativos que o CR e PET, mas todos os materiais permaneceram na faixa de 95% de probabilidade de corrosão para grande parte do período de análise.

Na Figura 70, apresenta-se o potencial de corrosão em função do tempo de envelhecimento por imersão em solução de NaCl a 3,4% dos corpos de prova confeccionados de concreto fibras comerciais comparados com o CR.

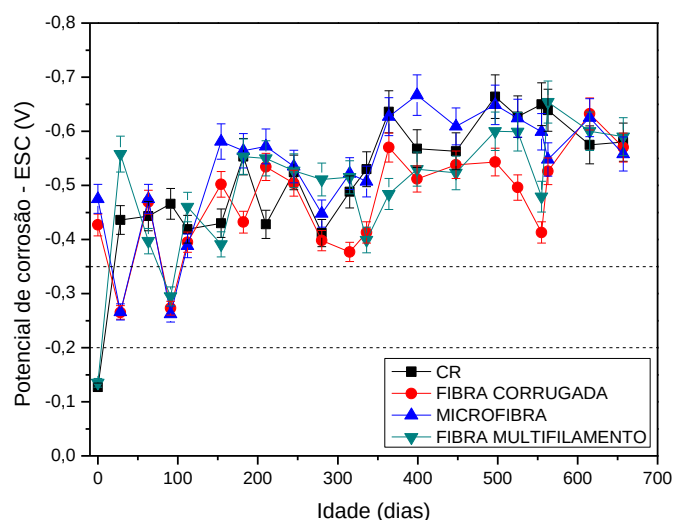


FIGURA 70 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE NaCl A 3,4%.

Verifica-se na Figura 70, para os concretos confeccionados com adição de fibras comerciais, a mesma tendência observada nos concretos com adição de materiais poliméricos no teor de 5%. Os materiais tenderam a entrar na faixa de 95% de probabilidade nas primeiras idades e nos 100 dias constatou-se a tendência de recuperação do estado passivo do aço, seguido de um aumento na eletronegatividade.

Ao longo do período de análise existiu uma ligeira tendência de maiores potenciais para o concreto com adição da microfibra de PE e PET. Os concretos confeccionados com adição de fibras multifilamento de PP e fibras corrugadas de PET apresentam tendência de potenciais pouco menos eletronegativos, se comparados com o CR e a microfibra. Nas últimas leituras o potenciais ficaram bem próximos uns dos outros.

De maneira geral, pode-se inferir que o processo de envelhecimento por imersão em solução de NaCl a 3,4%, em peso apresentou-se como mais agressivo que o envelhecimento em ambiente com Na_2SO_4 a 2,1%. Nestes casos pode-se concluir que o ambiente com íons cloreto foram mais agressivos que o ambiente com íons sulfato. Os processos deletérios devido à presença de íons cloreto são mais significativos para a armadura de aço do concreto armado do que os demais processos de degradação. Os íons cloreto têm maior possibilidade para migrar para o interior do

concreto seja por absorção ou difusão iônica (CASCUDO, 1997), isso faz dos ataques por cloretos os mais estudados na literatura. Em cada ambiente em que a estrutura de concreto estiver imersa será proporcionado um tipo mais significativo de ataque, mas raramente existe apenas um processo deletério desta estrutura atuando isoladamente (METHA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997; HELENE, 1986; ACI, 1999; CEB, 1985).

4.8.3. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos por Imersão em Água Destilada

Nas Figuras 71, 72 e 73, apresentam-se os potenciais de corrosão em função do tempo de envelhecimento por imersão água destilada dos corpos de prova confeccionados de concreto com adição de materiais poliméricos reciclados nos teores de 2,5 e 5%, e concretos com adição de fibras poliméricas comerciais comparados com o CR, respectivamente.

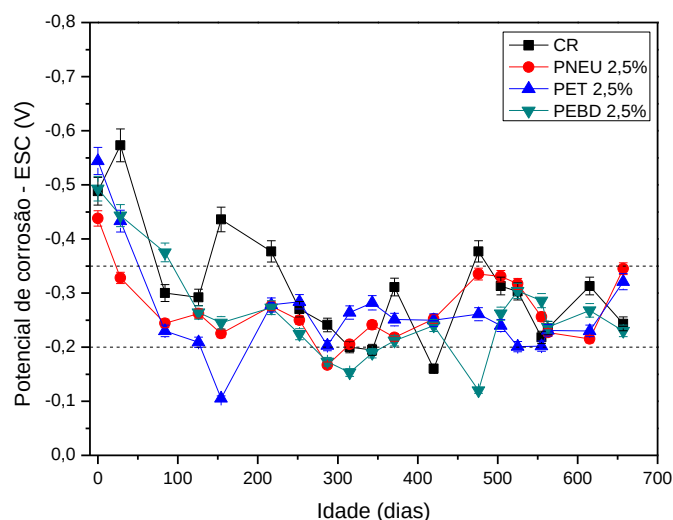


FIGURA 71 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 2,5%, POR IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA

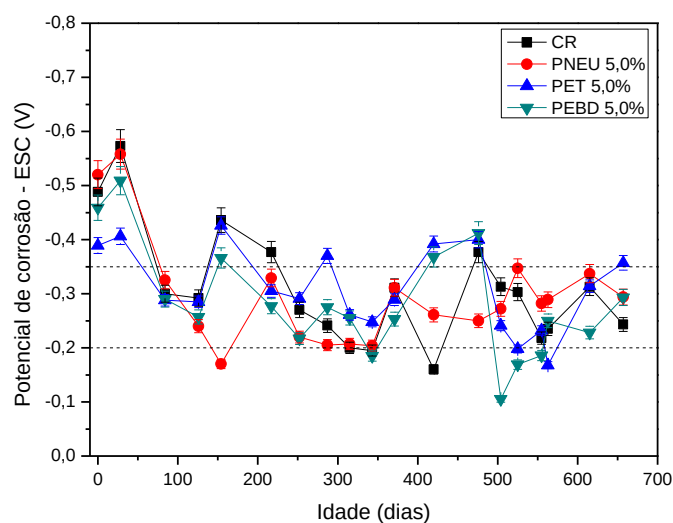


FIGURA 72 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM RESÍDUOS POLIMÉRICOS NO TEOR DE 5%, POR IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA

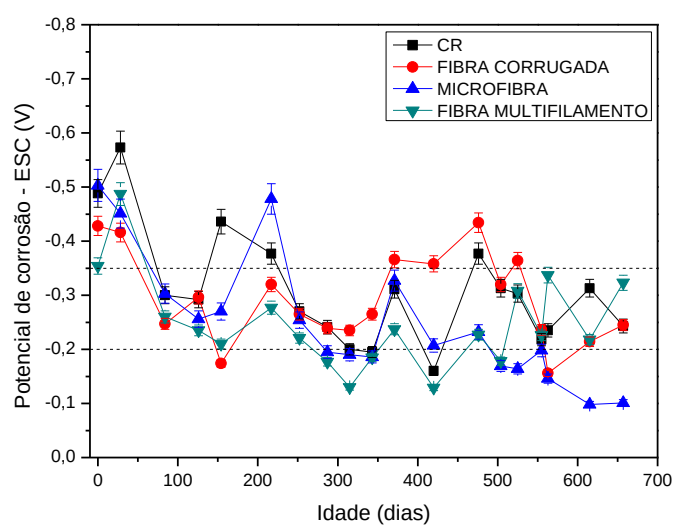


FIGURA 73 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM FIBRAS COMERCIAIS POR IMERSÃO ÁGUA DESTILADA.

Observa-se nas figuras acima que todos os materiais estudados tenderam a ficar na faixa de incerteza quanto à probabilidade de corrosão. Verifica-se que os potenciais nas primeiras idades apresentaram potenciais mais negativos, depois de, aproximadamente, 50 dias entraram em um estado mais estável. JOUKOSKI (2003) verificou efeito semelhante quando analisou a influência de diferentes espessuras de cobrimento das armaduras no potencial de corrosão. CASCUDO (1997) também observou este fenômeno e atribuiu esta entrada num período mais estável à

característica do estado passivo do aço.

Comparando os métodos de envelhecimento acelerado conclui-se que o banho de imersão em NaCl foi, comprovadamente, o mais agressivo levando-se em consideração tanto o banho em Na₂SO₄ como o banho formulado como sendo o de referência. Os corpos de prova analisados entraram numa faixa de 95% de probabilidade de corrosão em idades menores e os potenciais foram mais eletronegativos aferindo que as barras de aço dentro do volume de concreto foram mais atingidas pelo processo deletério de corrosão das armaduras.

Mesmo não sendo relatada na literatura a imersão em água destilada mostrou-se eficiente como referência aos métodos de envelhecimento de imersão em NaCl a 3,4% e Na₂SO₄. Notadamente, a imersão em água destilada manteve os corpos de prova num estado inócuo ao processo corrosivo com potenciais na faixa entre -0,2 V e -0,35 V. Em alguns materiais como no concreto com adição de PEBD aglutinado, tanto no teor de 2,5% como no teor de 5,0% em substituição em peso de agregado miúdo, e no concreto com microfibras constatou-se a tendência de permanência no estado passivo representado pelos mais baixos potenciais de corrosão. Estes materiais podem ser considerados os de melhor desempenho quanto à durabilidade em relação à técnica de potencial de corrosão empregada neste trabalho. Destaca-se a eficiência do polietileno de baixa densidade quanto à durabilidade do concreto que recebeu sua adição em substituição parcial do agregado miúdo. Sendo este, um material de baixo custo quando comparado com as fibras comerciais, existe uma contribuição ao meio ambiente quando se retira considerável volume de resíduos poliméricos do meio ambiente, como por exemplo, as sacolas plásticas e embalagens confeccionadas com o PEBD.

4.8.4. Potencial de Corrosão dos Corpos de Prova Envelhecidos em Câmara Úmida com SO₂

Na Figura 74 apresenta-se o potencial de corrosão ao longo do tempo, medido nos corpos de prova envelhecidos em câmara úmida com SO₂.

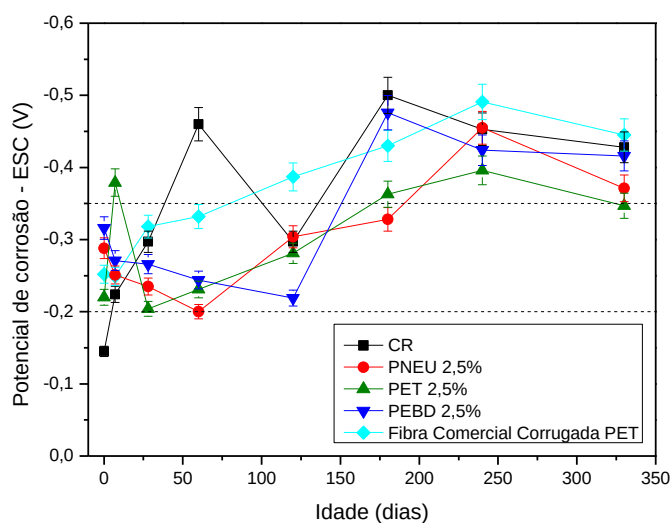


FIGURA 74 – POTENCIAIS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ENVELHECIMENTO DO CR E DOS CONCRETOS COM ADIÇÕES EM CÂMARA ÚMIDA COM SO_2 A 0,07%

Verifica-se na Figura 74 que os concretos com adição de materiais poliméricos reciclados tendem a apresentar um melhor desempenho quanto à durabilidade se comparados com o concreto de referência e o concreto com adição de fibra comercial. Este melhor desempenho pode ser verificado pelos potenciais menos negativos no decorrer do período estudado, além de uma estrada mais tardia na faixa de 95% de probabilidade de corrosão que acontece quando o E_{corr} apresenta-se mais negativo do que -350 mv.

Na última leitura realizada aos 330 dias de envelhecimento em câmara úmida com dióxido de enxofre a 0,07%, em volume, observou os menores potenciais de corrosão para o concreto confeccionado com adição de PET.

O concreto com adição de material polimérico reciclado de PEBD apresentou os potenciais menos negativos até os 120 dias com tendência a um estado passivo. Aos 180 dias o material entrou em estado ativo com tendência de recuperação para os 240 e 330 dias.

O material que entrou primeiramente na faixa de 95% de probabilidade de corrosão foi o CR entre 28 e 60 dias, recuperando-se para a faixa de incerteza de corrosão aos 120 dias e, novamente, apresentou aos 180 dias um potencial mais negativo que -350 mV, permanecendo no estado ativo.

O concreto reforçado com fibra corrugada de PET apresentou constante aumento no potencial de corrosão, entrando na faixa de 95% de probabilidade de corrosão em, aproximadamente, 75 dias de exposição em ambiente agressivo com SO_2 . Este foi o material que apresentou os potenciais mais negativos na ultimas medidas.

Na Tabela 35 está apresentado um quadro resumo com os valores médios dos potenciais de corrosão dos corpos de prova envelhecidos por diferentes métodos e seus respectivos desvios padrões.

TABELA 35 – VALORES DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM ADIÇÕES DE MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS E FIBRAS COMERCIAIS POLIMÉRICAS.

Materiais	Métodos de envelhecimento – valor médio do potencial de corrosão (V) e o respectivo desvio padrão da medida			
	Na_2SO_4 a 2,1%	NaCl a 3,4%	Câmara de SO_2 a 0,07%	Referência (água destilada)
CR	$-0,382 \pm 0,108$	$-0,512 \pm 0,122$	$-0,363 \pm 0,128$	$-0,308 \pm 0,105$
Pneu 2.5	$-0,307 \pm 0,081$	$-0,598 \pm 0,097$	$-0,296 \pm 0,082$	$-0,270 \pm 0,064$
Pneu 5	$-0,361 \pm 0,114$	$-0,550 \pm 0,094$		$-0,295 \pm 0,099$
PET 2.5	$-0,443 \pm 0,106$	$-0,553 \pm 0,127$	$-0,314 \pm 0,078$	$-0,264 \pm 0,092$
PET 5	$-0,320 \pm 0,112$	$-0,465 \pm 0,120$		$-0,308 \pm 0,075$
PEBD 2.5	$-0,486 \pm 0,147$	$-0,482 \pm 0,145$	$-0,293 \pm 0,096$	$-0,262 \pm 0,092$
PEBD 5	$-0,274 \pm 0,054$	$-0,423 \pm 0,100$		$-0,281 \pm 0,102$
Fibra corrugada de PET	$-0,352 \pm 0,073$	$-0,466 \pm 0,094$	$-0,359 \pm 0,089$	$-0,294 \pm 0,083$
Microfibra de PE e PET	$-0,319 \pm 0,070$	$-0,528 \pm 0,112$		$-0,249 \pm 0,118$
Fibra multifilamento de PP	$-0,369 \pm 0,106$	$-0,488 \pm 0,119$		$-0,248 \pm 0,086$

4.9. DESEMPENHO DOS MATERIAIS DE REPARO APLICADOS EM CAMPO

Foram observados os estados gerais de conservação dos MR, principalmente, quanto ao surgimento de patologias e interface entre o MR e o substrato. Nas Figuras 75 a 84 estão registrados os pontos onde foram aplicados os dez tipos de MR analisados em campo.

Observa-se na Figura 75a que o material de reparo aplicado na superfície hidráulica da estrutura de concreto está bem aderido ao substrato. No detalhe da Figura 75b verifica-se que a interface entre o concreto velho e o MR aplicado não apresenta falhas ou defeitos, mesmo após o período de vertimento na barragem e agressões do meio.



FIGURA 75 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 1, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO DE REFERÊNCIA SEM ADIÇÕES (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

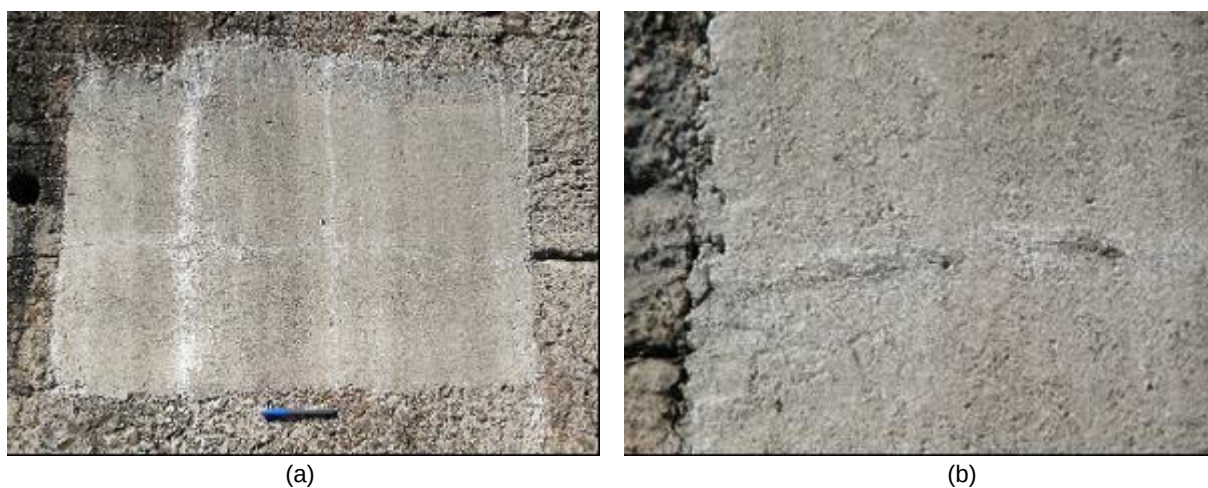


FIGURA 76 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 2, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRA COMERCIAL MULTIFILAMENTO DE PP (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

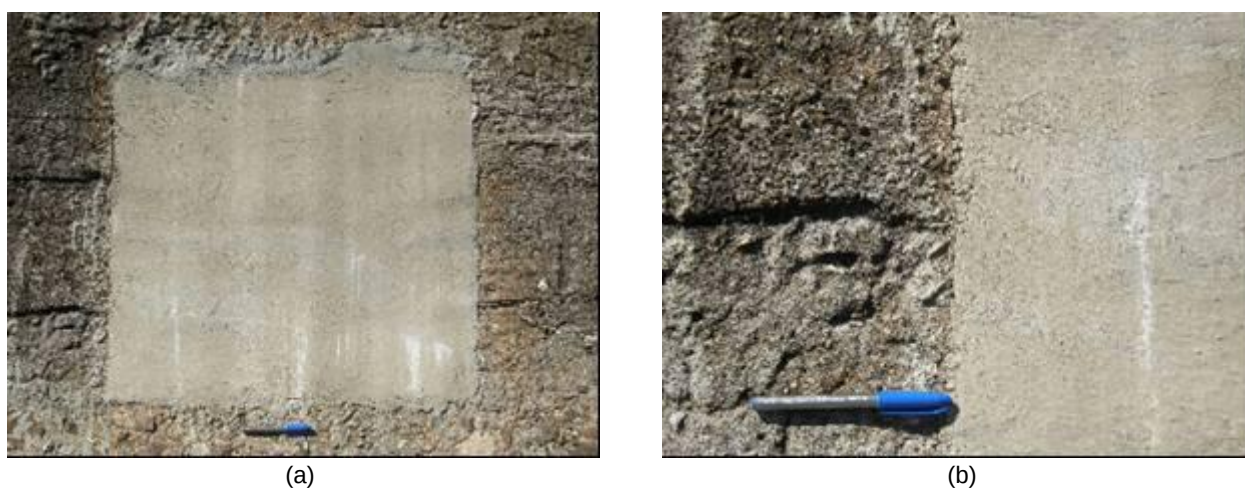


FIGURA 77 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 3, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PEBD 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).



FIGURA 78 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 4, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRA COMERCIAL CORRUGADA DE PET (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).



FIGURA 79 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 5, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).



FIGURA 80 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 6, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PNEU 5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

Verifica-se na Figura 80b que não existem efeitos de borda, entretanto a superfície do material de reparo apresenta uma pequena rugosidade. O acabamento de superfície liso não foi completamente obtido no momento da aplicação devido a um abatimento de cone de 25 mm, mesmo após a adição de 0,4% em relação ao peso de cimento de aditivo plastificante. Essa baixa consistência proporcionou menor trabalhabilidade do material dificultando o processo de alisamento da superfície. KHATIB E BAYOMY (1999) verificaram que existiu uma diminuição do slump com aumento do teor de borracha em percentagem do volume total de agregado.



FIGURA 81 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 7, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PEBD 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

Verifica-se que o ponto 7 proporcionou desempenho superior se comparado com os outros materiais de reparo. Neste ponto a superfície apresenta bom estado de acabamento, mais lisa e livre de imperfeições, mesmo depois da ocorrência de vertimento e agressões do meio. No ponto não foram visualmente observadas trincas ou fissuras.

As manchas claras identificadas na Figura 81a sobre a superfície do MR são provenientes do resíduo da ponte de aderência à base de resina epóxi aplicada em todos os pontos estudados. Neste caso houve um excesso de material no momento da aplicação da ponte, todavia essa particularidade não veio a influenciar o desempenho do MR aplicado no ponto de número 7.

As manifestações patológicas do substrato foram completamente contidas nesse ponto de aplicação do MR confeccionado em concreto com adição no teor de

2,5% de material PEBD aglutinado.



FIGURA 82 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 8, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

A Figura 82 ilustra o ponto de aplicação número 8, onde utilizou-se como material de reparo concreto com adição de PET moído ao teor de 2,5%. Verifica-se neste ponto a existência de manchas cinzentas na superfície do MR. Essas manchas são provenientes do uso de pasta de cimento aplicada para recompor fissuras de retração que surgiram imediatamente após a aplicação do MR. O fato do surgimento de fissuras deve-se a forte radiação solar e elevada temperatura ambiente (42,7 °C) no momento da aplicação. Destaca-se que na busca de evitar o surgimento de fissura deste tipo, sejam evitados trabalhos nos dias mais quentes e com forte radiação solar.

O ponto de aplicação de MR de número 9, confeccionado com a adição de 2,5% de pneu apresentou fissura longitudinal com formação de carbonatação, que são as manchas brancas na superfície deste material de reparo. Essa fissura segue, aproximadamente, a posição e direção da trinca existente no substrato, podendo ser esta a causadora do afloramento do defeito no MR aplicado neste ponto.

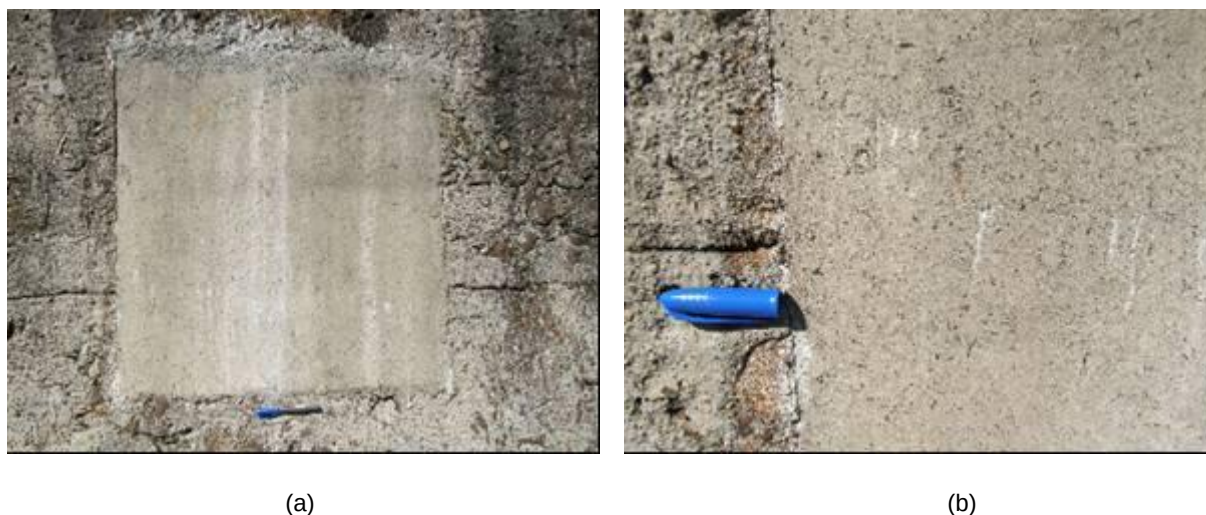


FIGURA 83 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 9, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PNEU 2,5% (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO, APRESENTAÇÃO DE FISSURA COM CARBONATAÇÃO (B).



FIGURA 84 – PONTO DE APLICAÇÃO Nº. 10, MATERIAL DE REPARO: CONCRETO COM ADIÇÃO DE MICROFIBRA DE PE E PET. (A). DETALHE DA BORDA DO MR E SUBSTRATO (B).

Todos os materiais de reparo estudados e aplicados no vertedouro da barragem da UHE Mourão, quando avaliados depois de dois anos de sua execução, atingiram seu objetivo principal de sanar os defeitos apresentados na superfície hidráulica. Entretanto aspectos gerais desta estrutura devem ser analisados com maior profundidade, com destaque para as grandes trincas que se estendem ao longo da barragem. Ninhos de concretagem também podem ser identificados a uma profundidade próxima da superfície jusante da barragem. Técnicas modernas como o uso do ultra-som podem ser útil na localização dos vazios no volume de concreto, principalmente, mais próximos a superfície ou a pequenas profundidades de até 1 m.

4.10. QUADRO RESUMO DO DESEMPENHO DOS MATERIAIS DE REPARO

Na Tabela 36 está apresentado o quadro resumo de desempenho dos materiais de reparo confeccionados com adição de materiais poliméricos reciclados.

TABELA 36 – RESUMO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REPARO.

Propriedade	Material		
	Fibra corrugada PET	Microfibra PE e PET	Fibra multifilamento PP
Comprimento (mm)	35	3	30
Diâmetro (mm)	0,75	0,018	1,0 (filamentos de 5 μm)
Densidade (g/cm^3)	0,90	0,85	0,70
Absorção (%)	3,7	4,1	2,5

5. CONCLUSÕES

Os materiais poliméricos adicionados ao concreto proporcionaram modificações nas propriedades do material. Tanto os plásticos provenientes da indústria de reciclagem como as fibras poliméricas comerciais e o elastômero foram indicados para o emprego na confecção de concreto com adição de polímeros. As características pretendidas em concreto destinado ao uso como material de reparo foram identificadas, principalmente, nos resíduos poliméricos reciclados quando foram verificadas suas propriedades quanto às resistências à compressão e à tração por compressão diametral, resistência à abrasão pelo método submerso e durabilidade avaliada pelo potencial de corrosão.

A adição de materiais poliméricos reduziu a resistência à compressão do concreto. Quanto maior foi o teor utilizado menor foi a resistência à compressão média. Esta redução foi identificada nos resíduos poliméricos quando adicionados ao concreto nos teores de 0,5 % a 7,5%. Considerando a resistência característica aos 28 dias do concreto com adição de PEBD no teor de 0,5% o valor foi de 38,3 MPa e no teor de 7,5% o valor foi de 25,3 MPa. Para o PET 0,5% esta resistência verificada foi de 37,7 MPa e no PET 7,5%, 29,0 MPa. No concreto com 0,5% de fibras de pneu a resistência à compressão foi de 35,7 MPa e 21,1 MPa para o concreto com 7,5% de adição de fibras de pneu.

Na resistência à tração por compressão diametral não se constatou relação direta entre o teor utilizado e a variação na resistência. O teor de 2,5% de adição de material polimérico reciclado apresentou as maiores resistências à tração por compressão diametral para o PNEU, PET e PEBD com os valores de 3,4 MPa, 3,7 MPa e 3,4 MPa, respectivamente.

Na relação de resistência à compressão/tração por compressão diametral, verificou-se existir uma significativa variação dos valores em função do tipo de material polimérico reciclado e do teor de adição aplicado. De uma forma geral, o maior teor de adição de fibras poliméricas recicladas (7,5%) apresentou a maior relação de resistência à compressão/tração por compressão diametral na ordem de 12%,

indicando que os materiais, resíduos poliméricos, melhoraram as propriedades de ordem dinâmica do concreto.

Avaliando-se a resistência à abrasão pelo método submerso, considerando a perda de massa, constatou-se que o CR, com perda de massa em 72 horas de 6,57%, obteve melhor desempenho quando comparado com os concretos com adição de resíduos poliméricos no teor de 2,5% que apresentaram perda de massa (72 h) de 8,41%, 8,07% e 7,46% para o pneu, PET e PEBD, respectivamente. Entretanto, no teor de 5% de resíduos poliméricos os concretos com adição de PET e PEBD apresentaram melhores resultados que o concreto sem adição, com perdas de massa (72 h) de 5,04% e 3,94%, respectivamente.

No banho por imersão em solução de Na_2SO_4 a 2,1% em peso, os corpos de prova analisados pela técnica de potencial de corrosão apresentaram um desempenho similar nas composições de 2,5 e 5,0% de adição ao concreto de fibras poliméricas recicladas, tendendo para valores de E_{corr} na faixa probabilidade incerta de corrosão, entre -200 e -350 mV. Pode-se atribuir à adição de materiais poliméricos ao concreto uma melhora na durabilidade do material conforme os parâmetros de análise de potencial de corrosão.

A imersão em água destilada mostrou-se eficiente como referência aos métodos de envelhecimento de imersão em NaCl a 3,4% e Na_2SO_4 . Notadamente, a imersão em água destilada manteve os corpos de prova num estado inócuo ao processo corrosivo com potenciais na faixa entre -0,2 V e -0,35 V.

Não foram encontradas dificuldades no processo de aplicação dos materiais de reparo no vertedouro da UHE Mourão. Todos os materiais estudados apresentaram facilidade no momento da aplicação.

O acompanhamento dos materiais de reparo em campo, após dois anos de sua aplicação, demonstrou que os materiais reciclados PEBD, o PET e o PNEU nos teores de 2,5 e 5,0%, além das fibras comerciais, podem ser utilizados como material de reparo da superfície degradada do vertedouro da UHE Mourão, em Campo Mourão – PR.

Considerando os parâmetros analisados: resistência à compressão,

resistência à tração por compressão diametral, resistência de aderência, resistência à abrasão pelo método submerso, envelhecimento em câmara úmida com SO_2 e banhos em solução de NaCl e Na_2SO_4 , potencial de corrosão, microscopia eletrônica de varredura, espectros de composição química elementar semiquantitativa e aplicação em campo, conclui-se que o PEDB no teor de 2,5%, em substituição ao agregado miúdo, foi o mais apropriado para o emprego como material de reparo na superfície degradada do vertedouro da UHE Mourão.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O período de avaliação em campo pode ser continuado, acompanhado-se a possibilidade de manifestações patológicas em algum ponto de aplicação dos materiais de reparo.

Os ensaios de envelhecimento acelerado podem ser prolongados indefinidamente até o ponto crítico de ruptura dos corpos de prova devido ao aumento de volume das barras de ferro oxidadas ou degradação do matriz de concreto pelos processos químicos de degradação.

Outros materiais reciclados poliméricos podem ser adicionados ao concreto formulando-se novos traços a serem aplicados nas mais variadas funções estruturais, fomentando a inclusão de diferentes resíduos sólidos no concreto.

Sugere-se uma ampla avaliação dos benefícios ambientais adquiridos com a inclusão de materiais poliméricos no concreto.

Julga-se importante realizar estudos da aplicação do concreto com adição de resíduos sólidos poliméricos para utilização em obras de interesse social, proporcionando-se benefícios econômicos e ao meio ambiente, além de um desejável desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M. Tipo de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: 42º Congresso Brasileiro de Concreto. **Anais...** Fortaleza: Ibracon, 2000.
- AIELLO, M. A.; LEUZZI, F. Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. **Waste Management**, In Press, Available online 5 March 2010.
- AL-MANASEER, A.A.; DALAL, T.R. Concrete containing plastic aggregates. **Concrete International**. v. 19, p. 47-52, 1997.
- AL-ZAHRANI, M. M.; MASLEHUDDIN; M, AL-DULAIJAN; S. U.; IBRAHIM, M. Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials. **Cement and Concrete Composites**. v. 25, p. 527-537, 2003.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Concrete Repair Manual**. Document nº: ACI 210.1R-94. Compendium of case histories on repair of erosion-damaged concrete in hydraulic structures. Farmington Hills, MI, USA, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39**. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C496**. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C779**. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876**. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. West Conshohocken, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1260**. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). West Conshohocken, USA, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G87**. Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests. West Conshohocken, USA, 2007.
- ANGULO, S. C; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H.; CINCOTTO, M. A. Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste Management**. v. 29, p. 721-730, 2009.
- ANIP. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Produção da Indústria Brasileira de Pneus em 2009**. Disponível em : <http://www.anip.com.br>. Acesso em: 1 de maio de 2010.
- ARAUJO, F. W. C. **Estudo da repassivação da armadura em concretos cabornatados através da técnica de recalcação química**. 2009. 237 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**. Agregados - Teor de argila em torrões. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8096**. Material metálico revestido e não-revestido - Corrosão por exposição ao dióxido de enxofre. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325). Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**. Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**. Agregado miúdo - Absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**. Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**. Agregado Miúdo - Impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado Graúdo - Absorção e massa específica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURES IN EUROPE (APME), 2004. Plastic recovery in perspective: plastics consumption and recovery in Western Europe. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/>. Acesso em: 12 de abril de 2010.

BAYASI, Z.; ZENG, J. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete. **ACI Materials Journal**. v. 90, p. 605–610, 1993.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**. v.27 , p. 1870 – 1876, 2007.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. Barking, United Kingdom: Elsevier. 1990.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, nº 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, nº 188, de 01 de outubro de 2009, Seção 1, p. 64-65.

CARDIA, R. J. R. Auditoria em segurança e controle de barragens. In: Vi Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. **Anais...** Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto**. 1. Ed. São Paulo: PINI, 1997.

CHOI, Yun-Wang, MOON, Dae-Joong, CHUNG, Jee-Seung, CHO, Sun-Kyu. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 776-781, 2005.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **Guide to Durable Concrete Structures** - Bulletin d'information 166. Lausanne, Switzerland, 1985.

CUSSON, D; MAILVAGANAM, N. Durability of repair materials: Overview of material and structural characteristics. **Concrete International**. v. 18, p. 34 - 38, 1996.

DÍAZ, B. NÓVOA, X.R., PÉREZ, M. C. Study of the chloride diffusion in mortar: a new method of determining diffusion coefficients based on impedance measurements. **Cement and Concrete Composites**. v. 28, p. 237-245, 2006.

B. ELSENER, B.; ANDRADE, C.; GULIKERS, J.; POLDER, R.; RAUPACH, M. Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. **Materials and Structures**. v. 36, p. 461 – 471, 2003.

EUROPEAN UNION. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. **Official Journal of the European Communities** L 182, 16/07/1999, p. 1 - 19

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. 68 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT / PCC / 260).

FREITAS, C.; GALVÃO, J.C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GOMES FILHO, C. V.; FERREIRA, E. S. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**. v. 32, p. 913-918, 2009.

GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BRAMBILLA, K. J. C. Desempenho de Concretos com Adição de Fibras Recicladas como Material de Reparo de Superfícies Hidráulicas: Estudos para a Recuperação do Vertedouro da UHE Mourão - 1º Etapa. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Salvador: Ibracon, 2008 a.

GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; LOBO, L. F. M. Concreto com Adição de Materiais Poliméricos Reciclados. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Salvador: Ibracon, 2008 b.

GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; MENDES, R.; JOUKOSKI, A.; ELIZEU SANTOS FERREIRA, E. S.; RODRIGUES, L. T. Proposta do Uso de Resíduos Poliméricos Reciclados como Adição em Concretos Destinados a Reparos em Superfícies Hidráulicas Degradadas: Estudo de Caso UHE Mourão. In: 5º Congresso Internacional sobre Patologias e Reabilitação de Estruturas. **Anais...** Curitiba: Ibracon, 2009 a.

GARCIA, C. M.; JOUKOSKI, C. M.; PORTELLA, K. F.; SANTI, M.R. A.; BORGES, A. C.; KORMANN, A. C. M.; SILVA, L. L. L.; SEARA, R. W.; CAMPANA, J. S.; SOARES, M. A.; HARDT, L. G. **Patologias de barragens de usinas hidroelétricas de pequeno porte: estudo, prospecção, avaliação e diagnóstico**. Curitiba: COPEL/LACTEC/ANEEL, Relatório Técnico, 2005.

GUERRA, I.; VIVAR, I.; LLAMAS, B.; JUAN, A.; MORAN, J. Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. **Waste Management**. v. 29, p. 643-646, 2009.

HANNANT, D. J.; HUGHES, D. C. Durability of cement sheets reinforced with layers of continuous network of fibrillated polypropylene film. **Anais...** In: Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete. Proceedings RILEM Symposium, Sheffield, 1986.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo, Pini, 1986.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado, em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. **Química Nova**. v. 29, p. 79-84, 2006.

HORSZCZARUK, E. The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures. **Wear**. v. 256, p. 787-796, 2004.

HORSZCZARUK, E. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. **Wear**. v. 259, p. 62-69, 2005.

HORSZCZARUK, E. Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete. **Wear**. v. 264, p. 113-118, 2008.

HORSZCZARUK, E. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete. **Wear**. v. 267, p. 110-115, 2009.

IRASSAR, E. F.; BONAVETTI, V. L.; GONZÁLEZ, M. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p.31-41, 2003.

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

JAMIL, H.E.; SHRIRI, A.; BOULIF, R.; MONTEMOR, M.F.; FERREIRA M.G.S. Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an amino alcohol based corrosion inhibitor. **Cement and Concrete Composites**. v. 27, p. 671-678, 2005.

JO, B; TAE, G; KIM, C. Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete. **Construction and Building Materials**. v. 21, p. 1552-1559, 2007.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm. Acesso em: 01 de abril de 2010.

JOUKOSKI, A. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos. de redes de distribuição de energia elétrica. destinadas a ambientes litorâneos**. Curitiba, 2003. 242 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

KHATIB, Z.K.; BAYOMY, F.M. Rubberized portland cement concrete. **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 11, p. 206–213, 1999.

KHALOO, A.; DEHESTANI, M.; RAHMATABADI, P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. **Waste Management**. v. 28, p. 2472–2482, 2008.

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

KORMANN, A.C.M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams. **Cerâmica**. v. 49, p. 48-54, 2003.

LATORRE, P. E. V., **Estudo de argamassas para reparos de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada**. Curitiba, 2002. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

LEONARDO, C. R. **Estudo de concreto de alto desempenho, visando aplicação em reparos estruturais**. Curitiba, 2002. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

LI, G; STUBBLEFIELD, M A.; GARRICK, G.; EGGERS, J.; ABADIE, C.; HUANG, B. Development of waste tire modified concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 34, p. 2283 – 2289, 2004.

MACEDO, D. B.; TUBINO, R. C.; CARVALHO, M. U.; NETO, M. F. F.; BORGES, C. R. Comportamento acústico de placas pré-moldadas em concreto com borracha de pneu. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Recife: Ibracon, 2005.

MARQUES, A. C.; NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L. Propriedades mecânicas do concreto adiconado com borracha de pneus. **Holos Environmet**. v. 6, n. 1, 2006, 32p.

MARZOUK, O.Y.; DHEILLY, R.M.; QUENEUDEC, M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. **Waste Management**. v. 27, p. 310 - 318, 2007.

MCKENZIE, S. G. Techniques for monitoring corrosio of steel in concrete. **Corrosion Prevention and Control**. v. 1, p. 11 - 17, 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOSCA, A. M. A.; LINTZ, R. C. C.; CARNIO, M. A. Influência da utilização da borracha vulcanizada nas propriedades mecânicas do concreto In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Recife: Ibracon, 2005.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

OCHI, T; OKUBO, S.; FUKUI, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. **Cement & Concrete Composites**. v. 29, p. 448-455, 2007.

PARANÁ, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Gerenciamento integrado de resíduos. **Kit resíduos**. Curitiba, 2003.

PERET, C. M.; SALOMÃO, R.; ZAMBON, A. M.; PANDOLFELLI, V. C. Reforço mecânico por fibras poliméricas e seus efeitos na secagem de concretos refratários. **Cerâmica**. v.49, p. 257-261, 2003.

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

PORTELLA, K. F.; ELIAS, M. M.; NOGUEIRA, J. R. G. **Inspeção da estrutura de concreto da barragem da usina hidroelétrica Mourão**. Curitiba: LACTEC 0554, Relatório Técnico, 2000.

PORTELLA, K. F.; SANTOS, R. P. dos; PEREIRA, P. N.; GARCIA, C. M.; CANTÃO, M. P.; SALES, A.; RIBEIRO, C. **Desenvolvimento de metodologia executiva e pesquisa de materiais para execução de reparos em estruturas de concreto (aparentes e submersas) de barragens**. Curitiba: LACTEC 3508, 2001. 176 p. Relatório Técnico (a).

PORTELLA, K. F. **Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de estruturas de concreto armado**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, 2001. 110 p. Relatório Técnico (b).

PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; FRANCK, R.; DERKSEN, R. Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado. **Cerâmica**. v. 52, p. 155-167, 2006.

PORTELLA, K. F., GALVÃO, J. C. A.; JOUKOSKI, A.; FERREIRA, E. S.; SANTI, M. R. A. Patologias em concreto tipo gravidade de barragem de usina hidroelétrica com 40 anos de vida útil: UHE Mourão. In: 4º Congresso Internacional sobre Patologias e Reabilitação de Estruturas. **Anais...** Aveiro, Portugal, 2008 (a).

PORTELLA, K. F. ; JOUKOSKI, A. ; CABUSSU, M. S.; INONE, P. C.; PEDREIRA, D. P; PIAZZA, F.; SILVA, G. C. da; LACERDA, L. A. de.; HENKE, S. L. Mapeamento ambiental para a determinação do grau de corrosividade e de degradação de materiais das redes aéreas de distribuição de energia elétrica com soluções corretivas. PROJETO DE PESQUISA COELBA, LACTEC e ANEEL, 20, 2008 (b).

POUPARD, O; AÏT-MOKHTAR, A.; DUMARGUE, P. Impedance spectroscopy in reinforced concrete: Experimental procedure for monitoring steel corrosion Part II Polarization effect. **Journal of Materials Science**. v. 38, p. 3521 - 3526, 2003

REBEIZ, K.S.; FOWLER, D.W.; PAUL, D. R. Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 5, p. 237 - 248, 1993.

REBEIZ, K. S. Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. **Cement & Concrete Composites**. v. 17, p. 119-124, 1995.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. In: 44º Congresso Brasileiro de Concreto. **Anais...** Belo Horizonte: Ibracon, 2002.

SÁNCHEZ, I.; NÓVOA, X.R.; VERA, G. DE; CLIMENT, M.A. Microstructural modifications in Portland cement concrete due to forced ionic migration tests. Study by impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 1015-1025, 2008.

SANTOS, E. F.; SILVA, G. M.; FEITOSA, J. P. A.; SOARES, J. B; LEITE, L. F. M. Caracterização de cimento asfáltico de petróleo brasileiro modificado por borracha de pneu moído de renovadoras. In: 7º Congresso Brasileiro de Polímeros. **Anais...** Belo Horizonte: Polímeros, 2003.

SARJA, A. Durability design of concrete structures - Committee report 130-CSL. **Materials and Structures**. V.33, p. 14 -20, 2000.

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

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview. **Waste Management**. v. 24, p. 563 – 569, 2004.

SILVA, J. Z. R.; HELENE, P. Argamassa de reparo. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, DT/PCC/292, 2001.

SILVA, M. R.; PINHEIRO, S. M. M. Biodeterioração do concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 2, cap. 28, p. 857-878.

SILVESTRE, T. **Brasil descarta 53% de garrafas PET na natureza**. <http://www.revistameioambiente.com.br/2007/11/15/brasil-descarta-53-de-garrafas-pet-na-natureza>. Acesso em: 11 de abril de 2010.

SMOAK W. G. **Guide to Concrete Repair**. Washington DC, USA:Reclamation Bureau, 1998.

SONG, H-W.; SARASWATHY, V. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. **International Journal of Electrochemical Science**. v. 2, p 1 – 28, 2007.

SOROUSHAN, P.; PLASENCIA, J.; RAVANBAKHSH, S. Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. **ACI Materials Journal**. v. 100, p. 203-207, 2003.

SUBRAMANIAN, P.M. Plastics recycling and waste management in the US Resource, **Conservation and Recycling**. v. 28, p. 253-263, 2000.

TAGORA, V. **Sem reciclagem, Brasil descarta 4,7 bi de garrafas PET na natureza**. <http://www.revistameioambiente.com.br/2008/03/17/sem-reciclagem-brasil-descarta-47-bi-de-garrafas-pet-na-natureza>. Acesso em: 11 de abril de 2010.

TAMBELLI, C.E.; SCHNEIDER, J.F.; HASPARYK, N.P.; MONTEIRO, P.J.M. Study of the structure of alkali–silica reaction gel by high-resolution NMR spectroscopy. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 352, p. 3429-3436, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford. 1997. 480 p.

THOMAZ, E. C. S. CRF - **Concreto Reforçado com Fibras Incorporadas**. Notas de aula, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 20002.

TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 18, p. 135 -139, 1996.

ZOOROB, S.E.; SUPARMA, L.B. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). **Cement & Concrete Composites**. v. 22, p. 233–242, 2000.