UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

DIEGO DAVID PINZÓN MORENO

Compósitos compatibilizados de argamassa e borracha de pneus

Lorena

2019

DIEGO DAVID PINZÓN MORENO

Compósitos compatibilizados de argamassa e borracha de pneus

Tese apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de Concentração de Materiais Convencionais e Avançados.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo Saron
Co-orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

Versão Corrigida

Lorena
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pinzon Moreno, Diego David

Compósitos compatibilizados de argamassa e
borracha de pneus / Diego David Pinzon Moreno;
orientador Clodoaldo Saron ; co-orientador
Sebastião Ribeiro - Versão Corrigida. - Lorena,
2019.
206 p.

Tese (Doutorado em Ciências - Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Materiais na Área de
Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2019

1. Compósito de argamassa. 2. Agregado de
borracha. 3. Pneus. 4. Resina termorrígida. 5.
Compatibilização. I. Título. II. Saron , Clodoaldo ,
orient. III. Ribeiro, Sebastião , co-orient.

À minha mãe Flor, às minhas irmãs Rocio e
Milena e ao meu pai Álvaro.

À Colômbia e ao Brasil, sempre irmãos!

AGRADECIMENTOS

Sempre agradecido à República Federativa do Brasil e ao povo Brasileiro por ter me dado estes anos de felicidade, por ter me dado tantas oportunidades, por ter me ensinado tanto, por ter me dado fe e por ter me permitido conhecer tantas pessoas maravilhosas.

Agradecido à República de Colombia pela beleza da vida e pelas minhas raízes.

Agradeço por este trabalho e por muitos outros motivos a: meu orientador Prof. Dr. Clodoaldo Saron, Prof. Dr. Sebastião Ribeiro, Prof. Dr. Fernando Vernilli, Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior, Prof. Dra. Katia Gandolpho, aos professores do Departamento de Materiais DEMAR, Universidade de São Paulo USP, Escola de Engenharia de Lorena EEL, Tavânia Cavasso, Bento Ferreira, e a todos os funcionários do DEMAR em especial aos funcionários da oficina.

À Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Especial agradecimento à cidade de Lorena SP.

À minha mãe Flor Alba Moreno, minhas irmãs, Rocio e Milena Pinzon, meu pai Álvaro Pinzon e toda minha família.

À Republica Hospício Do Santo Cavalo Doido: Luís Gustavo, Yury Carvalho Ferreira, Felipe Oliveira, Filipe Vieira Fernandes, Bruno Salerno, Luiz Fernando Briet, Bruno Pardal, Lucas Ramos, Davison Almeida.

À Republica Mercosul: Andrés Hernandez, Javier Muso, Guilherme Peres, Salvador Sánchez, Vinícius Andrade Pedreira, Itzcóatl Muñoz, Edith Mier.

Ao Grupo Moranguete pela companhia.

À meus amigos Denise Hirayama, Sara Carvalho de Sago, Vinicius Salgado, Robersio Marinho, Alexandre Dutra, Meri Gandara. À minha amiga Elizabeth Goes e sua família por seu apoio, a meus amigos da Colômbia: Andrés Corzo, Sergio Sarmiento, Jhonny Pinzon, Edison Camacho e Amparo Vargas (QEPD), Alejandra Coneo, Juliet Martinez, Maria Angelica Unda, Camilo Ráquira,

Especial agradecimento a Bruna Green e à família Green.

E meu especial agradecimento a Natalia Vargas e a sua mãe Dora Ramirez, sem elas muitas coisas deste processo não teriam sido possíveis.

Resumo

PINZON MORENO, D. **Compósitos compatibilizados de argamassa e borracha de pneus**. 2019. 206 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

Os resíduos de pneus inservíveis representam um problema ambiental por possuírem um elevado potencial poluidor quando descartados de maneira inadequada no meio ambiente ou queimados indiscriminadamente. Este problema é agravado se forem considerados a quantidade imensa de resíduos de pneus que é gerada a cada ano no planeta e o longo tempo de decomposição deste tipo material quando disposto no meio ambiente. A solução mais adequada para os resíduos de pneus inservíveis é ampliar a reutilização e a reciclagem, buscando alternativas que agreguem valor econômico ao resíduo e com menor impacto ambiental. Uma alternativa para a reciclagem de borracha de pneus é a preparação de compósitos de argamassa com agregado de borracha. Embora este tipo de material tenha grande potencial de uso em função do baixo custo de produção e da possibilidade de conferir novas propriedades às argamassas e concretos, a modificação de propriedades importantes das argamassas, devido à incompatibilidade dos componentes da argamassa com o agregado de borracha, tem sido uma barreira para o desenvolvimento e aplicação do material. Com base neste desafio, a presente tese teve como objetivo central estudar a compatibilização de compósitos de argamassa contendo quantidades variadas de agregado de borracha reciclada de pneus empregando resinas termorrígidas do tipo epoxídica, fenólica e poliéster insaturada como agentes de acoplamento da borracha com a matriz cimentícia. Diversos métodos de preparo e técnicas caracterização foram utilizados com o propósito de conhecer em detalhes as características e propriedades do sistema e o comportamento dos materiais em função da composição e do emprego dos diferentes agentes de acoplamento. Verificou-se que as resinas termorrígidas usadas como agentes de acoplamento promovem uma adesão eficiente entre a superfície das partículas de borracha e a argamassa, produzindo mudanças significativas nas propriedades do material quando comparadas aos dos compósitos não compatibilizados. Assim, o uso de resinas termorrígidas como compatibilizantes de argamassas com agregados de borracha reciclada apresenta-se como alternativa para melhorar propriedades específicas do material e proporcionar aplicações especiais com benefícios ambientais.

Palavras-chave: Compósito de argamassa. Agregado de borracha. Pneus. Resina termorrígida. Compatibilização. Reciclagem.

Abstract

PINZON MORENO, D. **Compatibilized composites of mortar and rubber tires**. 2019. 206 p. Thesis (Doctoral of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

Waste tires are an environmental problem because they have a high polluting potential when improperly discarded in the environment or burned indiscriminately. The most appropriate solution for wastes waste is to increase reuse and recycling, seeking alternatives that add economic value to the waste and with less environmental impact. An alternative to rubber tire recycling is the preparation of composite mortar with rubber aggregate. Although this type of material has great potential for use due to the low cost of production and the possibility of conferring new properties to mortars and concretes, the modification of important mortar properties due to the incompatibility of the mortar components with the rubber aggregate, has been a barrier to the development and application of the material. Based on this challenge, the main objective of this thesis was to study the compatibilization of mortar composites containing different amounts of recycled rubber tire aggregates, using thermoset resins of the epoxy, phenolic and unsaturated polyester as coupling agents for rubber with the cement matrix. Several methods of preparation and characterization techniques were used in order to know in detail the characteristics and properties of the system and the behavior of the materials in function of the composition and the use of the different coupling agents. It has been found that the thermosetting resins used as coupling agents promote an efficient adhesion between the surface of the rubber particles and the mortar, producing significant changes in the properties of the material when compared to the non-compatibilized composites. Therefore, the use of thermosetting resins as compatibilizers of mortars with recycled rubber aggregates presents as an alternative to improve specific properties of the material and to provide special applications with environmental benefits.

Key words: Composite of mortar. Rubber aggregate. Tire. Thermosettings resin. Comapatibilization. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes de um pneu radial típico	32
Figura 2 - Estrutura molecular da borracha natural poli(<i>cis</i> -1,4isopreno).....	34
Figura 3 - Impacto ambiental dos resíduos de pneu	37
Figura 4 - Passos básicos para ligação de adesivos ou processo de selamento	49
Figura 5 - Estrutura e propriedades da resina epóxidica.....	51
Figura 6 - Estrutura química da resina fenol-formaldeído.....	53
Figura 7 - Estrutura química da resina poliéster insaturada.....	53
Figura 8 - Principais etapas do projeto	66
Figura 9 - Molde para confecção de corpos de prova para testes de compressão	67
Figura 10 - Molde para confecção de corpos de prova para testes de flexão	67
Figura 11 - Métodos de compatibilização da borracha, resina e argamassa	71
Figura 12 - Fatores utilizados para a definição das condições de realização da etapa 5 de desenvolvimento experimental.	72
Figura 13 - Esquema representativo do volume de aditivo em função da área superficial do agregado de borracha	72
Figura 14 - Metodologia geral de adesão dos substratos	75
Figura 15 - Diagrama do tratamento térmico de cura da resina fenol-formaldeído.....	77
Figura 16 - A) Câmara úmida para a pré-cura e B) tanque de cura do material.....	79
Figura 17 - Retificação dos corpos de prova de compressão e flexão da etapa três	79
Figura 18 - Corpos durante o ensaio de compressão e flexão.....	80
Figura 19 - Caracterização das matérias-primas e do material processado	81
Figura 20 - Algoritmo da análise de imagem para determinar a segregação.....	83
Figura 21 - Fluxo de análise de segregação	84
Figura 22 - Sistema para a medição de massa aparente imersa	90
Figura 23 - Configuração empregada para obtenção dos módulos de elasticidade dinâmico flexional e torsional por excitação por impulso.....	92
Figura 24 - Micrografia obtida por MEV Cimento Portland CPIII Tipo 40.....	94
Figura 25 - Difratograma de raios X do cimento Portland CPIII Tipo 40.....	95
Figura 26 - Espectro de FTIR do cimento Portland CPIII 40	96
Figura 27 - Frações da areia peneirada segundo a norma ASTM C778.	97
Figura 28 - MEV da areia peneirada com granulometria menor de 150 µm	98

Figura 29 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 150 a 300 μm	98
Figura 30 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 425 a 300 μm	99
Figura 31 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 600 a 425 μm	99
Figura 32 - Teor de SiO_2 obtido por FRX da areia em função da granulometria	100
Figura 33 - Difratoograma de raios X da areia utilizada.....	101
Figura 34 - Espectro de FTIR da areia	102
Figura 35 - Perda de massa referente à umidade da areia a 120 °C	103
Figura 36 - Imagens das três faixas granulométricas do agregado de borracha peneirada.	104
Figura 37 - MEV da borracha com granulometria fina.....	105
Figura 38 - MEV da borracha com granulometria média	105
Figura 39 - MEV da borracha com granulometria grosseira	106
Figura 40 - Difratoograma de raios X do agregado de borracha	107
Figura 41 - Espectro de FTIR do agregado de borracha	108
Figura 42 - Análise térmica do agregado borracha	109
Figura 43 - Espectro de FTIR/ATR da resina epoxídica	110
Figura 44 - Termogramas de DTMA do agregado de borracha.....	111
Figura 45- Espectro de FTIR/ATR resina Fenol-formaldeído.....	112
Figura 46 - Espectro de FTIR/ATR resina poliéster insaturada.....	113
Figura 47 - Esquema ilustrativo de molhamento sobre superfície e forças vectoriais de contato derivadas das tensões interfaciais.....	116
Figura 48 - Esquema representativo de terminologia de molhamento.....	117
Figura 49 - Esquema empregado para a medição do ângulo theta θ	118
Figura 50 - Teste de molhabilidade entre água e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos	118
Figura 51 - Teste de molhabilidade entre a resina fenol formaldeído e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos.....	118
Figura 52 - Teste de molhabilidade entre a resina epóxidica e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos.....	119
Figura 53 - Teste de molhabilidade entre a resina poliéster insaturada e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos.....	119
Figura 54 - Molhabilidade entre os fluidos do compósito e a borracha.....	120

Figura 55 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina epóxica insaturada na superfície de borracha.....	122
Figura 56 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina fenol formaldeído na superfície de borracha	122
Figura 57 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina poliéster insaturada na superfície de borracha	123
Figura 58 - Divisão por quadrantes da superfície polida do corpo de prova cilíndrico.....	124
Figura 59 - Nível analisado com identificação do agregado de borracha.....	125
Figura 60 - Segregação da borracha no compósito com traço de 2.75: 1.00: 1.00: 0.475 de areia, cimento, água e borracha	126
Figura 61 - Segregação do agregado de borracha.....	127
Figura 62 - Curvas de tensão-deformação típicas de ensaios de compressão com diferentes granulometrias e diferentes tipos de carga de borracha sem compatibilizar	128
Figura 63 - Resistência à compressão (f_m') dos materiais com diferentes granulometrias e tipos de carga de borracha sem compatibilizar	129
Figura 64 - Deformação máxima à compressão com diferentes granulometria e tipos de carga de borracha sem compatibilizar	130
Figura 65- Curvas de tensão-deflexão típicas de ensaios com diferentes granulometria e tipos de carga de borracha	131
Figura 66 - Resistência à tração por flexão (S_f') dos compósitos não compatibilizados ..	132
Figura 67 - Deflexão máxima dos compósitos não compatibilizados	133
Figura 68 - Curvas tensão-deformação típicas de ensaios de compressão dos materiais com diferentes métodos de compatibilização	135
Figura 69 - Resistência à compressão (f_m') dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização	136
Figura 70 - Deformação máxima à compressão dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização	137
Figura 71 - Curvas tensão-deflexão típicas dos materiais com diferentes métodos de compatibilização	138
Figura 72 - Resistência à flexão (S_f') dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização	139
Figura 73 - Deflexão máxima dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização	139

Figura 74 - Curvas de tensão-deformação típicas de ensaios de compressão dos compósitos de argamassa compatibilizados	141
Figura 75 - Resistência à compressão (f_m') dos compósitos compatibilizados com diferentes teores de borracha.....	142
Figura 76 - Deformação máxima à compressão da argamassa compatibilizada.....	142
Figura 77 - Curvas tensão-deflexão típicas dos ensaios de flexão dos compósitos compatibilizados	143
Figura 78 - Resistência à flexão (S_f') dos compósitos compatibilizados	144
Figura 79 - Deformação máxima à flexão dos compósitos de argamassa compatibilizados	145
Figura 80 - Módulos de elasticidade obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar.....	146
Figura 81 - Módulos de elasticidade dos compósitos compatibilizados	148
Figura 82 - Espectros de frequências vs amplitude gerados pelo programa Sonelastic 3.0	149
Figura 83 - Fatores de perda (Tan de delta) dos compósitos sem compatibilizar.....	150
Figura 84 - Módulo de armazenamento (E') dos compósitos sem compatibilizar	151
Figura 85 - Fatores de perda (Tan de delta) dos compósitos compatibilizados.....	152
Figura 86 - Módulo de armazenamento (E') dos compósitos compatibilizados.....	153
Figura 87 - Micrografia obtida por MEV de argamassa sem agregado de borracha	154
Figura 88 - Micrografia obtida por MEV de argamassa com agregado de borracha com teor de 2% em massa de borracha	155
Figura 89 - Micrografia obtida por MEV de argamassa com agregado de borracha. Teor 10% em massa de borracha	156
Figura 90 - Micrografia MEV da falha da interface borracha-argamassa	156
Figura 91 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina epóxica.....	158
Figura 92 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina Fenol-formaldeído	160
Figura 93 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada	163
Figura 94 - Micrografia da região analisada por EDS do compósito de argamassa	165

Figura 95 - Espectro de microanálise de composição por EDS do compósito da argamassa	165
Figura 96 - Micrografia da região analisada por EDS do agregado de borracha no compósito.....	166
Figura 97 - Espectro de microanálise de composição por EDS do agregado de borracha no compósito.....	166
Figura 98 - Fotografia de amostras utilizadas para determinação da massa específica aparente.....	167
Figura 99 - Massa específica aparente dos compósitos de argamassa sem compatibilizar	168
Figura 100 - Volume de espaço de poros permeáveis dos compósitos sem compatibilizar	169
Figura 101 - Massa específica aparente dos compósitos de argamassa compatibilizados	170
Figura 102 - Volume de espaço de poros permeáveis de compósitos compatibilizados...	171
Figura 103 - Custos do material processado.	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais componentes do cimento Portland.....	44
Tabela 2 - Fases do cimento, composição típica e sua ação no material	45
Tabela 3 - Produção e consumo per-capita do cimento no Brasil nos últimos anos.....	46
Tabela 4 - Dimensões das peneiras utilizadas para classificação da granulometria de agregados, segundo norma técnica ASTM C136.....	47
Tabela 5 - Parâmetros de avaliação da segregação do material.....	68
Tabela 6 - Traço dos constituintes da argamassa.....	69
Tabela 7 - Nomenclatura dos diferentes compósitos sem compatibilizantes	69
Tabela 8 - Etapas de tratamento térmico para cura da resina fenol-formaldeído	76
Tabela 9 - Parâmetros empregados para a análise de DMTA para os materiais testados....	93
Tabela 10 - Análise química por FRX do Cimento Portland CPIII Tipo 40	95
Tabela 11 - Resumo das principais bandas características do cimento Portland CPIII obtido por FTIR	97
Tabela 12 - Faixas granulométricas da areia utilizada.....	97
Tabela 13 - Análise elementar da areia obtido por FRX	100
Tabela 14 - Resumo das principais bandas de FTIR características da areia	102
Tabela 15 - Análise físico-química da água potável utilizada no trabalho	103
Tabela 16 - Principais reações químicas causadas pela hidratação do cimento	104
Tabela 17 - Granulometrias do agregado de borracha	104
Tabela 18 - Análise elementar por FRX do material remanescente da calcinação da borracha	106
Tabela 19 - Resumo das principais bandas características de FTIR do agregado de borracha	108
Tabela 20 - Bandas de FTIR características da resina epóxidica.....	110
Tabela 21 - Bandas de FTIR características da resina fenol formaldeído	112
Tabela 22 Bandas de FTIR características da resina poliéster insaturada	114
Tabela 23 - Área superficial (BET) e porosidade das matérias-primas.....	115
Tabela 24 - Porcentagens mássicas dos aditivos compatibilizantes adicionados aos compósitos em função das quantidades de borracha empregadas	123
Tabela 25 - Análise elementar por EDS do compósito de argamassa	165
Tabela 26 - Análise elementar por EDS do agregado de borracha	166

Tabela 27 - Preços unitários empregados como base de cálculo dos custos gerais	172
Tabela 28 - Massa específica média e viscosidade média (μ) dos materiais empregados ..	188
Tabela 29 - Resistências à compressão (f_m') de ensaios de compressão com diferente granulometria e diferentes tipos de carga de borracha sem compatibilizar referentes à Figura 63	193
Tabela 30 - Resistências à tração por flexão (S_f') dos compósitos não compatibilizados referentes à Figura 66.....	194
Tabela 31 - Resistências à compressão dos compósitos compatibilizados com diferente teor de borracha referentes à Figura 75	195
Tabela 32 - Resistências à tração por flexão dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 78	196
Tabela 33 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(A)	197
Tabela 34 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(B)	198
Tabela 35 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(C)	199
Tabela 36 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(D)	200
Tabela 37 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(A).....	201
Tabela 38 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referente à Figura 81(B).....	202
Tabela 39 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(C)	203
Tabela 40 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(D).....	204

ABREVIACÕES E SIGLAS

f_m	Resistência à compressão
S_f	Resistência à Flexão
f_m'	Resistência meia à compressão
S_f'	Resistência meia à Flexão
FTIR	Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura.
MO	Microscopia Óptica.
TGA	Análise Termogravimétrica.
FDX	Fluorescência de raios X
DRX	Difração de raios X
ATR	Refletância total atenuada
NR	Borracha natural
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
DMTA	Análise termo-dinâmico mecânico
ASTM	American Society for Testing Materials
MAB	Molhabilidade dos aditivos na borracha
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
SM	Análise de segregação do material
EC	Ensaio de compressão
EF	Ensaio de flexão
MEQ	Módulos de Elasticidade quase estáticos
MED	Módulos de Elasticidade dinâmicos
BET	Método Brunauer-Emmett-Teller
MEA	Massa Específica Aparente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
Suasa	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
VC	Volume de aditivo
MAC	Carga Mássica agregada no compósito
δ	Espessura da camada do aditivo
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica
R	Número de Reynolds
R_q	Rugosidade quadrática media
MO	Microscopia ótica
ACM	Borrachas acrílicas
BR	Polibutadieno
CFM	Borrachas fluoradas (Viton®)
CR	Policloropreno (Neoprene®)

CSM	Polietilenos clorosulfonados (Hypalon®)
ECO	Borracha de epicloridrina
EPDM	Borracha de etileno-propileno-dieno
EPR	Borracha de etileno propileno
FMVQ	Borrachas de silicone fluoradas
GPO	Elastômeros de oxido de propeno
HNBR	Borracha nitrílica hidrogenada
IIR	Borracha butílica-poliisobutileno
BIIR	Borracha de bromobutilo
CIIR	Borracha de clorobutilo
IR	Poliisopreno
MVQ	Borracha de silicone
NBR	Borracha nítrica (acrilonitrila-butadieno)
NR	Borracha natural
PUR	Borracha de poliuretano
SBR	Borracha de estireno-butadieno
T	Polissulfetos (Thiokol®)
TPE	Borrachas termoplásticas

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Obrigatoriedade de tratamento de pneus para os fabricantes e importadores ...	30
Quadro 2 - Materiais típicos usados na fabricação de pneus	32
Quadro 3 - Tipos de borrachas usadas em diferentes partes do corpo do pneu	33
Quadro 4 - Principais tipos de borrachas comerciais	35
Quadro 5 - Composição geral do pneu comercial	35
Quadro 6 - Classificação de argamassas	42
Quadro 7 - Classificação segundo a morfologia das partículas	48
Quadro 8 - Vantagens e limitações dos resinas termorrígidas	50
Quadro 9 - Diferenças entre os módulos de elasticidade quase estático e dinâmico	58
Quadro 10 - Resumo das fases identificadas no cimento Portland CPIII Tipo 40.....	96
Quadro 11 - Identificação dos métodos de compatibilização	134
Quadro 12 - Métodos selecionados para a etapa 5.....	140
Quadro 13 - Clasificação tradicionais de cimentos.....	205
Quadro 14 - Clasificação europeia de cimentos bs8500-1:2006.....	205
Quadro 15 - Classificação dos agregados naturais segundo o tipo de rocha	206

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	PNEUS.....	31
2.2	BORRACHA	33
2.3	RECICLAGEM DE BORRACHA E DE SEUS PRODUTOS DERIVADOS	36
2.4	ARGAMASSA	40
2.5	CIMENTO PORTLAND.....	43
2.6	AGREGADOS.....	46
2.7	ADITIVOS PARA COMPATIBILIZAÇÃO DO CONCRETO-BORRACHA	49
2.7.1	Resinas Epoxídicas	51
2.7.2	Resinas Fenol-Formaldeído.....	52
2.7.3	Resinas Poliéster.....	53
2.8	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM REJEITOS DE BORRACHA DE PNEUS	54
2.8.1	Propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com agregado de borracha	55
2.8.2	Propriedades do concreto fresco com borracha	60
3	OBJETIVOS	63
3.1	OBJETIVO GERAL.....	63
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	63
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.1	MATERIAIS	64
4.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	65
4.2.1	Etapa 1	66
4.2.2	Etapa 2	67
4.2.3	Etapa 3	68
4.2.4	Etapa 4	70

4.2.5 Etapa 5.....	71
4.3 DETERMINAÇÃO DE QUANTIDADES DE ADITIVOS COMPATIBILIZANTES INCORPORADOS NA ARGAMASSA	72
4.3.1 Quantidade de aditivo compatibilizante	73
4.3.2 Camada limite.....	73
4.4 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS	74
4.4.1 Mecanismo de adesão dos substratos	75
4.4.2 Metodologia de cura dos aditivos.....	76
4.4.3 Preparação da argamassa sem compatibilizar	77
4.4.4 Preparação da argamassa compatibilizada	78
4.4.5 Método de moldagem e cura da argamassa.....	78
4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	80
4.5.1 Método de ângulo de contato (MAC).....	81
4.5.2 Segregação do material (SM)	82
4.5.3 Ensaio de compressão axial (ECA)	84
4.5.4 Ensaio de Flexão (EF)	85
4.5.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	85
4.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	85
4.5.7 Difratomia de raios X (DRX).....	86
4.5.8 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).....	86
4.5.9 Teoria de Adsorção Multimolecular (BET)	86
4.5.10 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)	87
4.5.11 Microscopia óptica (MO).....	87
4.5.12 Análise termogravimétrica (TGA)	87
4.5.13 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	87
4.5.14 Massa específica aparente (MEA)	88
4.5.15 Determinação dos módulos de elasticidades (ME)	90

4.5.15.1 Módulos de elasticidade quase estáticos (MEQ)	90
4.5.15.2 Módulo de elasticidade dinâmico (MED)	91
4.5.16 Análise termo-dinâmico mecânico (DMTA)	92
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA	94
5.2 MOLHABILIDADE.....	115
5.3 RECOBRIMENTO DAS PARTÍCULAS COM RESINAS	121
5.4 QUANTIDADE DE COMPATIBILIZANTE POR COMPOSIÇÃO.....	123
5.5 SEGREGAÇÃO DO MATERIAL.....	124
5.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR.	127
5.6.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	128
5.6.2 ENSAIO DE FLEXÃO	130
5.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS COM DIFERENTES MÉTODOS DE COMPATIBILIZAÇÃO	134
5.7.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	135
5.7.2 ENSAIO DE FLEXÃO	137
5.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS	140
5.8.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	140
5.8.2 ENSAIO DE FLEXÃO	143
5.9 MÓDULOS DE ELASTICIDADE	145
5.9.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR	145
5.9.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS	147
5.10 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA (DMTA).....	150
5.10.1 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR.....	150
5.10.2 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS.....	152
5.11 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	154

5.11.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR	154
5.11.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS	157
5.12	ANÁLISE ELEMENTAR POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)	164
5.13	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	167
6	ANÁLISE DE CUSTOS DE PRODUÇÃO	172
7	CONCLUSÕES	174
	REFERÊNCIAS	175
	APÊNDICE A - CERTIFICADO ENSAIO DE FRX MATERIAIS BASE	186
	APÊNDICE B - CERTIFICADO ENSAIO DE FRX DA AREIA	187
	APÊNDICE C - MASSA ESPECÍFICA E VISCOSIDADE DOS MATERIAIS EMPREGADOS A TEMPERATURA AMBIENTE	188
	APÊNDICE D - PLANO MOLDE DE COMPRESSÃO	189
	APÊNDICE E - PLANO MOLDE DE FLEXÃO	190
	APÊNDICE F - PLANO GERAL ESTRUTURA PARA OBTENÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE	191
	APÊNDICE G - GRAFICOS SONELASTIC COMPÓSITOS DE ARGAMASSA	192
	APÊNDICE H - SÍNTESE DE RESULTADOS MECÂNICOS RESISTÊNCIAS, MÓDULOS DE ELASTICIDADES E CONFIABILIDADE.	193
	ANEXO A - PRINCIPAIS TIPOS DE CIMENTOS E SUA CLASSIFICAÇÃO	205
	ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS SEGUNDO O TIPO DE ROCHA	206

1 INTRODUÇÃO

No mundo cerca de 1,7 bilhão de pneus são descartados em depósitos a céu aberto após o término de sua vida útil. Para o ano de 2030 espera-se que seja preciso reciclar 5 bilhões de pneus por ano. Por outro lado, o problema ambiental dos pneus depende de sua disposição nos ecossistemas; a primeira consequência é a geração de resíduos sólidos pela simples presença dos pneus em aterros legais ou ilegais, rios, ou mares; a segunda consequência é a disposição na atmosfera de gases tóxicos e poluentes devido à queima indiscriminada dos pneus; e a terceira consequência é a formação de óleo derivado do resíduo da combustão deste material que alcança a terra e, em alguns casos, diferentes tipos de águas superficiais ou subterrâneas (CHEN et al., 2007; RESENDE, 2004; WY SOCKY, 2014).

Além disso, o problema do descarte de pneus se torna crítico ao considerar o tempo de degradação e biodegradação da borracha, que segundo pesquisas é indeterminado, o que torna o resíduo de borracha um dos materiais altamente poluidor. Devido a sua produção elevada, este material acaba sendo descartado em aterros ou no mar, alterando negativamente todos os ecossistemas onde são depositados. Adicionalmente, o descarte inadequado deste resíduo contribui para o surgimento e aumento de doenças e pragas em regiões habitadas próximas aos aterros onde são depositados (NAIK; SINGH; ROBERT, 1994).

Diferentes pesquisas têm apresentado como intuito principal a reutilização e a reciclagem de borracha para minimizar os impactos ambientais gerados por este passivo ambiental. Reciclagem química, mecânica, térmica ou energética ou a simples reutilização para fins alternativos do material são alternativas frequentemente empregadas. Assim, os pneus já foram usados para outras aplicações, tais como para a fabricação de negro de fumo e recifes artificiais em ambientes marinhos (BOWEN; MARK, 1989). Entre estas alternativas de reciclagem de borracha existe a opção de reaproveitamento por meio da mistura com outros materiais para a geração de novos materiais compostos.

Algumas medidas para a regulação e controle dos resíduos de pneus já foram tomadas pela legislação Brasileira (CONAMA, 2009), exigindo para as empresas atuais com atividade econômica relacionada ao fornecimento, importação e fabricação de pneus, coletar e dar destinação final ambientalmente adequadas aos pneus inservíveis. No entanto, este mecanismo legislativo não é suficiente para dar solução ao problema gerado pela

produção dos resíduos de pneus, sendo imprescindível continuar na procura de mecanismos que contribuam para a reutilização e reciclagem da borracha.

No que diz respeito à utilização de materiais em grande escala, é também importante ressaltar que o concreto é o material mais produzido e comercializado no mundo. Estima-se que globalmente são consumidos 25 bilhões de toneladas métricas de concreto e produzido aproximadamente 4,2 bilhões de toneladas métricas de cimento anualmente (SCHNEIDER et al., 2011; WBCSD, 2012), constituindo também um grande potencial para o desenvolvimento de novos materiais ou de materiais tradicionais com modificações específicas para diminuir custos, melhorar propriedades e contribuir para a geração de materiais ambientalmente sustentáveis. As variações que podem ser feitas no concreto permitem múltiplas opções na área da construção e seu estudo é uma abrangente área de pesquisa ainda a ser explorada.

Dentre as diferentes linhas de pesquisas dos materiais cimentícios encontra-se o estudo dos agregados e dos aditivos que alteram as propriedades deste compósito. Usar borracha como agregado fino ou grosso em materiais de construção civil como argamassa e concreto tem sido uma estratégia usada como alternativa para a incorporação da borracha proveniente de pneus inservíveis que apresenta diferentes desafios, considerando que as interfaces do sistema concreto-borracha são incompatíveis e causam mudanças depreciativas de propriedades do material com relação ao concreto sem a presença de carga de borracha. Assim, a compatibilização do sistema borracha-concreto com diferentes métodos para melhorar a interface polímero-cerâmico se apresenta como uma alternativa que permite manter ou, em alguns casos, melhorar as propriedades do compósito.

O uso de diferentes cargas poliméricas em compósitos de argamassa ou concreto é uma opção pesquisada com anterioridade; as múltiplas variáveis e possíveis modificações deste tipo de compósito constituem-se em uma área de pesquisa com grande potencial de avanços científicos, considerando o pequeno número de trabalhos realizados sobre a interação de fases e sua respectiva compatibilização. Assim, a proposta principal deste trabalho é o estudo da compatibilização de borracha com argamassa por meio de resinas poliméricas, procurando proporções com teores de borracha em que as propriedades mecânicas da argamassa sejam modificadas de forma desejável para determinadas aplicações ou então, permaneçam com desempenho satisfatório para muitas aplicações tradicionais.

A adesão entre superfícies dos constituintes (polímero-cerâmica) é um dos desafios principais para o desenvolvimento de concreto-borracha. O uso de aditivos poliméricos como adesivos oferece amplas alternativas para a compatibilização de diferentes interfaces do concreto-borracha que por sua natureza química e seu tipo de processamento não apresentam ligações ou interações consideráveis entre elas. Diferentes resinas termorrígidas têm sido utilizadas para uso na construção civil e que demonstram compatibilidade com a argamassa. Desta forma, havendo interação das resinas termorrígidas com as superfícies dos componentes cerâmicos (areia e cimento) e da borracha, naturalmente poderá haver uma compatibilização do sistema com mudanças favoráveis de propriedades, sobretudo de propriedades mecânicas. Estes aditivos poliméricos, usados como adesivos na engenharia civil, frequentemente são à base de resinas epóxi, resina fenol-formaldeído e resina poliéster insaturada que são materiais relativamente baratos e de fácil manipulação industrial.

O uso de resinas é ideal para melhorar a compatibilidade e, portanto, o comportamento de diversos compósitos. Estas resinas, empregadas como adesivos, geram uma ligação química que aumenta a força de interação entre as diferentes fases. Espera-se que no caso da argamassa com carga de borracha, a resina contribua para melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Assim, o mecanismo de compatibilização e o método de mistura que se emprega para adicionar as resinas no compósito deverá possibilitar a integração de todos os elementos do compósito.

Na presente tese é feito um estudo de caracterização de matérias-primas dos compósitos desenvolvidos, processamento e caracterização de materiais compósitos de argamassa com diferentes adições de agregado de borracha não compatibilizados e compatibilizados com a presença de três tipos de resinas termofixas que foram efetuadas com diferentes mecanismos de compatibilização; além disso, foi realizado um estudo de segregação dos materiais com o intuito de desenvolver um grupo de materiais adequados para a aplicação na indústria.

Considerando dados da literatura foi verificado que os compósitos de argamassa/concreto com agregado de borracha possuem diversas características que depreciam as propriedades gerais do compósito cimentício (AZIZ et al., 2017; JEAN; GLEIZE, 2012; KAEWUNRUEN et al., 2018; MOHAMMED; ADAMU; SHAFIQ, 2017; YOUSSEF et al., 2014; YOUSSEF; ELGAWADY, 2013). Assim, o agregado de borracha atua como uma carga e não como um reforço na argamassa, convertendo este material em um agregado que não acrescenta qualidades positivas nas propriedades gerais no

compósito cimentício, resultando em um dos principais agentes causadores das falhas no material. Desta forma, é importante modificar o contorno de contato do agregado de borracha, de modo que sua superfície interaja com as diferentes fases da argamassa, obtendo interações que permitam funcionalizar o agregado de borracha, convertendo-o em reforço.

Para modificar a superfície do agregado de borracha com aditivos compatibilizantes poliméricos é fundamental conhecer a área superficial do agregado de borracha e a camada limite que pode ser obtida com as resinas sobre a superfície da borracha. Esta área superficial junto com a espessura da camada que recobrirá o agregado de borracha permite determinar o conteúdo volumétrico de aditivo compatibilizante polimérico a ser colocado na interfase entre o polímero e matriz cerâmica do compósito de argamassa.

Os custos dos materiais desenvolvidos apresentam um balanço econômico interessante, considerando a utilização de rejeitos processados, substituindo uma fração do material original; isto pode inferir que os custos finais do material não têm um impacto significativo em relação aos custos originais e às propriedades obtidas para sua aplicação. Finalmente, o desenvolvimento deste trabalho contribuirá com os esforços que têm sido feitos para a redução de um passivo ambiental de alta produção internacional e de difícil tratamento pós-consumo e proporcionará opções para desenvolver construções civis sustentáveis e economicamente viáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O principal problema ambiental relacionado ao pneu é o descarte inadequado (JATMA, 2015; RESENDE, 2004). Estima-se que no ano de 2019 o mercado de pneus alcance um crescimento de 4,1%, representando 3,0 bilhões de unidades de pneus na demanda mundial (FREEDONIA, 2015). Considerando que no ano de 2005 a mesma produção foi de aproximadamente de 1,32 bilhões de unidades (JATMA, 2015), pode-se observar que o crescimento deste mercado teve um crescimento porcentual maior que 250% em 10 anos. Este consumo de pneus não se alinha com a destinação adequada dos resíduos finais dos pneus; uma mínima parcela dos resíduos de pneus é tratada adequadamente, sendo que no ano de 2005 somente em torno um bilhão de unidades no mundo tiveram uma destinação adequada (JATMA, 2015).

No Brasil, de cada 100 pneus comercializados, 55 são empregados pelos mesmos donos para outro uso; dos outros 45, 67% é utilizado como fonte energética para a produção de clínquer na fabricação de cimento. Os outros 33% são destinados para a reciclagem, dando origem a produtos como pisos de quadras esportivas, grama sintética, tapetes de automóveis e solas de sapato. No ano 2015 no Brasil foram comercializados 71,9 milhões de pneus e 45,7 foram descartados. Em países como os Estados Unidos, 60% dos pneus são empregados para a geração de energia nos setores de cimento, papel e setor elétrico. O país mais desenvolvido na reciclagem de pneus é Japão com 91% de reaproveitamento; este passivo ambiental é usado em geração de energia, construção civil e reutilização na recauchutagem de pneus (SILVEIRA, 2017). Do mesmo modo, o Brasil apóia projetos de reciclagem de pneus por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), como é o caso da geração de novos materiais. Como exemplo, tem-se a produção de um compósito de polipropileno e pó de borracha, obtido de pneus triturados, para ser utilizado no encapsulamento de motores de automóveis, minimizando o ruído e na produção de compósitos de concreto e borracha. (SILVEIRA, 2017).

Os pneus não tratados terminam normalmente em aterros clandestinos ou em ambientes não adequados para este tipo de rejeito. A deposição de pneus em aterros representa riscos ambientais consideráveis devido à diminuição de espaços de preservação ambiental e à exposição livre de resíduos tóxicos solúveis derivados dos pneus que são prejudiciais para diferentes tipos de vida (DAY et al., 1993). Adicionalmente, sempre existe o risco da queima dos pneus, que pode acontecer por motivos acidentais ou

criminosos, gerando fumaça altamente tóxica que prejudica a qualidade do ar. A combustão dos pneus também pode gerar óleos que acabam por contaminar o solo e as águas (CHEN et al., 2007). O problema se agrava ao considerar que o tempo de degradação natural deste material é indeterminado (GONÇALVES; PINHEIRO, 2016).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) no ano de 2009 estabeleceu a resolução N°416, em vigência atual. Nesta resolução é estabelecida a responsabilidade do fabricante ou importador na totalidade da vida dos pneumáticos, isto quer dizer na coleta, transporte, disposição final e gerenciamento adequado do produto, sendo obrigação desde o ano 2002 a coleta e destinação final dos pneus usados. Por outro lado, os distribuidores, revendedores, reformadores e consumidores finais são também responsáveis pela coleta dos pneus servíveis e inservíveis; no entanto, o cumprimento desta obrigatoriedade depende da supervisão dos entes de controle, o que nem sempre ocorre de forma sistemática. A responsabilidade legal de reciclagem foi determinada de forma cronológica, conforme apresentado no Quadro 1 (CONAMA, 2009):

Quadro 1 - Obrigatoriedade de tratamento de pneus para os fabricantes e importadores

RELAÇÃO DE OBRIGATORIEDADE DOS FABRICANTES E IMPORTADORES		
Ano	Número de pneus inseridos no mercado	Número de pneus a serem reciclados
2002	4 (novos ou reformados)	1 inservível
2003	2 (novos ou reformados)	1 inservível
2004	1 novo	1 inservível
2005	4 (produzidos ou importados novos)	5 usados
	3 (importados reformados)	4 usados
2006 até o presente	4 (produzidos ou importados novos)	5 usados

Fonte: Adaptado de CONAMA (2009).

A lei nº 12.305, do 2 de agosto de 2010, (BRASIL, 2010), define reciclagem como o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA). A mesma lei define a reutilização como processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-

química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes e reguladores. Observa-se que a principal diferença entre os dois conceitos é a alteração do material no caso da reciclagem e o reaproveitamento do material no caso da reutilização.

A legislação de diversos países, incluindo a do Brasil, estabelece obrigações para o tratamento de reciclagem para todas as entidades que têm relação direta ou indireta com os pneus. Por conseguinte, é importante naturalmente estabelecer incentivos às instituições de pesquisa, permitindo aumentar o conhecimento acumulado sobre a reciclagem deste material altamente poluente; isto se torna uma prioridade ao considerar que alternativas de incineração, que aumentam a degradação ambiental, são empregadas como um método de reciclagem. O aproveitamento deste material poderia permitir um equilíbrio em diferentes âmbitos (econômico, tecnológico, ambiental, social, etc.), integrando soluções para diversos problemas atuais. Tecnicamente o desenvolvimento de métodos de reciclagem e reutilização permitirá acrescentar ao conhecimento, a compatibilização de dois tipos de materiais, o concreto e a borracha, que por suas características imiscíveis são antagônicos, proporcionando novos enfoques no desenvolvimento científico.

2.1 PNEUS

O pneu é um composto de vários elastômeros e fibras de diferentes tipos que podem ser de aço ou outro tipo de polímero como as poliamidas (náilon). Os pneus normalmente são constituídos por cordões ou tecidos estendidos transversalmente até seus rebordos (SIDDIQUE; NAIK, 2004). A função principal dos pneus é oferecer uma interface entre o veículo e a estrada com o intuito de absorber cargas, impactos ou irregularidades que podem se apresentar durante o deslocamento do veículo (GENT; WALTER, 2006). O pneumático de um veículo permite suportar diferentes tipos de cargas, assegurar a transmissão da potência automotriz, permite a dirigibilidade, resposta aos eventos de aceleração (freadas e aumento de velocidade) e proporciona, junto com a suspensão do veículo, um movimento mais suave e confortável para os ocupantes (RESENDE, 2004). A borracha dos pneus apresenta em sua formulação diversos ingredientes, sendo os principais os polímeros elastômeros como a borracha natural e a borracha de estireno-butadieno (SBR), cargas de reforço como o negro de fumo e a sílica, auxiliares de processo como plastificantes e lubrificantes, aditivos estabilizantes e agentes de cura como o enxofre e peróxidos.

O pneu consiste basicamente em um canal fechado em suas pontas em forma de toróide com seu interior aberto devido ao aro de aço que o suporta, sendo confeccionado em várias seções de diferentes materiais que proporcionam rigidez e resistência estrutural à peça. No Quadro 2 é apresentada a formulação básica para a fabricação de pneus comuns; porém, muitos outros ingredientes também são normalmente empregados. A conformação estrutural típica do pneu radial tradicional é ilustrada na Figura 1, em que se observa múltiplas camadas, partes e reforços indispensáveis para suportar os requerimentos que são demandados para o uso veicular.

Quadro 2 - Materiais típicos usados na fabricação de pneus

MATERIAIS CONSTITUTIVOS DOS PNEUS	
1	Borrachas sintéticas.
2	Borracha natural.
3	Enxofre e compostos de enxofre.
4	Resina fenólica.
5	Óleos: 1) Aromático. 2) Naftênico. 3) Parafínico.
6	Tecidos: 1) Poliéster. 2) Nylon.
7	Graxas e ceras de petróleo.
8	Pigmentos: 1) Óxido de zinco 2) Dióxido de Titânio.
9	Negro de fumo.
10	Ácidos graxos.
11	Fios de aço ou tecidos de aço
12	Outros Materiais.

Fonte: Adaptado de Siddique e Naik (2004).

Figura 1 - Partes de um pneu radial típico

Fonte: Adaptado de Gent e Walter (2006).

As partes do pneu possuem uma subclassificação importante que é constituída por diferentes tipos de borracha que varia dependendo dos requerimentos de cada parte do pneu (Quadro 3).

Quadro 3 - Tipos de borrachas usadas em diferentes partes do corpo do pneu

TIPO DE BORRACHAS USADAS NO PNEU	
PARTE DO PNEU	SIGLA DA BORRACHA
Base (Banda de rodagem)	NR, BR, SBR
Capa	NR, IR, BR
Subcapa	NR, IR, BR
Calandragem de telas diversas	NR, BR, SBR
Calandragem de telas de aço	NR, BR, SBR
Parede lateral	NR, BR, SBR, CR, EPDM
Forro interior	CIIR, BIIR
Cunha, enchimento do talão ou apex	NR, SBR
Revestimento dos arames do talão	NR

Fonte: Adaptado de Caetano (2014).

2.2 BORRACHA

A borracha natural é um polímero que contém predominantemente o poli(*cis*-1,4 isopreno) (Figura 2) e em menor proporção proteínas, carboidratos, lipídios e diversos minerais (PINTO, 2012). A borracha apresenta propriedades únicas, devido a sua estrutura complexa e alta massa molar, tais como alta resiliência, eficiência na dispersão do calor, maleabilidade a baixas temperaturas, entre outras propriedades (CATALDO, 2000). Porém, as borrachas sintéticas, como os copolímeros de butadieno-estireno ou de acrilonitrila-butadieno, são comercialmente produzidos em níveis similares que a borracha natural, sendo que nenhum destes materiais apresenta desempenho de propriedades similar ao da borracha natural.

As propriedades únicas da borracha natural fazem dela essencial e insubstituível para muitas aplicações específicas como pneus de veículos, tratores, ônibus, aviões e produtos para aplicações médicas (CORNISH, 2001). A matéria-prima para a fabricação da borracha natural, o látex, é obtida de plantas que crescem em regiões tropicais. A espécie *Hevea brasiliensis* é a planta mais importante comercialmente para a obtenção do látex, responsável por 99% da produção mundial (RIPPEL; BRAGANÇA, 2009), sendo originária do Brasil, mas na atualidade é cultivada principalmente no sudeste Asiático (EGE, 1998).

Figura 2 - Estrutura molecular da borracha natural poli(*cis*-1,4isopreno)

Fonte: Adaptado de Dall (2003)

Apesar de ter sido um material inovador e muito útil, com o passar dos anos percebeu-se que existiam problemas que dificultavam o uso da borracha natural em muitas aplicações, por exemplo, ela se tornava mole e pegajosa quando submetida ao calor. Em tempo frio tornava-se dura, rígida e até mesmo inflexível. Além disso, artefatos produzidos com a borracha natural exalavam odores desagradáveis em períodos curtos de tempo (SHREVE; BRINK, 1977). Por volta de 1800, cerca de 300 anos depois da descoberta europeia, este material ganhou ampla aceitação e ampliou-se o conjunto de aplicações possíveis, com a descoberta do processo de vulcanização. Nesse processo a borracha reage com enxofre, formando uma série de ligações cruzadas na cadeia polimérica. A descoberta é atribuída a Charles Goodyear, nos Estados Unidos, e a Tomas Hancock, na Inglaterra, ambos desenvolveram patentes em 1840 (SHREVE; BRINK, 1977). A estrutura em rede molecular tridimensional da borracha vulcanizada permite a manutenção da forma dos artefatos moldados e confere melhor desempenho das propriedades elásticas do material. Entretanto, a vulcanização impede a remoldagem da borracha por processos termomecânicos convencionais, dificultando a sua reciclagem mecânica.

Por outro lado, em 1907 na Alemanha, após muitos anos de experimentos, Fritz Hoffmann desenvolveu o poliisopreno sintético, primeira borracha sintética. Porém, esta borracha não apresentava boas propriedades de aplicação, devido ao comportamento quebradiço do material quando em contato com o oxigênio do ar. Foi então que em 1933 a borracha sintética com boas características para aplicação foi produzida, recebendo o nome de Buna-S e em 1936 esta foi produzida industrialmente pelo governo alemão (ALMQVIST, 2003). Na atualidade existem mais de 500 tipos diferentes de borrachas sintéticas. Os mercados mundiais de elastômeros são dominados por dois tipos de borracha, a natural e o SBR (copolímero de estireno e butadieno), que compartilham de 70 a 75% do mercado mundial. As borrachas sintéticas podem ser classificadas em cerca de 20 grupos diferentes (Quadro 4) (BRYDSON, 1988).

Quadro 4 - Principais tipos de borrachas comerciais

SIGLA	NOME
ACM	Borrachas acrílicas
* BR	Polibutadieno
CFM	Borrachas fluoradas (Viton ®)
* CR	Policloropreno (Neoprene ®)
CSM	Polietilenos clorosulfonados (Hypalon ®)
ECO	Borracha de epicloridrina
* EPDM	Borracha de etileno-propileno-dieno
EPR	Borracha de etileno propileno
FMVQ	Borrachas de silicone fluoradas
GPO	Elastômeros de oxido de propeno
HNBR	Borracha nitrílica hidrogenada
IIR	Borracha butílica-poliisobutileno
* BIIR	Borracha de bromobutilo
* CIIR	Borracha de clorobutilo
* IR	Poliisopreno
MVQ	Borracha de silicone
NBR	Borracha nitrílica (acrilonitrila-butadieno)
* NR	Borracha natural
PUR	Borracha de poliuretano
* SBR	Borracha de estireno-butadieno
T	Polissulfetos (Thiokol ®)
TPE	Borrachas termoplásticas

Fonte: Adaptado de Brydson (1988); Caetano (2014).

Nota: *Principais borrachas utilizadas para a fabricação de pneus

No Quadro 5 são apresentados os teores dos componentes principais de pneus de automóveis e de carga (ADHIKARI; MAITI, 2000).

Quadro 5 - Composição geral do pneu comercial

TEORES DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DE PNEUS		
Materiais	Pneu de automóvel (%)	Pneu de Carga (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo (Carbono)	28	28
Aço	14-15	14-15
Tecido, aceleradores, Antiozônio, óleos etc.	16-17	16-17
Peso total	O peso médio do pneu novo é 8,5 kg. No Brasil, o pneu inservível pesa 5 kg, conforme a instrução normativa nº 8 do IBAMA, de 15 de maio de 2002	No Brasil, o pneu inservível pesa 40 kg, conforme a instrução normativa nº 8 do IBAMA de 15 de maio de 2002.

Fonte: Adaptado de Siddique e Naik (2004).

2.3 RECICLAGEM DE BORRACHA E DE SEUS PRODUTOS DERIVADOS

O desenvolvimento de produtos de borracha que envolve processos de vulcanização gera um material com uma estrutura química em forma de rede amorfa reticulada que dificulta a reciclagem direta do material. Este problema de reciclagem fez com que os produtos feitos com este material junto com processos de vulcanização com enxofre virassem um problema ambiental tão sério que de fato o descobridor do material, atualmente a companhia Goodyear, fosse o primeiro interessado a desenvolver tecnologias para a reciclagem destes produtos.

Entre os principais motivos para o baixo uso industrial de borracha reciclada estão os altos requisitos de qualidade para os artigos de borracha, a substituição de borracha crua por outros polímeros, alto custo dos processos da borracha recuperada, o alto custo da mão-de-obra especializada para a obtenção de material de qualidade e de valor (GENT; WALTER, 2006).

O estudo da reciclagem e reutilização da borracha de pneu é importante para minimizar problemas ambientais, proporcionando nova vida útil a um dos materiais mais produzidos e poluentes do mundo, representando uma alternativa para preservar os recursos e a qualidade de vida atual no mundo para as futuras gerações e uma necessidade em um mundo globalizado altamente dependente deste produto (TORGAL, 2010).

Vários países utilizam a borracha de pneus para o desenvolvimento de vias veiculares. Porém, este uso representa uma pequena parte do uso dos rejeitos existentes (VIEIRA et al., 2010). Diferentes alternativas surgiram, como é o caso da utilização de pneus para formação de recifes artificiais, mas com recentes pesquisas que indicam a pouca viabilidade ambiental de reutilização deste produto (HARTWELL et al., 1998).

Outro fim para os resíduos de pneus é a utilização para a geração energética em fornos de produção de cimento (SIDDIQUE; NAIK, 2004). O resíduo gerado da incineração dos pneus é comercializado como um subproduto chamado de negro de fumo. A Figura 3 esquematiza o problema ambiental derivado dos pneus, mostrando os riscos, o tipo de contaminação e o possível ambiente afetado pelo tratamento inadequado deste rejeito (TORGAL, 2010).

Figura 3 - Impacto ambiental dos resíduos de pneu

Fonte: Adaptado de Torgal (2010).

O pneu como resíduo é processado para seus diferentes usos como material com formas distintas. Entre as formas mais comuns estão o pneu inteiro, como fendas ou cordões de borracha, pneu picado ou triturado ou como borracha moída com diferentes tipos de granulometria (SIDDIQUE; NAIK, 2004). Outro processo importante em termos de reciclagem dos pneus é a recauchutagem. Este processo consiste na reconstrução dos pneus com a reforma e adição de borracha nova na parte exterior do pneu gasto e liso, reaproveitando sua estrutura resistente interna. Este processo permite economizar energia e matéria-prima. Para efeito de comparação, na fabricação de um pneu de caminhão novo são utilizados em média 86 litros de petróleo como matéria-prima; no entanto, para recauchutar um pneu equivalente são necessários 26 litros de petróleo. Assim, o preço de um pneu recauchutado pode ser de 30 a 50 % menor.

Outro processo de reciclagem de borracha é por meio da desvulcanização, empregando métodos mecânicos, térmicos e químicos, em que o material pode ser reprocessado e vulcanizado novamente. Este processo pode ser feito a seco com a aplicação de vapor a alta pressão e agitação mecânica, utilizando borracha moída com granulometria fina, ou via úmida, com o uso de soda cáustica. Também são utilizados métodos termomecânicos, em que a borracha com granulometria fina (máximo de 30 mesh) é submetido a intenso esforço mecânico a alta temperatura e em presença de agentes químicos, tais como dissulfeto de dialila e outros compostos contendo enxofre, que favorecem o processo de desvulcanização (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Uma técnica de reciclagem química de borracha foi desenvolvida pela empresa STI-K América para a desvulcanização de rejeitos de elastômeros e consiste na mistura mecânica de borracha particulada (40 mesh) com um material criado e patenteado por esta empresa com o nome de reagente “Delink”. Outro mecanismo de recuperação da borracha foi desenvolvida na Índia, utilizando produtos vegetais. Estes produtos vegetais tem o dissulfureto de dialila como composto ativo, mas pode ter outros constituintes com dissulfureto, monossulfides, polissulfetos e compostos tiol (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

A borracha natural vulcanizada pode ser completamente desvulcanizada na faixa de temperatura de 200 a 225°C com o reagente químico difenildissulfureto. Outros agentes químicos como dissulfetos, 2-butanol, bem como tolueno, nafta, benzeno e ciclohexano na presença de sódio também têm sido empregados para a desvulcanização da borracha natural (NR) e da borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM). O metal alcalino sódio auxilia na clivagem das reticulações mono-, di- e polissulfídicas das partículas da borracha. Este fenômeno acontece próximo a 300°C e em ausência de oxigênio. Este processo pode ser pouco econômico por requerer a utilização de solvente orgânico; neste caso o sódio metálico reage com as reticulações sulfídicas da borracha, tendo como desvantagens a geração de poluentes e ser perigoso (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Outros processos de desvulcanização empregam agentes químicos que reagem com as ligações C-S e S-S da rede estrutural da borracha. No entanto, estes processos precisam muito tempo de reação e apresentam problemas quanto à remoção dos solventes utilizados. Adicionalmente muitos processos com uso de agentes químicos geram lamas como resíduo, precisando de outros processos ou tratamentos de purificação para a reutilização, de modo que não se apresente como outro problema ambiental. Muitos dos processos químicos de desvulcanização apresentam maiores rendimentos em função da área superficial da borracha, mostrando que ao diminuir a granulometria das partículas, os agentes químicos reagem mais facilmente com uma maior quantidade de material (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

De fato, a granulometria e a área superficial do material são determinantes para a maioria dos processos de recuperação de borracha. Atualmente a redução do tamanho de partículas da borracha é feita por meio de moagem a temperatura ambiente, moagem criogênica e moagem em ambiente úmido. Porém, para chegar à granulometria finas, praticamente na forma de pó, outros métodos como o uso de extrusora que submetem o

material a tensões de compressões e cisalhamentos também são usados, atingindo tamanhos de partículas na faixa de 40 a 1700 μm . A maior desvantagem deste método é a degradação térmica do material gerada por causa do aquecimento por atrito durante a extrusão; adicionalmente pode-se ainda gerar oxidação das superfícies e aglomerações entre partículas (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Métodos alternativos de desvulcanização de borracha foram utilizados, como por exemplo, o método de microondas e método ultrassônico. O método que emprega microondas foi proposto por Goodyear Tire e Rubber Company e consiste na aplicação de calor de forma uniforme na borracha que deve conter grupos ou componentes polares na sua composição. Neste processo é possível ajustar a energia da microonda para atuar de forma específica no rompimento de ligações S-S e S-C, preservando as ligações C-C da molécula da borracha. Porém, este método gera uma perda de massa por causa de degradação térmica gerada no processo (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006). O método de desvulcanização por ultrassom foi inicialmente discutido pela Yokohama Tire e Rubber Company. É um processo contínuo que utiliza a aplicação de ondas ultrassônicas de 50 Hz no material, o que acarreta na quebra preferencial de ligações S-S e S-C e manutenção das ligações C-C da borracha. A metodologia de ultrassom é rápida, simples, eficiente e normalmente é aplicada livre de solventes e agentes químicos (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Infelizmente todas as técnicas de desvulcanização têm limitações e, na prática, o processo de vulcanização não é totalmente reversível e a desvulcanização, com frequência, leva à degradação do material, afetando propriedades de interesse deste. Outras aplicações para a borracha sem desvulcanizar foram propostas, que inclui a geração de blendas com outros polímeros. Neste caso, o principal desafio está na compatibilização da interface que pode ser melhorada com compatibilizantes. Outra opção é o uso da borracha descartada moída e o negro de fumo como carga na geração de novos pneus; esta carga de borracha atinge até 5% em massa dos novos pneus, do mesmo modo, é possível empregar resíduo de borracha para fazer blendas com borracha virgem, blendas com polímeros termoplásticos, compósitos de asfalto com borracha, compósitos de concreto com borracha (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Outras aplicações alternativas para o uso de borracha moída foram empregadas, como sua mistura com terra para contribuir na aeração do solo em plantios e cultivos; isto devido à resistência da borracha à compactação, diminuindo a dureza, a resistência ao cisalhamento e aumentando o conteúdo de água no solo. O reúso deste material para

diversos fins também tem sido desenvolvido em diferentes escalas para a confecção de solados de calçado e calcanhares, tubos, correias transportadoras, molduras de borracha, tapetes de automóveis, passagens de vias férreas, camadas inferiores de revestimentos de pisos, perfis moldados e extrudados, placas de vedação, caixas de bateria e outros produtos de borracha (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

A borracha também tem sido pirolisada em ausência de oxigênio para a recuperação de líquidos hidrocarbonetos, negro de fumo e gases que podem ser utilizados na indústria química. Neste tipo de operação de reciclagem são necessárias caldeiras, autoclaves, fornos rotativos, transportadores de parafuso e leitos fluidizados. As principais desvantagens deste processo é a geração de subprodutos e a dependência do preço do petróleo para que a técnica seja inviável. O destino principal dos pneus inservíveis descartados de forma regular na atualidade tem sido a queima em fornos para a obtenção de energia térmica. O uso deste rejeito pode diminuir o consumo de carvão em até 25%. No entanto, esta prática tem várias desvantagens que são a perda dos outros materiais que constituem o pneu, balanço energético baixo, considerando que para fabricar um quilo de pneu são necessários aproximadamente 60.000 BTU e a capacidade energética que gera a queima de um quilo de pneu é em torno de 13.000 a 16.000 BTU, o qual não é muito maior que o do carvão normalmente usado. Além disso, a queima de pneus contribui com a poluição ambiental (ASARO et al., 2018; GENT; WALTER, 2006).

Pesquisas relacionadas com concreto contendo partículas de borracha de pneu reciclada têm potencial para melhorar propriedades como tenacidade à fratura e isolamento acústico do material. A borracha utilizada para o desenvolvimento deste concreto é obtida a partir da trituração mecânica em temperatura ambiente ou da trituração criogênica em temperaturas menores que a de temperatura de transição vítrea, fragilizando o material (NAGDI, 1993). O processo de trituração em temperatura ambiente permite gerar agregados mais grossos, enquanto no processo de trituração criogênico os agregados são mais finos, podendo ser usados em substituição de parte do conteúdo de areia no concreto (ASARO et al., 2018; ELEAZER; BARLAZ; WHITTLE, 1992).

2.4 ARGAMASSA

Argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes,

agregado miúdo e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais com o intuito de melhorar as propriedades. De acordo com o método de produção, as argamassas podem ser classificadas em argamassas produzidas em obra, argamassas industrializadas em sacos, argamassas preparadas em centrais e argamassas industrializadas em silos. No caso da argamassa preparada em obra é feita a mistura de forma empírica dos componentes depois de ter sido definido o traço, sendo feito uma mistura mecânica por um tempo até obter uma mistura homogênea dos constituintes. A argamassa preparada em obra deve ter um tratamento especial de armazenagem dos constituintes, protegendo-os da intempérie (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; CARASEK, 2010).

As argamassas industrializadas em sacos são compostas por agregados, cimento Portland e aditivos especiais que otimizam as propriedades no estado fresco como no estado endurecido. Este tipo de argamassa é desenvolvido em complexos industriais onde os agregados são misturados, controlados e o produto final é ensacado em embalagens plásticas ou em papel Kraft. Para o preparo final da argamassa antes da aplicação somente é requerida a adição de água. Por ser preparado em complexos industriais, este material apresenta uma ótima uniformidade, indicando um traço uniforme entre sacos ou lotes de produção. As argamassas preparadas em centrais são fornecidas em caminhões-betoneira para sua respectiva aplicação, tendo como vantagem a eliminação de estocagem de matérias-primas no lugar de obra. As argamassas preparadas em centrais apresentam pouco tempo de aplicação, requerendo de uma alta organização em relação a tempos e quantidade de uso; no entanto, as argamassas preparadas em centrais com cal podem permanecer em condições de uso por vários dias. O uso mais comum deste tipo de argamassas é na aplicação de contrapisos de grandes extensões (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; CARASEK, 2010).

As argamassas industrializadas em silos são produzidas em complexos industriais, com a diferença de que são misturadas a seco e armazenadas em silos metálicos que são levados por caminhões até o lugar da obra. No momento de preparo em obra são usados mecanismos para a mistura com água. Isto pode ser feito via seca ou úmida. Na metodologia a seco o silo é pressurizado até o momento de preparação e aplicação do material quando a água é incorporada e a argamassa é homogeneizada com misturador mecânico e transportada em caminhões até o local de aplicação. Na metodologia úmida a água é misturada no silo, que normalmente encontra-se no lugar da obra, e posteriormente é transportada por mecanismos de bombeamento, mais comumente bombas de pistão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002). A classificação dos

tipos de argamassas em função de diferentes critérios é apresentada no Quadro 6 (CARASEK, 2010):

Quadro 6 - Classificação de argamassas

Critério de classificação das argamassas	Tipo de argamassa
Quanto à natureza do aglomerante	• Argamassa aérea • Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	• Argamassa de cal • Argamassa de cimento • Argamassa de cimento e cal • Argamassa de gesso • Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	• Argamassa simples • Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	• Argamassa seca • Argamassa plástica • Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	• Argamassa pobre ou magra • Argamassa média ou cheia • Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	• Argamassa leve • Argamassa normal • Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	• Argamassa preparada em obra • Mistura semipronta para argamassa • Argamassa industrializada • Argamassa dosada em central
Para construção de alvenarias	• Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria) • Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alv. de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	• Argamassa de chapisco • Argamassa de emboço • Argamassa de reboco • Argamassa de camada única • Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	• Argamassa de contrapiso • Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos)	• Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante • Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	• Argamassa de reparo

Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

Das diferentes argamassas, a mais importante comercialmente é a argamassa manufaturada com cimento; esta mistura pode ser considerada como concreto. O concreto é o principal produto de engenharia consumido no mundo (IBRACON, 2009). Os principais usos das argamassas são revestimentos em fachadas, revestimentos internos, contrapisos, assentamento, uniões e vedação de tijolos, azulejos, ladrilhos, cerâmica ou

elementos estruturais, regularização de superfícies, impermeabilização e acabamento estético (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; CYBÈLE, 2007).

2.5 CIMENTO PORTLAND

As origens do cimento são retratadas há cerca de 4.500 anos e provavelmente os pioneiros em utilizar mecanismos de liga constituídos por misturas de gesso calcinado oriundas de solos de origem vulcânica foram os egípcios, seguidos dos gregos e antigos romanos; esta liga endurecia com ajuda dos efeitos da água. Entretanto, somente no ano de 1756 foi produzido oficialmente pelo inglês John Smeaton o cimento de alto desempenho que é utilizado na atualidade, o qual é produzido por meio da calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818 o francês Louis Vicat conseguiu reproduzir um produto com resultados similares aos de Smeaton, utilizando calcários e argilas locais, que posteriormente transformou em pó fino. Vicat verificou que o material que obteve depois de secar tornava-se extremadamente duro, similar às pedras de construção ao se misturar com água; além disso, Vicat constatou que o produto final não se dissolia em água. Com base nas pesquisas do engenheiro Louis Vicat e outros estudos que permitiram aperfeiçoar os mecanismos de obtenção do cimento, o químico Joseph Aspdin patenteou no ano de 1824 este material com o nome de “Cimento Portland”. O nome se deve à cor e propriedades de durabilidade similares às rochas da ilha britânica de Portland (HEIMANN, 2010).

O cimento Portland é produzido principalmente da mistura de calcário (carbonato de cálcio), argilas ou sílicas, alumina e materiais com óxido de ferro, podendo variar em menor quantidade com outras fontes; estes materiais são calcinados a uma temperatura que permite como resultado a geração do Clínquer. O processo começa com a moagem do calcário até alcançar granulometrias médias e posteriormente misturado com argilas ou sílicas, alumina e materiais que possuem óxido de ferro, que também possuem granulometria média. Na sequência, o material é misturado e passa por outra série de moinhos e trituradores, terminando com a peneiração geral do material que atinge uma mistura homogênea (HEIMANN, 2010; NEVILLE; BROOKS, 2010).

O material triturado, moído e peneirado é transportado e submetido a um tratamento térmico que comumente é feito em um sistema de fornos cônicos que gradualmente aquece o material em uma faixa de temperatura de 980°C a 1000°C. Este

tratamento térmico tem como objetivo a eliminação do dióxido de carbono do calcário e adicionalmente permite formar novas ligações químicas. Em seguida, o material é calcinado em um forno rotativo em temperaturas na faixa de 1400°C a 1500°C, condição em que o material sinteriza e funde parcialmente (entre 20% a 30%), permitindo novos arranjos microestruturais e novas recombinações entre a sílica, a cal e a alumina, levando à formação final do clínquer. Posteriormente o clínquer é esfriado e novamente moído (normalmente se emprega moinho de bolas); e após uma porção de aproximadamente 5% de gipsita é incorporada. O resultado final deste processo é o Cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2010). Os quatro compostos químicos mais importantes do cimento junto com suas respectivas abreviações são elencados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais componentes do cimento Portland

Nome do composto	Denominação	Composição química	Abreviação	Teor*
Silicato tricálcico	Hatrurita	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	54,1
Silicato Dicálcico	Larnita	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	16,2
Aluminato tricálcico	Ettringita	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10,8
Ferroaluminato tetracálcico	Brownmillerita	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	9,1
Outros		--	--	9,8

Fonte: Adaptado de Neville; Brooks (2010).

Nota: * Calculado segundo as fórmulas de Bogue (%) para cimento Portland típico.

Em particular os silicatos $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) e $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) são os compostos mais relevantes do cimento, isto devido a sua contribuição na resiliência da pasta de cimento hidratada. Estes silicatos, por não serem constituintes puros, são os responsáveis diretos pelo comportamento físico-mecânico do cimento, devido à existência de diferentes tipos de óxidos secundários na solução sólida do cimento, permitindo arranjos atômicos característicos e gerando cristais e propriedades características deste produto. Os compostos responsáveis em maior parte pela resistência mecânica do cimento são o C_3S e o C_2S . Por outro lado, além dos compostos mencionados na Tabela 1, existem outros compostos químicos de menor quantia mássica no cimento, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . Estes dois últimos compostos (K_2O e Na_2O) conhecidos como álcalis são os responsáveis por reagir com diferentes agregados no concreto. Na Tabela 2 são apresentadas as diferentes fases encontradas no cimento Portland, bem como a influência e

a função que desempenha no cimento curado (HEIMANN, 2010; NEVILLE; BROOKS, 2010).

A classificação e o tipo de cimento Portland (Anexo A) dependem das proporções das matérias-primas empregadas para a fabricação, que permitem gerar cimentos comercialmente utilizados ou cimentos especiais. Os cimentos mais tradicionais são o cimento Portland comum (Tipo I), cimento Portland de alta resistência inicial (Tipo III), cimento Portland de alta resistência inicial especial, cimento Portland de baixo calor de hidratação (Tipo IV), cimento modificado (Tipo II), cimento resistente a sulfatos (Tipo V), cimento Portland de alto-forno (Tipo IS), cimento supersulfatado (cimento de escória), cimentos brancos e coloridos, cimento pozzolânico (Tipo IP, P e I(PM)), cimento expansivo, e cimento com alto teor de alumina (HEIMANN, 2010; NEVILLE; BROOKS, 2010; RAHMAN et al., 2014).

Tabela 2 - Fases do cimento, composição típica e sua ação no material

FASES DO CIMENTO	FÓRMULA	%	INFLUÊNCIA NO CIMENTO
Alita	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$60,0\pm 2,0$	Resistência inicial
Belita	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$15,0\pm 1,5$	Resistência a idades tardias
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$4,0\pm 0,6$	Início de pega
Ferroaluminato	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$4,0\pm 0,6$	Resistência aos sulfatos
Mayênita	$12\text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_3$	--	Aceleração do tempo de pega
Arcanita	K_2SO_4	--	Resistência inicial e redução do tempo de pega
Langbenita Cálcica	$\text{K}_2\text{SO}_4.2\text{CaSO}_4$	--	Resistência inicial e redução do tempo de pega
Cal Livre	CaO	$1,0\pm 0,3$	Hidratação expansiva
Periclásio	MgO	$1,0\pm 0,3$	Hidratação expansiva
Calcita/Dolomita	$(\text{CaMg})(\text{CO}_3)_2$	$1,0\pm 0,3$	Carbonatação
Gipsita (Gesso)	$\text{CaSO}_4.1/2\text{H}_2\text{O}$	$2,0\pm 0,3$	Controlador de pega
Bassanita	$\text{CaSO}_4.1/2\text{H}_2\text{O}$	--	Falsa pega
Anidrita	CaSO_4	$2,0\pm 0,3$	Pega lenta

Fonte: Adaptado de Gobbo (2009) e Scrivener et al. (2004).

É importante ressaltar a evolução da produção e o consumo per-capita do cimento no Brasil, que aumentou de forma significativa, sendo duplicada nas últimas duas décadas, apesar da redução dos últimos 3 anos. Na Tabela 3 é apresentado o registro anual de produção e consumo per-capita do cimento dos últimos 16 anos (CBIC, 2016; SNIC, 2016, 2018).

Tabela 3 - Produção e consumo per-capita do cimento no Brasil nos últimos anos

ANO	CIMENTO	
	Produção (mil ton.)	Consumo <i>per-capita</i> (kg/hab.)
2002	38,927	220
2003	35,122	195
2004	35,984	197
2005	38,705	205
2006	41,895	221
2007	46,551	240
2008	51,970	272
2009	51,747	271
2010	59,117	311
2011	64,093	333
2012	68,809	345
2013	70,974	353
2014	71,703	358
2015	65,202	319
2016	57,417	279
2017	53,308	257

Fonte: Adaptado de CBIC (2016); SNIC (2016, 2018).

2.6 AGREGADOS

Os agregados nos concretos normalmente ocupam entre 60 e 80% do volume total, o que muitas vezes determina muitas propriedades do concreto, além de dar estabilidade volumétrica e estrutural ao material. Estes agregados podem ser naturais ou artificiais, mistos ou reciclados, sendo os artificiais os mais usados e comercializados no mundo. Os agregados naturais provem de rochas da crosta terrestre, que se dividem principalmente em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (ALEXANDER, 2010; KOSMATKA et al., 2004). Todos os agregados necessitam de um processo de preparo para estarem adequados para o uso em concretos. No caso dos agregados naturais, o material é obtido da fonte por meio de draga ou escavação, que pode ser seguido por um processo de moagem ou britagem. Os agregados se classificam segundo seu tamanho, que se obtêm tradicionalmente por meio de peneiração e finalmente se faz uma lavagem do agregado (KOSMATKA et al., 2004).

Os agregados em geral podem ter diferentes tipos de classificações de acordo com o tamanho de partícula, petrografia, forma e textura. Em termos de tamanho de partícula, os agregados podem ser classificados dependendo de múltiplos fatores que alteram as propriedades da argamassa ou concreto. A primeira classificação é feita por tamanho dos agregados estabelecendo dois tipos de agregados: gráudo e miúdo; normalmente para

concretos os agregados têm dimensões que variam de 10 a 50 mm de diâmetro, sendo 20 mm o mais frequente. É importante lembrar que a linha divisória entre agregado graúdo e miúdo situa-se entre 4 e 5 mm. Por outro lado, a norma brasileira NBR 7211 estabelece como divisão entre agregados miúdos e agregados graúdos o valor de 4,75 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). É normalmente aceito 0,07 mm de diâmetro ou menor a dimensão da areia; mesmo assim pode ser classificada como silte quando se encontra na faixa de tamanho de 0,07 mm a 0,002 mm de diâmetro e como argila quando possui dimensões menores de 0,002 mm. A Tabela 4 mostra a classificação e as dimensões dos agregados segundo a norma ASTM C136 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016a)

Segundo a classificação petrográfica da norma ASTM C294 os minerais mais comuns e importantes encontrados nos agregados são sílica (quartzo, opala, calcedônia, tridimita, cristobalita), feldspastos, minerais micáceos, minerais carbonáticos, minerais sulfáticos, minerais de sulfeto de ferro, minerais ferromagnesianos, zeólitos, minerais de óxidos de ferro, minerais argilosos. Outros tipos de agregados segundo o tipo de rocha são apresentados no Anexo B (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a).

Tabela 4 - Dimensões das peneiras utilizadas para classificação da granulometria de agregados, segundo norma técnica ASTM C136

	ABERTURA (mm)	ABERTURA (in)	# PENEIRA
AGREGADO GRAÚDO	125	5	-
	100	4	-
	75	3	-
	63	2,5	-
	50	2	-
	37,5	1,5	1.1/2
	25	1	-
	19	0,75	3/4
	12,5	0,5	1/2
	9,5	0,374	3/8
	6,3	0,48	-
AGREGADO MIÚDO	4,75	0,187	4
	2,36	0,0937	8
	1,18	0,0469	16
	0,600	0,0234	30
	0,300	0,0117	50
	0,050	0,0059	270

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2010).

A classificação dos agregados pode ser definida de acordo com a morfologia das partículas. O arredondamento, por exemplo, é consequência do desgaste da rocha-mãe, sendo que os agregados com maior arredondamento são produtos de desgastes naturais, tais como resultantes da ação fluxos de água ou ar. Por outro lado, as morfologias obtidas artificialmente normalmente apresentam arestas e ângulos bem definidos.

O Quadro 7 mostra a classificação segundo a morfologia das partículas dos agregados empregados para o concreto. Outro parâmetro utilizado em relação à morfologia do agregado é sua esfericidade, que é definida como a relação entre a área superficial e o volume da partícula, tendo relação direta com o tipo de britagem feita para produzir o agregado de forma artificial. Partículas com alta relação de esfericidade são de interesse de estudo pelo fato de diminuir a “trabalhabilidade” das misturas. Outro exemplo de análise desta relação de esfericidade são as partículas alongadas que podem diminuir a durabilidade do concreto pela possível retenção adicional de água.

Quadro 7 - Classificação segundo a morfologia das partículas

CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS		
Nome	Descrição	Exemplo
Arredondado	Totalmente desgastado pela ação de água ou ar ou totalmente conformado por atrito.	Seixo de rio ou zonas litorâneas marítimas, areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo.
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente conformado por atrito com arestas arredondadas.	Outros seixos, Flint
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras dimensões.	Rochas lamelares
Anguloso	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces razoavelmente planas.	Pedras britadas de todos os tipos e escória britada.
Alongado	Material, em geral, anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras dimensões.	---
Lamelar e alongado	Material com o comprimento bem maior que a largura e está bem maior que a espessura.	---

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2010).

A textura do agregado é outra característica importante que afeta diretamente as propriedades do concreto. A textura superficial é classificada pelo grau de polimento, suavidade ou rugosidade. O tipo de superfície depende da dureza, do tamanho de grão e das características dos poros. A forma e o tipo de textura da superfície do agregado afetam

diretamente o volume de água requerida, isto porque é necessário maior quantidade de água para envolver a superfície do agregado que tem uma rugosidade alta. Este requerimento da quantidade de água para a mistura aumenta em função do tamanho de partícula.

2.7 ADITIVOS PARA COMPATIBILIZAÇÃO DO CONCRETO-BORRACHA

É importante estabelecer que um aditivo adesivo é definido como uma substância capaz de manter pelo menos duas superfícies juntas de maneira forte e permanente; por outro lado, um selante é uma substância capaz de ligar pelo menos duas superfícies, preenchendo o espaço entre elas para proporcionar uma barreira ou revestimento protetor, sendo estas definições não exclusivas entre elas. As características dos adesivos e dos selantes são similares e comuns entre eles como de ser líquido viscoso com o objetivo de fluir e molhar a superfície a ser colada antes do processo de cura, capacidade de gerar forças intermoleculares, devem endurecer depois da cura, distribuir e transferir a carga entre os componentes unidos, normalmente preenchem lacunas, cavidades e espaços e finalmente devem atuar em conjunto com outros componentes do sistema para oferecer um produto durável (PETRIE, 2007).

A Figura 4 mostra o processo típico para a ligação entre as superfícies de substratos a ser colada ou selada.

Figura 4 - Passos básicos para ligação de adesivos ou processo de selamento

Fonte: Adaptado de Petrie (2007).

As resinas termorrígidas têm a capacidade de curar e formar uma estrutura sólida a partir da formação de reticulações químicas em uma rede tridimensional, aprisionando

partículas sólidas com grande adesão. A cura ou endurecimento do material polimérico é medida pela ação cinética de um composto quimicamente ativo conhecido como agente de cura o agente de cura, o qual deve ser misturado com a resina para gerar uma cadeia de reações químicas e liberação de energia em forma de calor que contribuem com a reticulação do polímero. A cura também pode ser promovida por agentes externos como aplicação de calor, radiação ultravioleta (UV), feixe de elétrons (EB), entre outros ou simplesmente o uso de condições ambiente para o curado (PETRIE, 2006).

Reações exotérmicas acontecem durante a cura das resinas, podendo afetar diferentes entornos onde é localizada a resina, impossibilitando ou restringindo o uso deste tipo de material. Por outro lado, altas temperaturas nas reações exotérmicas podem levar à geração de bolhas no material, degradação térmica e potenciais riscos no processamento (PETRIE, 2006). O controle da temperatura nas reações exotérmicas é um fator importante na hora de formular projetos com este tipo de material. As diferentes vantagens e limitações no uso de resinas termorrígidas são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Vantagens e limitações dos resinas termorrígidas

VANTAGENS		LIMITAÇÕES	
1	Fornece grande área de distribuição de tensões.	1	As superfícies devem ser cuidadosamente limpas.
2	Fornece excelente resistência à fadiga.	2	Calor e pressão podem ser requeridas.
3	Amortece a vibração e absorve o impacto.	3	A vida útil depende do ambiente.
4	Minimiza ou evita a corrosão galvânica entre metais.	4	Prolongados tempos de cura podem ser requeridos.
5	Junta todas as formas e espessuras.	5	A inspeção da junta terminada é difícil.
6	Fornece contornos suaves.	6	O treinamento especial às vezes é necessário.
7	Permite vedar juntas.		
8	Capacidade de união de diversos tipos de materiais, similares ou diferente natureza.	7	Mecanismos de fixação podem ser requeridos.
9	Muitas vezes é menos caro e mais rápido que o uso de uniões mecânicas.	8	Usualmente é requerido rígidos processos de controle.
10	O calor que precisa ou que desprende por suas reações não afetam os materiais que juntar.	9	Limitação da temperatura de funcionamento se for atingir geralmente mais de 150 ° C.
11	Proporciona uma relação força-peso alta.	10	Considerações ambientais, de saúde e de segurança são necessárias.

Fonte: Adaptado de Petrie (2006).

2.7.1 Resinas Epoxídicas

A resina epoxídica também conhecida como epóxi, resina epóxi ou epóxido é um grupo de compostos caracterizado por possuir um oxirano ou anel epóxi, marcado pela presença de três elementos que contém um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono ligados entre eles. O número de grupo oxiranos por molécula proporciona a funcionalidade da resina, conseqüentemente quanto mais anéis ou mais grupos oxiranos por molécula, mais reativa será a resina, permitindo gerar mais ligações cruzadas ou reticulações poliméricas. Os grupos epóxi podem reagir com agentes de cura ou cataliticamente, formando polímeros de alta massa molar. Em geral, um epóxi pode ser representado como um poliéter com grupos terminais epóxi e grupos secundários de hidroxilas. A Figura 5 mostra a estrutura química e a função que desempenha cada parte da estrutura química de uma resina epóxi.

Figura 5 - Estrutura e propriedades da resina epoxídica

Fonte: Adaptado de Petrie (2006).

A cura da resina epóxi pode ocorrer diretamente por homopolimerização ou na presença de agentes de cura. A cura por homopolimerização requer altas temperaturas, enquanto na presença de agentes de cura a reação pode ocorrer em temperatura ambiente. Esta característica afeta diretamente o tempo de trabalho da resina, que envolve o tempo para misturar, aplicar e curar. Adicionalmente, as reações de cura da resina epóxi podem acontecer via mecanismos aniônico ou catiônico.

A forma aniônica acontece quando o grupo epóxi é aberto, produzindo um ânion que tem a capacidade de promover reações inerentes na resina epoxídica. No mecanismo catiônico o grupo epóxido é igualmente aberto; no entanto, gera-se uma nova ligação química normalmente com um grupo hidroxila. Outras características importantes nestas

reações de cura são o fenômeno exotérmico e o aumento da taxa de reação com o aumento da temperatura do ambiente onde o material é curado (PETRIE, 2006).

Diferentes agentes de cura são utilizados nas resinas epóxicas. Os mais empregados são poliamidas, amidoaminas e ácidos anidridos, oferecendo boa tenacidade à fratura e resistência a alta temperatura. Estes agentes de cura normalmente são usados em uma faixa de 0 até 5% em massa. As aplicações da resina epóxi são múltiplas na indústria, podendo citar os setores aéreo e aeroespacial, automotivo, construção, química, elétrica, eletrônica, alimentos e bebidas, marina, têxtil e outras áreas da engenharia (PETRIE, 2006).

2.7.2 Resinas Fenol-Formaldeído

A resina fenol-formaldeído foi inicialmente usada em compósitos de madeira; porém, na atualidade é usada para freios, rodas abrasivas, lixas, moldes de fundição, etc. Este tipo de resina é facilmente manipulável e relativamente econômica.

Normalmente é aplicada como uma solução em álcool, acetona ou água que reveste o substrato, deixando posteriormente curar sob o efeito de calor e pressão. Este tipo de resina normalmente tem uma temperatura de cura de aproximadamente 180°C com tempo de alguns minutos, podendo variar em função dos requerimentos técnicos do material (PETRIE, 2007).

Sua durabilidade é consideravelmente alta e não é afetada pela umidade, mofo ou fungos; suas aplicações podem considerar usos em intempérie e suas propriedades não são seriamente comprometidas em baixas temperaturas. O agente de cura que gera uma catálise alcalina permite a reticulação polimérica em temperaturas elevadas. Este processo de cura com temperaturas elevadas pode provocar a degradação dos substratos a serem aderidos ou selados.

Frequentemente, é adicionado na resina fenol-formaldeído outro tipo de resina de características elastoméricas para minimizar a degradação e contribuir para o aumento da tenacidade à fratura e resistência ao desprendimento. A estrutura química da resina fenol-formaldeído é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura química da resina fenol-formaldeído

Fonte: Adaptado de Wei et al. (2007).

2.7.3 Resinas Poliéster

As resinas poliéster são resinas sintéticas com grande variedade de propriedades e aplicações, com baixo custo. Este tipo de resina pode ser do grupo saturado (termoplásticos) ou insaturado (termorrígidos). As resinas poliéster insaturadas são normalmente usadas para laminados em fibra de vidro e sistemas de adesão. As resinas poliéster insaturadas são de rápida cura quando incorporados agente de cura como peróxidos. O estireno em forma monomérica é um reagente que dilui este tipo de resinas e contribui na reticulação (PETRIE, 2007).

O adesivo poliéster insaturado apresenta uma retração durante a cura e uma pobre resistência química em relação às resinas epóxi. Porém, este tipo de adesivo pode apresentar características de rigidez variáveis, podendo ser amplamente flexível ou altamente rígida, dependendo do tipo de resina poliéster insaturada utilizada. A resina poliéster insaturada apresenta boa aderência em metais, cerâmicos, laminados com vidro e materiais reforçados com fibra de vidro. As aplicações incluem união de partes automotivas e reparação de cimento para concreto, mostrando boa compatibilidade com múltiplos materiais (PETRIE, 2007). A estrutura química da resina poliéster insaturada é ilustrada na Figura 7.

Figura 7 - Estrutura química da resina poliéster insaturada

Fonte: Adaptado de Kargazadeh et al. (2014)

As resinas poliéster saturadas mostram ótima resistência ao desprendimento, e são usadas para laminar filmes plásticos. A claridade e estabilidade colorimétrica que oferece este adesivo tem permitido seu uso em equipamentos ópticos. Comercialmente a resina poliéster está disponível em solução ou em forma de filme sólido e pode ser utilizada em altas temperaturas. A cura dos poliésteres saturados pode ser realizada com isocianatos que melhoram sua estabilidade térmica e química. Uma aplicação tradicional da resina poliéster é a laminação de circuito flexível impresso, em que o metal condutor e o filme de polímero dielétrico é laminado em um processo contínuo (PETRIE, 2007).

2.8 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM REJEITOS DE BORRACHA DE PNEUS

A incorporação de borracha moída de pneus inservíveis no concreto e nas argamassas tem sido estudada como uma forma alternativa para a reciclagem de pneus com maiores benefícios ambientais e também para a geração de concretos com propriedades diferenciadas. Entretanto, a integração entre as propriedades da borracha e da matriz cimentícia tem sido uma dificuldade encontrada que acaba levando ao baixo desempenho de propriedades mecânicas do material. Pesquisas com agregados de borracha permitem inferir que a depreciação das propriedades do concreto com rejeito de borracha é derivada da baixa aderência interfacial entre a argamassa e o rejeito. Vários tratamentos para minimizar esta desvantagem foram realizados. Porém, há necessidade de novas pesquisas sobre este tema, especialmente pelo fato dos diferentes tipos de borracha terem comportamento distinto com ação dos tratamentos realizados (TORGAL, 2010).

Diversos autores recomendam fazer tratamentos superficiais na borracha para aumentar a capacidade de aderência na interface entre ela e o cimento. Exemplo disto é a utilização de solução de NaOH a 10% em massa para lavar o agregado de borracha por um tempo de 20 minutos (NAIK; SINGH; ROBERT, 1994; NAIK; SINGH, 1991), permitindo o aumento na aderência do rejeito e contribuindo para aumentar a resistência do concreto. O hidróxido de sódio atua na remoção de estearato de zinco da superfície da borracha que migra e se distribui na superfície da borracha, gerando uma camada que repele a água (FEDROFF; AHMAD; SAVAS, 1996; GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009; KHATIB; BAYOMY, 1999; SEGRE; JOEKES, 2000; SEGRE; MONTEIRO; SPOSITO, 2002; YOUSSEF et al., 2014).

Outros tratamentos para as partículas de borracha incluem o mergulho em solução ácida, uso de plasma, uso de silanos e também tratamento da borracha previamente com recobrimento de cimento (CAIRNS; KENNY, 2004), uso de látex SBR para aumentar a aderência e o uso de enxofre (OIKNOMOU; STEFANIDOU; MAVRIDOU, 2006) (OIKONOMOU; MAVRIDOU, 2009).

Existem três tipos de mecanismos de compatibilização de borracha e cimento, a primeira opção é procurar mecanismos de eliminação da camada de estearato de zinco por meio de soluções como hidróxido de sódio (NaOH) (TORGAL, 2010), a segunda alternativa é o uso de aditivos de adesão entre borracha e cimento e a terceira maneira é a combinação de métodos para eliminar a camada de estearato de zinco juntamente com o uso de aditivos de adesão. Uma característica importante a ressaltar em todos os trabalhos encontrados na literatura é a diminuição clara de valores de propriedades mecânicas (compressão e flexão) dos compósitos de argamassa ou concreto com incorporação de borracha com a utilização de qualquer tipo de cimento, independente do tempo de cura.

2.8.1 Propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com agregado de borracha

Diferentes pesquisas indicam que o tamanho, a proporção e a textura da borracha influem na resistência à compressão da argamassa com cargas de borracha (SIDDIQUE; NAIK, 2004). Eldin e Senouci (1994) mostraram que resistência à compressão é menor nos compósitos de argamassa em relação às amostras padrão de argamassa. No caso da substituição total do agregado grosso no concreto, o compósito concreto/borracha mostrou 85% de redução na resistência à compressão e 65% de redução na resistência à compressão radial. Por outro lado, com a substituição de agregado fino no concreto verifica-se uma redução de 65% na resistência à compressão e 50% de redução na resistência de compressão radial. Estas misturas mostraram ductilidade na falha e adicionalmente mostrou uma grande capacidade de absorver energia sob cargas de compressão e tensão.

Os resultados experimentais de diferentes pesquisas em relação à substituição de agregado grosso e fino mostram resultados contraditórios; no caso das pesquisas desenvolvidas por Khatib e Bayomy (1999) e Topçu (1995) foi verificado variabilidade de resultados na resistência à compressão, dependendo do tipo de agregado, sem mostrar claramente qual tamanho granulométrico oferece os melhores resultados.

Alguns trabalhos científicos estabelecem que a resistência à compressão dos concretos com agregados de borracha diminui com o seu aumento volumétrico. Porém, é

possível gerar concretos com resistências aproximadas de 40 MPa com 15% de volume de agregado de borracha (GÜNEYISI; GESOĞLU; ÖZTURAN, 2004). Por outro lado, pesquisas sinalizam que concretos com agregados de borracha diminuem sua resistência mecânica (GHALY; CAHILL IV, 2005) e com uma porcentagem de 15% do volume, a resistência à compressão diminui até 50%; adicionalmente o tamanho da partícula da borracha afeta o desempenho da resistência à compressão (VALADARES, 2009).

Outros autores também verificaram a redução da resistência à compressão de 48% para um volume de borracha reciclada de 15% (FREITAS et al., 2009). A resistência à compressão é diminuída com o aumento volumétrico do resíduo de borracha (GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009). Porém, estes autores observam um aumento de resistência mecânica com uma porcentagem de 5% de agregado de borracha grosseira, isto devido possivelmente à uniformidade da curva granulométrica. Este mesmo comportamento também foi observado por outros autores (BIEL; LEE, 1996; KHATIB; BAYOMY, 1999).

A substituição total do agregado petrográfico fino e grosso pelo agregado de borracha mostrou uma queda de 94% e 96% na resistência à compressão e no módulo de elasticidade respectivamente, comportamento justificado principalmente pela baixa resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade da borracha. No entanto, ensaios dinâmicos de impacto axial feitos em corpos de prova cilíndricos mostram uma redução na resistência ao impacto com carga máxima de até 72% e um aumento de 11% na energia dissipada, mostrando-se viável para uso em barreiras de segurança veicular (ATAHAN; YÜCEL, 2012; ISSA; SALEM, 2013; YOUSSEF et al., 2014).

Estudos mecânicos de compósitos de concretos com borracha, avaliados em diferentes tempos de cura, mostram uma diminuição na média aritmética da resistência à compressão em todas as composições e em todos os tempos de cura, indicando um fenômeno definido na falha do material. Do mesmo modo, a morfologia da fratura mostra-se imprevisível e sem padrão definido, independente da composição ou do tempo de avaliação dos ensaios à compressão, sendo possível distinguir fraturas morfológicas cisalhantes, de esmagamento ou mistas (ISSA; SALEM, 2013).

A resistência à flexão ou também conhecido como resistência à tração por flexão é outro parâmetro que diminui com o aumento porcentual volumétrico do resíduo de borracha de pneu. Porém, este comportamento é menos significativo do que para a resistência à compressão (GÜNEYISI; GESOĞLU; ÖZTURAN, 2004; PIERCE;

WILLIAMS, 2004). A resistência à tração parece ser mais afetada pelas características geométricas e físicas da borracha (TORGAL, 2010). A avaliação comparativa da resistência à flexão na substituição de agregado petrográfico por borracha fina e grosseira mostraram melhores resultados com granulometrias de borracha grosseira. No entanto, com o uso de ambas granulometrias ocorre queda progressiva na resistência à flexão com o aumento progressivo do teor de borracha (GISBERT et al., 2014).

Este material poderia ter aplicações em calçadas destinadas ao tráfego de pedestres, em que a menor rigidez do piso poderia resultar em maior conforto na caminhada; em áreas pavimentadas que apresentam árvores, sendo que a ação das raízes não provocaria comprometimento ao pavimento; em pavimentos para tráfego de veículos pesados, pois neste caso o compósito cimento/borracha na forma de estrutura sanduíche permitiria deformações reversíveis do pavimento sem causar danos na estrutura deste; situação similar à anterior também poderia ser aplicada em lajes para edificações. Outras inúmeras possibilidades de aplicação certamente poderiam ser planejadas, uma vez que o concreto é um material estrutural com mercado extremamente amplo.

Vários autores verificaram diminuições do módulo de elasticidade do concreto com a incorporação de 3,3% a 11% de teor de borracha no material (SKRIPKIŪNAS; GRINYS; ČERNIUS, 2007; TURATSINZE; BONNET; GRANJU, 2007), devido ao baixo módulo de elasticidade dos agregados da borracha (ANSON, 1964). Vários autores mencionam que existe um alto risco de segregação dos componentes deste tipo de compósito, sendo recomendável para evitar o problema, a utilização de uma correta combinação de agentes de viscosidade e aditivos (TORGAL, 2010).

Outra propriedade mecânica importante em materiais cimentícios por sua ampla utilidade no momento de aplicação é o módulo de elasticidade; esta propriedade possui vários tipos de classificações, sendo a mais relevante a discriminada pela metodologia de obtenção que dá como resultado os módulos de elasticidade quase estático e dinâmico. As principais diferenças entre os módulos de elasticidade quase estático e dinâmico podem ser verificadas no Quadro 9. Além destas diferenças, o princípio teórico estipula que o módulo de elasticidade quase estático é obtido por ensaios mecânicos que permitem a geração de diagramas tensão-deformação, podendo-se obter retas tangentes ou secantes da região elástica do material. Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico é obtido por ensaios em que estímulos ultrassônicos de vibração atravessam o material, gerando micro-deformações instantâneas; ditos estímulos permitem identificar frequências naturais ou outras ressonâncias em que o sistema estrutural do material tende a oscilar.

Quadro 9 - Diferenças entre os módulos de elasticidade quase estático e dinâmico

DIFERENÇAS	
Módulo de elasticidade quase estático (MEE)	Módulo de elasticidade dinâmico (MED)
Valores absolutos menores que os MED	Valores absolutos maiores que os MEE.
Tempo de ensaio elevado	Tempo de ensaio curto.
São avaliadas micro-deformações derivadas de ensaios tensão-deformação.	São avaliadas micro-deformações derivadas instantâneas geradas por estímulos ultrassônicos.
Ensaio tradicionalmente destrutivo.	Ensaio tradicionalmente não destrutivo.
São empregados acessórios do tipo extensômetros.	São empregados sistemas de excitação ou propagação de ondas que são detectadas, transduzidas, e correlacionadas.
Tipos: Tangencial inicial, Tangencial e Secante.	Métodos: frequência natural de vibração e velocidade de propagação de onda.
Incerteza na medição em torno de 15%.	Incerteza na medição menor que 2%.

Fonte: Arquivo pessoal.

Os módulos de elasticidade quase estáticos e dinâmicos são parâmetros afetados pela adição gradual do agregado de borracha, evidenciando-se pela queda progressiva destas propriedades com o aumento do teor de agregado de borracha na matriz cimentícia em até 20% em substituição ao agregado petrográfico fino e grosso das argamassas e concretos. O módulo de elasticidade diminui de forma praticamente linear até 40%, indicando maior elasticidade nos compósitos (XUE; SHINOZUKA, 2013).

A queda gradual dos módulos de elasticidade se justifica pelo fato da relação direta entre estes e a massa específica da argamassa ou concreto. Por serem as argamassas e os concretos materiais multifásicos e heterogêneos, todas as suas fases contribuem na integração de um novo módulo de elasticidade diferente daqueles dos constituintes individualmente; a adição de um agregado com menor massa específica nestes tipos de materiais, como é o caso da adição gradual de agregado de borracha, resulta em uma queda nos módulos de elasticidade (FARHAN et al., 2015; FARHAN; DAWSON; THOM, 2016; GISBERT et al., 2014; GUPTA et al., 2017; GUPTA; CHAUDHARY; SHARMA, 2014; KAEWUNRUEN et al., 2018; MIRANDA et al., 2013; MOHAMMED; ADAMU; SHAFIQ, 2017; ZHOU et al., 2015).

Dois modelos matemáticos principais para o cálculo aproximado do módulo de elasticidade têm sido usados ao longo do último século (UPADHYAY, 2012). O primeiro destes modelos matemáticos, descrito por W. Voigt, é expresso pela equação 1.

$$E = E_1 * v_1 + E_2 * v_2 \quad (1)$$

em que: E é o módulo do compósito, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade dos materiais que constituem o compósito e v_1 e v_2 representam as frações volumétricas da matriz e das cargas adicionadas no material, sendo $v_1 + v_2 = 1$.

O segundo modelo matemático, descrito por A. Reuss e Z. Angrew, é expresso pela equação 2.

$$E = \frac{E_1 * E_2}{E_1 * v_1 + E_2 * v_2} \quad (2)$$

As grandezas da equação 2 são as mesmas da Equação 1 (UPADHYAY, 2012).

A análise do módulo de elasticidade dinâmica é de grande interesse em situações em que o material é submetido a algum tipo de estímulo vibracional, como é o caso dos materiais de isolamento acústico ou materiais resistentes a trepidações causados pela transmissão de diversos tipos de vibrações. Isto se deve à relação direta entre o módulo de elasticidade dinâmico e as frequências naturais de vibração que a matéria possui inerentemente, que no caso dos materiais compósitos pode ser diminuída ao adicionar elementos que amortecem a propagação das ondas em frequências características do compósito.

A determinação do módulo de elasticidade dos compósitos de concreto ou argamassa com borracha incorporada tem sido feita por métodos de pulso ultrassônico, feixe vibratório e estático. Estudos realizados com a utilização destes métodos têm mostrado que o módulo de elasticidade diminui de forma mais abrupta com a substituição do agregado fino pela borracha do que quando o agregado grosso é substituído pela borracha. No caso do material contendo agregado grosso, o módulo de elasticidade diminui de forma quase linear até aproximadamente 85% com uma incorporação de 40% em massa de borracha. Por outro lado, com a substituição do agregado fino por borracha, a diminuição do módulo descreve um comportamento quase parabólico, atingindo aproximadamente 85% de redução com a incorporação de 20% em massa de borracha; posteriormente, a tendência do módulo de elasticidade se estabiliza com maiores teores de borracha fina (GISBERT et al., 2014).

A tenacidade à fratura dos compósitos é um parâmetro que aumenta significativamente com a presença da borracha. Estudos mostram aumentos de até 63% no amortecimento da amplitude de vibrações com 20% de borracha reciclada (BALAHA; BADAWEY; HASHISH, 2007). A tenacidade à fratura pode variar dependendo do tamanho das partículas do rejeito de 75% para partículas finas até 144% para partículas grosseiras

(ZHENG; SHARON HUO; YUAN, 2008). Estudos com compósitos para calçadas contendo 8% de borracha podem apresentar resistência ao impacto de até 300% maior que o material de referência (FIORITI, 2007), qualidades ideais para aplicações com altas cargas dinâmicas como em zonas de alta sismicidade, travessas de ferrovias ou calçadas (TORGAL, 2010).

Muitas pesquisas relacionadas com a preparação de compósitos de argamassa com borracha de pneu moído foram desenvolvidas (AIELLO; LEUZZI, 2010; ALBANO et al., 2009; BIGNOZZI; SANDROLINI, 2006; CHEN et al., 2007; FIORITI, 2007; FREITAS et al., 2009; GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009; OIKNOMOU; STEFANIDOU; MAVRIDOU, 2006; OIKONOMOU; MAVRIDOU, 2009; SKRIPKIŪNAS; GRINYS; ČERNIUS, 2007; SNELSON et al., 2009; SUKONTASUKKUL; CHAIKAEW, 2006; TOPÇU; BILIR, 2009; TURATSINZE; BONNET; GRANJU, 2007; VALADARES, 2009; VIEIRA et al., 2010). Porém, os estudos de compatibilização química interfacial dos diferentes elementos constitutivos da argamassa e a borracha de pneu são escassos, sendo que o uso de agentes poliméricos para este fim são inexistentes, gerando uma oportunidade de pesquisa para o desenvolvimento de materiais com capacidade de utilização em grande escala.

2.8.2 Propriedades do concreto fresco com borracha

A “trabalhabilidade” do concreto ou argamassa é um parâmetro que está definido como a facilidade do material a ser misturado, transportado, manipulado ou usado na aplicação final. Estudos mostram que o concreto/argamassa juntos com frações de borracha têm uma melhor trabalhabilidade em relação ao mesmo material sem adição de borracha (RAGHAVAN; HUYNH; FERRARIS, 1988). Por outro lado, Khatib e Bayomy (1999) pesquisaram a trabalhabilidade do concreto com adição de borracha e observaram que a trabalhabilidade diminui com o aumento do teor da borracha no concreto/argamassa até um limite de 40% do teor de borracha, onde a trabalhabilidade manual era insignificante. Este mesmo estudo mostrou resultados em relação ao tamanho de partícula de borracha agregada no concreto, mostrando que o uso de partículas cada vez menores ajuda na trabalhabilidade do material. A diminuição da trabalhabilidade dos compósitos de concreto com borracha é devida à maior rugosidade e sua morfologia, com predomínio de cantos vivos da borracha comparada com a morfologia curvilínea e a rugosidade lisa da areia. A

morfologia e rugosidade descrita da borracha associado com o depósito de partículas na superfície da borracha contribuem na diminuição do movimento relativo das diferentes partículas presentes na mistura, limitando a trabalhabilidade (YOUSSF et al., 2014)

A trabalhabilidade dos compósitos de argamassa e borracha em estado fresco encontra-se diretamente influenciada pela quantidade de água empregada. No caso de uma adição de 0,45 na relação de água-cimento, a trabalhabilidade diminui substancialmente em amostras contendo teores de 20 e 40% em massa de borracha com abatimento de 15 mm e 30 mm, respectivamente. Por outro lado, ao se adicionar uma razão água/cimento de 0,35 não se verifica perda dimensional apreciável do abatimento. Finalmente nenhuma composição apresenta colapso, mostrando do mesmo modo um tipo de “Slump” verdadeiro e boa estabilidade na trabalhabilidade. (MOHAMMADI; KHABBAZ; VESSALAS, 2014)

Várias pesquisas observaram que o conteúdo de ar no material em suas diferentes formas é alterado com o aumento do teor de borracha adicionada na matriz do concreto/argamassa. Este fenômeno pode ser justificado pela rugosidade da borracha que pode prender quantidades discretas de ar, impossibilitando sua remoção do sistema. Outra possibilidade está na propriedade hidrofóbica da borracha que impede sua molhabilidade; finalmente o caráter natural apolar da borracha também permite a adesão de ar na superfície da borracha (FEDROFF; AHMAD; SAVAS, 1996; KHATIB; BAYOMY, 1999). O fenômeno do aumento do conteúdo de ar no material pode ser mais relevante se for considerado um aumento na área superficial do agregado polimérico com a diminuição do tamanho granulométrico da carga da borracha. O aumento do volume de ar no concreto/argamassa pode influir negativamente no concreto devido a sua diminuição de massa específica (SIDDIQUE; NAIK, 2004). A presença de ar pode também representar concentradores de tensões no material que aumentam com o teor de carga e redução da granulometria do material particulado da carga de borracha incorporado na matriz do concreto ou argamassa, afetando finalmente as propriedades mecânicas do material.

A massa específica dos compósitos de concreto/argamassa com borracha diminui conforme ao aumento de teor de borracha devido à baixa massa específica das partículas de borracha em relação à matriz (concreto/argamassa). Adicionalmente a massa específica do material compósito diminui com o aumento de ar. Estudos recentes, que avaliam a massa específica aparente destes compósitos, mostram que a massa específica dos concretos pode diminuir em até aproximadamente 45% com a substituição total do agregado petrográfico fino e grosso pelo agregado de borracha. Porém, a substituição de até 10% só chegaria a diminuir 5% da massa específica dos compósitos de concreto-borracha (ATAHAN;

YÜCEL, 2012). A diminuição de massa específica no material é desprezível com valores de até 10% do teor de borracha no volume de material compósito (KHATIB; BAYOMY, 1999).

A análise da massa específica de diferentes materiais é de crucial importância pelo fato de estar diretamente relacionada com múltiplas propriedades como as resistências de compressão e flexão, módulos de elasticidade, tenacidade, energia de fratura entre outras propriedades. Tem sido verificado o comportamento da massa específica da argamassa e/ou concreto com a variação da carga de agregado polimérico, mostrando tendências em que esta propriedade física diminui gradualmente com o aumento progressivo de cargas poliméricas (GISBERT et al., 2014).

Na atualidade os métodos padronizados de avaliação de massa específica consideram entre seus respectivos cálculos o volume de espaço de porosidade permeável, que tem um impacto direto nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios. Ao ser considerado alguns tipos de porosidade concentradores de tensão seu respectivo crescimento leva conseqüentemente a um aumento na probabilidade de nucleação e propagação de trincas que, portanto, leva à falha prematura do material. Diversos estudos relacionam a massa específica e o volume de espaço de porosidade permeável a múltiplas propriedades de compósitos cimentícios, indicando normalmente que ao diminuir o volume de espaço de porosidade ou aumentando a massa específica das argamassas ou concretos aumentam suas respectivas resistências mecânicas (BHUTTA; TSURUTA; MIRZA, 2012; BRITO et al., 2016; HAN; SUN; PAN, 2013; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015; ZHANG et al., 2015; ZHOU et al., 2015)

A quantidade de água absorvida pelo compósito pode ser alterada com a substituição do agregado petrográfico pelo agregado de borracha devido ao caráter hidrofóbico da borracha. Esta alteração do sistema na absorção da água pode alterar a massa específica. Estudos de superfície de resposta relacionam absorção de água, resistência à compressão e massa específica de compósitos de concreto e borracha; estes estudos indicam várias relações diretas como o aumento da massa específica pela adição de borracha, aumentando a quantidade de água na fase cimentícia. Outra relação importante é o aumento da resistência à compressão com o aumento da massa específica. Este fenômeno, demonstrado por correlações estatísticas, descreve a relação direta entre a quantidade de água do compósito e resistência à compressão do compósito (REZAIFAR; HASANZADEH; GHOLHAKI, 2016).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver compósitos de argamassa a partir de cimento comercial com borracha reciclada de pneu compatibilizados com agentes poliméricos comerciais (resina epóxidica, resina fenol-formaldeído e resina poliéster insaturada), com o intuito de gerar materiais com propriedades e desempenho adequados para aplicações na indústria e engenharia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) avaliar e analisar o comportamento da interface entre o compatibilizante, o resíduo de borracha e os diferentes constituintes da argamassa;
- b) reutilizar resíduos de pneus para a elaboração de argamassa com propriedades adequadas para a utilização em aplicações de engenharia;
- c) avaliar o desempenho das propriedades dos compósitos argamassa/borracha originadas pela variação da proporção dos componentes areia-cimento, borracha e agentes compatibilizantes usados na preparação dos compósitos;
- d) avaliar as propriedades do produto de argamassa com resíduos de pneus com relação à morfologia, tamanho e quantidade dos materiais que integram a fabricação do novo material;
- e) contribuir para minimizar os impactos ambientais gerados por resíduos de pneus por meio de sua incorporação em argamassas, gerando conhecimentos para agregar valor econômico a estes materiais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

O material a ser produzido é um compósito particulado constituído por uma matriz cerâmica de cimento Portland e uma fase dispersa bifásica que pode estar unida por ligação química ou não, constituída da areia e partículas de borracha. Para o desenvolvimento do projeto foi empregado um dos cimentos com maior comercialização no mundo, o cimento Portland CPIII 40 de uso comercial, fabricado pela companhia siderúrgica nacional (CSN).

A areia empregada nos compósitos como agregado miúdo é de origem natural e procedente da bacia do rio Paraíba do Sul, sendo classificada como média-fina e com processo de pré-lavagem. A areia foi peneirada e classificada antes da preparação dos compósitos para garantir a homogeneidade e reprodutibilidade das amostras preparadas. Antes da mistura da argamassa foi avaliado o teor de umidade contida na areia com o intuito de corrigir o traço de água no caso de possuir teores consideráveis de água no agregado, tentando manter as proporções dos constituintes da argamassa sem variação no momento da mistura. Para este objetivo, uma quantidade representativa de areia foi colocada e dispersada em um recipiente com base ampla e seca a 110 °C em uma estufa QUIMIS, modelo BG 4000. Posteriormente, a areia foi pesada em diferentes intervalos de tempo. A água empregada no projeto é proveniente da rede de abastecimento de água potável do Departamento de Materiais - (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena - (EEL).

A borracha empregada no presente trabalho é proveniente do processo de recauchutagem de pneus, em que a carcaça dos pneus é parcialmente raspada e cortada por meio de um processo com facas rotativas, gerando um resíduo de borracha em forma granular alongada. Este rejeito foi peneirado para a separação de diferentes tamanhos de partículas, ver Tabela 17.

Os aditivos selecionados para preparar os compósitos de argamassa no presente trabalho são resina epóxídica, resina fenol-formaldeído e resina poliéster insaturada. Estas resinas foram selecionadas por seu fácil acesso comercial, fácil manipulação, suas propriedades físico-mecânicas e principalmente por serem considerados como adesivos estruturais. Os aditivos usados têm a função de adesivo entre as interfaces da borracha e da

matriz da argamassa. Os aditivos usados são catalogados como resinas termorrígidas ou termofixas, as quais são curadas mediante uso de agentes de cura.

As resinas poliméricas citadas são compatíveis com outros polímeros como borrachas e sintetizadas por empresas com objetivo de servir como aditivos, adesivos, selantes, agentes de cura, proteção e compatibilização. Outras aplicações destes aditivos podem ser no uso de concretos, argamassas e produtos cimentícios. Estas resinas têm inúmeras aplicações em diferentes indústrias (química, civil, mecânica, automotiva, elétrica, etc.). Dentre suas propriedades se encontra a alta capacidade de aderência e colagem entre diferentes tipos de superfícies e materiais. Esta alta capacidade de aderência e colagem permite otimizar o comportamento e o desempenho da fratura da argamassa. Acredita-se que a adição controlada deste promotor de aderência contribuirá na tenacidade à fratura do compósito. Por outro lado, dependendo da quantidade incorporada de borracha como carga adicional na argamassa, os custos na fabricação não variam em grande magnitude.

A resina epóxídica empregada é da marca Redelease®, referência SQ-2001 BB. Esta resina é comercializada juntamente com o agente de cura ou endurecedor, referência SQ-3124 à base de poliamina de baixa viscosidade, que reage com resinas epóxídicas para formar materiais poliméricos termorrígidos. A resina fenol-formaldeído tipo resol foi adquirida da marca SI-Group, a qual possui a referência CR-2830. Já a resina poliéster insaturada comercial foi adquirida da marca Percilglass®, referência M210, sendo comercializada junto com o agente de cura peróxido de metil-etil-cetona (MEK), referência TECNOX SUPER. Todas as resinas foram obtidas na forma líquida.

4.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O desenvolvimento do projeto foi dividido em cinco etapas principais definidas da seguinte maneira:

- a) desenho e fabricação de moldes para o processamento dos corpos de prova para ensaios mecânicos de compressão e flexão;
- b) estudo de segregação do compósito de acordo com o tempo de vibração do material durante a preparação e quantidade de água utilizada;

- c) estudo dos compósitos de argamassa e borracha com diferentes granulometrias e cargas de borracha sem aditivos;
- d) estudo da influência dos diferentes métodos de compatibilização nas propriedades dos compósitos;
- e) estudo de argamassa e borracha com a melhor granulometria e compatibilizada com aditivos resinosos. Na Figura 8 pode-se observar as etapas do projeto ordenadas na sequência de elaboração.

Figura 8 - Principais etapas do projeto

4.2.1 Etapa 1

Na etapa 1 foram projetados e confeccionados os moldes para a fabricação dos corpos de prova. O projeto foi desenvolvido com a utilização do software de desenho Autodesk Inventor 2016, de acordo com especificações das normas técnicas ASTM C109 e ASTM C348 para ensaios de compressão e flexão, respectivamente. Nas Figura 9 e 10 são apresentadas as imagens dos moldes fabricados para a confecção dos corpos de prova de compressão e flexão que permitem a preparação simultânea de 56 corpos de prova de compressão e 4 corpos de prova de flexão, respectivamente. Para flexão foram fabricados 11 moldes, totalizando 44 corpos de prova. Os moldes foram fabricados nas oficinas do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR da EEL/USP. A descrição detalhada da geometria dos moldes é apresentada nos apêndices D e E.

Figura 9 - Molde para confecção de corpos de prova para testes de compressão

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 10 - Molde para confecção de corpos de prova para testes de flexão

Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.2 Etapa 2

Na etapa 2 foram feitos estudos de segregação da borracha nos compósitos. A Tabela 5 apresenta as composições empregadas para desenvolver o estudo de segregação. Este estudo é importante para verificar a homogeneidade e localizar discontinuidades que possam alterar as propriedades do compósito em função de parâmetros de processamento. Os ensaios foram realizados em função do tempo de vibração durante a preparação dos compósitos, utilizando um agitador de peneiras da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda. e da quantidade de água adicionada ao material. Nesta etapa, foi empregado um teor constante de agregado de borracha de 10%.

Os materiais obtidos na forma de corpos de prova de compressão foram cortados e polidos axialmente, utilizando uma máquina retífica plana Ferdimat, modelo T42:2005 600 mm e sua superfície foi fotografada com uma câmera de 12 megapixels de resolução. As imagens foram importadas e analisadas com o uso do software de livre acesso “ImageJ”. Deste modo, foram preparadas sete composições para verificar a influencia do tempo de vibração e outras seis composições para verificar a influencia da quantidade de água na segregação. Para o desenvolvimento da etapa 2 foram processadas 13 amostras das quais 7 amostras foram submetidas a diferentes tempos de vibração e outras 6 amostras que possuíam diferentes quantidades de água.

Tabela 5 - Parâmetros de avaliação da segregação do material

TRAÇO*					
Estudo segregação em função do tempo de vibração.			Estudo segregação em função da quantidade de água.		
Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Tempo (s)
1,00	2,75	0,48	1,00	2,75	60
Tempos (s)			Quantidade de Água (g)		
0			0,48		
20			0,60		
40			0,80		
60			1,0		
80			2,0**		
100			3,0**		
120			--		

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: *Traço com 10% em massa de partícula de borracha.

**Materiais que por seu alto conteúdo de água não permitiram obter corpos de prova para analisar a segregação.

4.2.3 Etapa 3

Nesta etapa foram avaliadas as propriedades dos materiais sem compatibilizante. A

Tabela 6 apresenta o traço dos constituintes que foi empregado na preparação dos compósitos de argamassa para todas as composições. Para o desenvolvimento do projeto foram preparados corpos de prova para ensaios de compressão e flexão, seguindo as recomendações das normas técnicas ASTM C109 (amostras de concreto cilíndricas com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) e ASTM C348 (corpos de prova prismáticos de 40X40X160 mm). Além das composições de referência, para cada tipo de

ensaio foram trabalhadas 3 faixas granulométricas diferentes para cada composição. Além disto, para cada composição foram utilizados 4 corpos de prova para cada tipo de ensaio (compressão e flexão) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998, 2016b).

Tabela 6 - Traço dos constituintes da argamassa

TRAÇO		
Constituinte	Quantidade em massa (kg)	Porcentagem em massa (%)
Cimento	1,00	23,64
Areia	2,75	65,01
Água	0,48	11,35

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2016b).

Na Tabela 7 são apresentados as composições estabelecidas em relação à granulometria do agregado de borracha e os teores das cargas mássicas. Esta mesma tabela foi utilizada para a denominação das composições dos ensaios de compressão e flexão. Todas as composições mantêm o traço da Tabela 6; no entanto, a borracha é incorporada em teores crescentes na mistura da argamassa.

Tabela 7 - Nomenclatura dos diferentes compósitos sem compatibilizantes

NOMENCLATURA DAS COMPOSIÇÕES									
FAIXA GRANULOMÉTRICA		TEOR DE BORRACHA (% em MASSA)							
Malha (Mesh)	ABERTURA (mm)	0	1	2	3	4	6	8	10
10-20	1,68-0,85		S1	S2	S3	S4	S6	S8	S10
8-10	2,38-1,68	R	M1	M2	M3	M4	M6	M8	M10
6-8	3,38-2,38		L1	L2	L3	L4	L6	L8	L10

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: R: Amostra de referência.

S: Borracha granulometria pequena.

M: Borracha granulometria Média.

L: Borracha granulometria Grande.

A etapa 3 foi constituída de 176 corpos de prova divididas em 22 composições, sendo manufaturadas 4 corpos de prova para flexão e 4 corpos de prova de compressão axial por composição. Além disso, foram adicionadas 7 diferentes cargas mássicas de borracha no compósito com 3 granulometrias diferentes. Além disto, nesta mesma etapa foram manufaturados 8 corpos de prova para as referências padrão de flexão e compressão axial.

4.2.4 Etapa 4

A etapa 4 teve como intuito determinar o melhor procedimento para a compatibilização dos sistemas argamassa-borracha. Para isso, foram avaliados 4 métodos diferentes de mistura e de compatibilização dos constituintes, utilizando o traço descrito na Tabela 6 (Etapa 3) e teor de borracha de 2%, que mostrou o melhor desempenho nos ensaios mecânicos realizados nos materiais. Estes métodos de compatibilização foram:

- a) impregnação dos aditivos compatibilizantes no contorno superficial do agregado de borracha, seguida de cura polimérica e com posterior preparação da argamassa e corpos de prova. Não foi possível preparar os corpos de prova com este procedimento devido à aglomeração do agregado de borracha pela ação dos aditivos compatibilizantes poliméricos;
- b) impregnação dos aditivos compatibilizantes no contorno superficial do agregado de borracha, seguida de adição da areia na borracha impregnada até a adesão nos contornos superficiais do agregado polimérico com posterior cura polimérica. Por meio deste procedimento, foram processados e moldados os corpos de prova dos compósitos de argamassa;
- c) impregnação dos aditivos compatibilizantes no contorno superficial do agregado de borracha, seguida da incorporação da areia e do cimento na borracha impregnada até a mistura particulada ficar aderida nos contornos superficiais do agregado polimérico, com posterior cura polimérica. Seguindo este procedimento, foram processados e moldados os corpos de prova dos compósitos de argamassa;
- d) impregnação dos aditivos compatibilizantes no contorno superficial do agregado de borracha, seguida da incorporação do cimento na borracha impregnada até o cimento ficar aderido nos contornos superficiais do agregado polimérico, com posterior cura polimérica e preparação da argamassa. Os corpos de prova dos compósitos de argamassa foram processados e moldados seguindo este procedimento;

A Figura 11 ilustra as etapas envolvidas nos métodos de compatibilização da borracha, aditivo compatibilizante e argamassa empregados no projeto.

Figura 11 - Métodos de compatibilização da borracha, resina e argamassa

Fonte: Arquivo pessoal.

Na etapa 4 foram processadas 72 corpos de prova divididos em 9 composições, sendo manufacturados 4 corpos de prova de flexão e 4 corpos de prova de compressão axial por composição para os 3 métodos de compatibilização, conforme descritos anteriormente, empregando os 3 aditivos compatibilizantes escolhidos.

4.2.5 Etapa 5

A etapa 5 consiste em processar a argamassa com aditivos compatibilizantes e teores variáveis de agregado de borracha em conjunto, empregando a melhor metodologia das etapas 3 e 4. Esta etapa permitiu verificar e comparar o desempenho do aditivo compatibilizante em relação às amostras sem aditivo compatibilizante. Na Figura 12 é esquematizado o uso de resultados para a elaboração da etapa 5.

Figura 12 - Fatores utilizados para a definição das condições de realização da etapa 5 de desenvolvimento experimental.

Fonte: Arquivo pessoal.

A etapa 5 empregou 144 corpos de prova organizados em 18 composições, sendo testados 4 corpos de flexão e 4 corpos de prova por compressão axial por composição combinados com os 3 tipos de aditivos compatibilizantes escolhidos e 6 cargas mássicas diferentes de agregado de borracha. Por último, a quantidade de corpos de prova das etapas planejadas totalizam 404 unidades, organizadas em 61 composições.

4.3 DETERMINAÇÃO DE QUANTIDADES DE ADITIVOS COMPATIBILIZANTES INCORPORADOS NA ARGAMASSA

Na Figura 13 é apresentado o esquema representativo do volume de aditivo em função da área superficial do agregado de borracha.

Figura 13 - Esquema representativo do volume de aditivo em função da área superficial do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

4.3.1 Quantidade de aditivo compatibilizante

Considerando que os compósitos produzidos têm diferentes quantidades de carga de borracha, foi empregada a área superficial obtida do ensaio adsorção multimolecular (BET), cuja descrição experimental é feita na seção 4.5.9, para definir o volume de aditivo compatibilizante adicionado no compósito em função do teor mássico do compósito, sendo definido pela expressão pela Equação 4:

$$VC (m^3) = A \left(\frac{m^2}{g} \right) * MAC(g) * \delta(m) \quad (4)$$

em que, VC é o volume de aditivo colocado no compósito em função da quantidade de carga de borracha agregada na argamassa, A é a área superficial em função da massa, obtido pelo ensaio BET, MAC é a massa agregada no compósito e δ é a espessura da camada que recobre o material particulado de borracha. Nota-se que as unidades da equação no sistema internacional encontram-se em parêntesis.

4.3.2 Camada limite

A camada limite é a espessura mínima requerida pelos aditivos compatibilizantes (resina epóxídica, resina fenol-formaldeído e resina poliéster insaturada) para cobrir totalmente o agregado de borracha e permitir a adesão de partículas da argamassa no agregado de borracha. Foram consideradas três metodologias para abordar o cálculo da espessura da camada limite geradas pelos aditivos (δ). Estas metodologias referem-se a lei de Newton para fluidos newtonianos, equações de Navier-Stokes e as equações de lubrificação elastohidrodinâmica (DOMINIC; FEIREISL; HOFMANOVÁ, 2018; DOWSON; HIGGINSON, 2014; HAMROCK; SCHMID, 2004; SHAMES, 1992). O cálculo da espessura da camada da resina baseada na lei de Newton é definida pela Equação 5:

$$\delta = \mu * A * \frac{\Delta V}{F} \quad (5)$$

sendo, δ a espessura da camada de médio fluido cobrindo uma superfície determinada, μ a viscosidade absoluta do fluido em questão, A corresponde à superfície que foi recoberta do fluido estudado, Δv representa a velocidade relativa do fluido em relação à superfície e F representa a força de atrito entre a superfície e o fluido.

Outra forma de calcular a espessura da camada limite de um filme de adesivo em uma superfície é dada pelo modelo matemático de Navier-Stokes, mostrada na série de equivalências ou equações simplificadas 6.

$$\delta = \sqrt{\frac{\mu L}{\rho V}} = \sqrt{\frac{\eta L}{V}} = \frac{L}{\sqrt{R}} \quad (6)$$

Esta série de equivalências pode resultar por aproximação na equação 7:

$$\delta \sim \sqrt{\nu} \quad (7)$$

sendo, ν a viscosidade cinemática.

Por último, foi considerado o modelo de lubrificação elastohidrodinâmica, amplamente empregado para a utilização de lubrificantes comerciais definido pelas equações simplificadas 8 e 9:

$$\delta = \lambda * \sigma^* \quad (8)$$

$$\sigma^* = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (9)$$

Sendo λ uma constante que varia de 1 até 3, sendo 3 para sistemas de lubrificação de alto atrito e desgaste e 1 para sistemas de baixo atrito e desgaste; por outro lado, R_{q1} e R_{q2} representa os coeficientes das rugosidades das superfícies em contato para a lubrificação.

4.4 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

O processamento dos compósitos de argamassa no presente trabalho pode ser dividido em dois tipos, o primeiro em que são processados os compósitos, os quais não se encontram compatibilizados com nenhum tipo de agente compatibilizante, sendo o material processado como uma argamassa tradicional. No segundo tipo é feito o processamento das matérias-primas em função da funcionalização do aditivo compatibilizante resinoso; sendo preciso adicionar uma série de passos adicionais com o intuito de impregnar os substratos e curar o aditivo compatibilizante resinoso com a finalidade de gerar ligações entre os substratos. Posteriormente à cura dos aditivos, o processamento e a cura da argamassa se efetuam.

4.4.1 Mecanismo de adesão dos substratos

Para garantir a melhor aderência entre os substratos da argamassa foram adicionados os aditivos resinosos prontos para cura em estado líquido sobre o agregado polimérico (borracha particulada) e posteriormente foi submetido a uma mistura com alto atrito, garantindo que o aditivo em forma líquida envolvesse totalmente o agregado polimérico e eliminando possíveis bolhas de ar entre o substrato e o adesivo. Para isto, foi empregado um misturador mecânico planetário marca Metal Cairo referência AG-5:2008 a uma velocidade de 125 ± 10 rpm. Este processo de mistura de alto atrito durou aproximadamente 2 minutos e posteriormente foi feito cada um dos mecanismos de compatibilização descritos na etapa 4, item 4.2.4. Na Figura 14 pode-se observar um esquema ilustrativo do fluxo de operações da adesão de substratos dos compósitos processados. Posteriormente ao processo prosseguiu-se à metodologia de cura dos aditivos, item 4.4.2.

Figura 14 - Metodologia geral de adesão dos substratos

Fonte: Arquivo pessoal.

4.4.2 Metodologia de cura dos aditivos

Os compósitos compatibilizados com aditivos do tipo resinoso (resina epóxida, fenol-formaldeído e poliéster insaturado) tiveram tratamentos em que são considerados 2 tipos de cura, a primeira foi realizada com o intuito de promover a cura dos aditivos poliméricos e a segunda durante o período da cura cimentícia.

4.4.2.1 Resina epóxi

A relação mássica entre a resina e o agente de cura utilizada no presente projeto foi 1,0/0,13, de acordo com as recomendações do fabricante da resina. A preparação e mistura da resina com o agente de cura foi feita manualmente. Por outro lado, o tempo empregado de mistura mecânica (misturador mecânico planetário marca Metal Cairo referência AG-5:2008) das diferentes partes do compósito (resina, borracha, e outros agregados) foi de 2 minutos, valor empregado por possuir uma maior molhabilidade segundo a diminuição do ângulo theta θ de molhabilidade, cuja descrição é feita na seção 5.2. Além disso, a temperatura de cura foi de 150°C por um tempo de cura quatro (4) horas (PETRIE, 2006).

4.4.2.2 Resina fenol-formaldeído

A cura do material seguiu os parâmetros descritos na Tabela 8 e Figura 15. O tempo de mistura foi de 2 minutos por possuir uma maior diminuição do ângulo theta θ nesse intervalo de tempo. A mistura dos diferentes elementos do compósito junto com a resina fenol-formaldeído seguiu os mesmos critérios de mistura explicados no item 4.4.2.1 relacionado com a mistura e cura da resina epóxida.

Tabela 8 - Etapas de tratamento térmico para cura da resina fenol-formaldeído

ETAPA	CONDIÇÃO	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (MIN)
1	Rampa	60-80	30
2	Isoterma	80	360
3	Rampa	80-180	60
4	Isoterma	180	240
5	Rampa	180-30	105
6	Fim do tratamento térmico para a cura da resina.		

Fonte: Adaptado de Golanda (2017).

Figura 15 - Diagrama do tratamento térmico de cura da resina fenol-formaldeído

Fonte: Adaptado de Golanda (2017).

4.4.2.3 Resina poliéster insaturada

A cura do material foi feita em temperatura ambiente, e a proporção mássica entre a resina poliéster insaturada e o agente de cura foi entorno de 1,0/0,1, seguindo as indicações do fabricante da resina. A mistura dos diferentes elementos do compósito junto com a resina fenol-formaldeído seguiu os mesmos critérios de mistura abordados no item 4.4.2.1 e relacionado com a mistura e cura da resina epóxídica.

4.4.3 Preparação da argamassa sem compatibilizar

Foi colocada a água na cuba do misturador mecânico marca Metal Cairo referência AG-5:2008 com rotação da pá baixa em 140 ± 5 rpm e movimento planetário baixo em 62 ± 5 rpm. Na sequência, foi adicionado o cimento para sua respectiva absorção, misturando por 30 segundos a baixa velocidade em misturador de movimento planetário (62 ± 5 rpm). Imediatamente depois, foi lentamente adicionada a quantidade de areia estabelecida por um período de 30 segundos a baixa velocidade em misturador de movimento planetário (62 ± 5 rpm). Depois da adição da areia, foi adicionado o agregado de borracha nas mesmas condições anteriores (62 ± 5 rpm por 30s).

Posteriormente a velocidade do misturador mecânico foi alterada para 125 ± 10 rpm por outros 30 segundos. Na sequência, o misturador permaneceu parado por 15 segundos para a retirada do material aderido nas paredes da cuba. Finalmente, o material foi misturado por mais 60 segundos sob velocidade de 285 ± 10 rpm, em misturador de movimento planetário (125 ± 10 rpm), obtendo o material pronto para a moldagem. O método de mistura da argamassa é baseado na norma ASTM C305 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016c).

4.4.4 Preparação da argamassa compatibilizada

Foi colocada a água na cuba do misturador mecânico marca Metal Cairo referência AG-5:2008 com rotação da Pá Baixa em 140 ± 5 rpm e movimento planetário baixa em 62 ± 5 rpm. Depois, o cimento foi adicionado para sua respectiva absorção, misturando por 30 segundos a baixa velocidade em misturador de movimento planetário (62 ± 5 rpm). Posteriormente, foi lentamente adicionada a quantidade de agregado de borracha tratada com os aditivos compatibilizantes para a adesão da fração da argamassa (62 ± 5 rpm), que depende para cada tipo de aditivo.

Em seguida, a velocidade do misturador mecânico foi alterada para 125 ± 10 rpm por outros 30 segundos. Depois, o misturador permaneceu parado por 15 segundos para a retirada do material aderido nas paredes da bacia. Finalmente, o material foi misturado por mais 60 segundos sob velocidade de 285 ± 10 rpm, em um misturador de movimento planetário (125 ± 10 rpm), obtendo o material pronto para a moldagem. O método de mistura da argamassa é baseado na norma ASTM C305 e ASTM C109 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016c, 2016b)

4.4.5 Método de moldagem e cura da argamassa

Todos os moldes (compressão e flexão) foram vedados com cola e fita adesiva para assegurar a hermeticidade. Paralelamente todos os moldes foram cobertos com uma fina camada de óleo para garantir o apropriado desmolde do material. Imediatamente, o material foi colocado nos moldes no menor tempo possível. Para cada amostra, o material foi colocado em 3 camadas, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com soquete normal. Esta moldagem se finaliza colocando cada uma das amostras em um vibrador

automático de 3600 vpm por 1 minuto com agitador de peneiras marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda.

Finalizada a moldagem, todo material foi pré-curado por 24 horas em câmara úmida (Figura 16A). Posteriormente, o material foi cuidadosamente desmoldado e colocado em uma piscina de água saturada com cal para cura por um período total de 28 dias até o momento dos ensaios mecânicos (Figura 16B). A pré-cura e a cura do material foram estabelecidas segundo parâmetros da norma ASTM C109 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016b).

Para o desenvolvimento dos ensaios mecânicos foi indispensável retificar as superfícies superiores das amostras, em máquina retífica plana Ferdimat, modelo T42:2005 600 mm (Figura 17). É importante ressaltar que as superfícies retificadas dos corpos de prova (compressão e flexão) sempre ficaram para o lado superior do ensaio. A Figura 18 mostra fotos dos corpos de prova durante os ensaios de compressão axial e flexão.

Figura 16 - A) Câmara úmida para a pré-cura e B) tanque de cura do material

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 - Retificação dos corpos de prova de compressão e flexão da etapa três

Continua

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 18 – Corpos de prova durante o ensaio de compressão e flexão

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: Ensaios de compressão e flexão.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a caracterização das propriedades mecânicas, químicas e morfológicas das matérias-primas e materiais processados foram utilizados análise de segregação do material, ensaios de compressão (EC), ensaios de flexão (EF), análise de módulo de elasticidade estática (MEE), análise de módulo de elasticidade dinâmica (MED), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), determinação de área específica (BET), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), ensaios de molhabilidade dos compatibilizantes, microscopia ótica (MO), determinação de massa específica aparente (MEA) e análise termo-dinâmico mecânica (DMTA). A Figura 19 mostra um diagrama que descreve os ensaios, análises e testes desenvolvidos e discriminados por caracterização de matéria-prima e material processado.

Figura 19 - Caracterização das matérias-primas e do material processado

Fonte: Arquivo pessoal.

4.5.1 Método de ângulo de contato (MAC)

Sobre três tipos de superfícies de borracha tratadas com lixa número 40, lixa número 320 e lixa número 1000 foi colocada, com o auxílio de uma micropipeta de 50 mL, uma gota dos três aditivos estudados e uma gota da água empregada no projeto para obter três tipos de rugosidades e analisar em temperatura ambiente a molhabilidade dos aditivos e da água na borracha. Para este fim, foi empregada uma câmera de vídeo marca JVC® referência TK-C1Q48OU para obter as fotografias. Depois, foi obtido o ângulo theta θ com o auxílio do software Autodesk® Autocad 2017. A metodologia empregada foi o método de ângulo de contato baseada na norma ASTM D724 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003)

4.5.2 Segregação do material (SM)

Além dos corpos de prova dos ensaios mecânicos foram processados vários corpos de prova de compressão para analisar a possível segregação do agregado de borracha dentro da argamassa; os corpos de prova desenvolvidos para este fim tiveram um traço de 1,00/2,75 de cimento e areia respectivamente; adicionalmente foi colocado 10% em massa de borracha particulada com granulometria na faixa de 850-600 μm e foram usadas como variáveis de avaliação o tempo de vibração e a quantidade de água (Tabela 5). Para desenvolver a análise foi empregado o programa “ImageJ”.

Os corpos de prova cilíndricos foram cortados axialmente e posteriormente polida a superfície cortada. Posteriormente, foram obtidas fotografias da superfície polida e analisadas no programa “ImageJ”. Para a análise de imagem da superfície do corpo de prova foi inicialmente obtida uma fotografia, importada para o programa “ImageJ”, escalada, balanceada a cor da imagem e dividido por níveis de um centímetro de altura por meio da ferramenta “Grid”, sendo o primer nível na parte inferior ou base (sul) do corpo de prova, os outros níveis aumentam até chegar à parte superior do corpo de prova (norte).

Posteriormente, os níveis foram duplicados e foi usada a ferramenta “Threshold”, sendo usada de forma que as regiões negras, que são claramente o agregado de borracha, diferenciadas visualmente (Figura 59). Na sequência, foi usada a ferramenta “Measure” para obter as porcentagens parciais das áreas diferenciadas por nível do agregado de borracha. Este dado foi registrado para quantificar a segregação. Este procedimento foi feito para todos os níveis e para todos os corpos de prova analisados, conservando os mesmos parâmetros.

É importante ressaltar que para considerar a legitimidade desta análise deve-se supor que o material apresente as mesmas características de dispersão em todas as superfícies paralelas axialmente da superfície polida e que a porosidade seja homogênea ao longo dos corpos de provas. A Figura 20 ilustra o algoritmo do processo metodológico que foi empregado para a análise de segregação do material, explicando detalhadamente todos os passos a serem feitos para desenvolver esta análise.

Figura 20 - Algoritmo da análise de imagem para determinar a segregação

Fonte: Arquivo pessoal.

O processo de preparação das amostras e o fluxo de análise parcial dos corpos de prova para a análise de segregação é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Fluxo de análise de segregação

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: N: Norte ou parte superior da amostra em relação à posição de cura dos corpos de prova.

4.5.3 Ensaio de compressão axial (ECA)

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios eletromecânica (carga máxima de 100 kN) - EMIC –DL10000/700 a uma velocidade de 0,5 mm/s. A resistência à compressão (fm) foi calculada por meio da Equação 10, de acordo com a norma técnica ASTM C109, em que P é a força máxima que suporta cada corpo de prova e A é a área transversal de cada corpo de prova. Finalmente foi obtida a resistência média à compressão por meio da equação 11, onde fm_n é a resistência de cada um dos corpos de prova do ensaio de compressão e N é o número de corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para cada composição, respeitando a norma ASTM C109.

$$fm = \frac{P}{A} \quad (10)$$

$$fm' = \sum \frac{fm_1 + fm_2 + fm_3 + fm_4}{N} \quad (11)$$

4.5.4 Ensaio de Flexão (EF)

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios eletromecânica (carga máxima de 100 kN) - EMIC –DL10000/700 a uma velocidade de 0,5 mm/s. A resistência a flexão a três pontos (S_f) foi calculada por meio da Equação 12, de acordo com a norma técnica ASTM C348, onde P é a força máxima que suporta cada corpo de prova, L é a distância entre apoios, b é o largura da base do corpo de prova e h é a altura do corpo de prova. Por fim, a resistência média à flexão S_f' é obtida por meio da Equação 13, onde S_{f_n} é a resistência à flexão de cada um dos corpos de prova do ensaio de flexão e N é o número de corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para cada composição, respeitando a norma ASTM C348.

$$S_f = 0,0028 * P \quad \text{ou} \quad S_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (12)$$

$$S_f' = \sum \frac{S_{f_1} + S_{f_2} + S_{f_3} + S_{f_4}}{N} \quad (13)$$

4.5.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A preparação das amostras foi feita por meio de diluição da amostra em brometo de potássio (KBr) e confecção de pastilhas em uma prensa hidráulica a 50 kN. Os espectros foram coletados no modo de transmitância com 64 varreduras, resolução de 4 cm^{-1} e em uma faixa espectral de 4500 até aproximadamente 250 cm^{-1} em um equipamento Shimadzu IR Prestige-21.

Além disso, foi empregada também a técnica conhecida como refletância total atenuada (ATR) para as amostras em estado líquido, usando o material diretamente no dispositivo. A análise por ATR foi realizada no modo de transmitância, com 64 varreduras, resolução de 4 cm^{-1} e em uma faixa espectral de 4500 até 600 cm^{-1} .

4.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para obter as micrografias de MEV, as amostras foram fixadas sobre uma placa de aço por meio de uma fita de carbono e aplicada uma fina camada de ouro de aproximadamente 20 nm em uma metalizadora MED020 (BAL-TEC /MCS MULTICONTROL SYSTEM). Além disso, foi colocada uma fita de carbono também nos

lados laterais das amostras, desde a base até a superfície da amostra a ser analisada, para aterrar especificamente a superfície de fratura. As micrografias de MEV foram obtidas em um equipamento HITACHI TM3000, empregando sinal de elétrons secundários e voltagem de 20 kV.

4.5.7 Difratometria de raios X (DRX)

Os materiais foram analisados por meio de difração de raios X (DRX) em forma de pó, utilizando um difratômetro de raios X, marca Panalytical®, modelo Empyrean com tubo de cobre de radiação monocromática ($\lambda \approx 0.15418$ nm (CuK α)). Todas as amostras foram analisadas com passo angular de 0,02° e com ângulo inicial de 10° e ângulo final de 90°. A voltagem utilizada no tubo de cobre foi de 40 kV e corrente de 30 mA.

4.5.8 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

Os materiais iniciais foram analisados por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX) para quantificar a composição química em forma de óxidos. O equipamento empregado foi o espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Panalytical, modelo AXIOS, sendo os resultados expressos em percentual em massa de compostos normalizados a 100%. As amostras do cimento e da areia foram preparadas por fusão e a borracha foi prensada em H₃BO₃ após a perda ao fogo. Os resultados são apresentados nos Apêndices A e B.

4.5.9 Teoria de Adsorção Multimolecular (BET)

Este ensaio foi desenvolvido em um equipamento marca Micromeritics Instrument® modelo triStar II Plus no laboratório de análise química da Universidade Federal do Pará (UFPA). Para a análise, as amostras de borracha foram submetidas à temperatura de 110°C por duas horas para degasagem e para a areia e o cimento foi empregada temperatura de degasagem de 200°C por um período de duas horas.

4.5.10 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

A argamassa processada e seus agregados foram analisados por meio da análise semiquantitativa de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), sendo examinados os agregados por análise de EDS modo área e modo pontual. O equipamento empregado para as análises foi um microscópio eletrônico de varredura de bancada marca HITACHI modelo TM3000 com sistema de microanálise EDS empregando-se um tempo de aquisição de dados de 15 segundos, tempo de processamento de dados de 5,0 segundos e tensão de aceleração de 15,0 kV.

4.5.11 Microscopia óptica (MO)

Imagens de microscopia ótica foram obtidas em um microscópio ótico ZEISS® modelo Axiovert 40 MAT com um aumento de 500X. As amostras analisadas foram cortadas com o objetivo de observar a seção transversal da película e a espessura das camadas presentes geradas pelas resinas nas superfícies de borrachas. Adicionalmente, foram tomadas as fotos com diferentes intensidades de luz para minimizar a perda de foco gerada pela diferença de difração de luz dos diferentes componentes do filme dos aditivos compatibilizantes e da borracha, com o intuito de confirmar o modelo físico e matemático para a obtenção da fração volumétrica e mássica das resinas para a geração da camada limite da resina.

4.5.12 Análise termogravimétrica (TGA)

As análises de TGA foram feitas em um equipamento NETZSCH, modelo STA 449F3 na faixa de temperatura de 20 a 900°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min sob uma atmosfera inerte de N₂ com fluxo de 100 mL/min. As amostras foram cortadas de modo a terem geometria e massas similares em torno de 15 mg.

4.5.13 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A análise de calorimetria exploratória diferencial da borracha foi feita em um equipamento NETZSCH STA 449F3, a amostra foi encapsulada em cadinho de alumínio

hermético e continuo-se com o seguinte método: 1) Resfriamento a -150°C com ajuda de nitrogênio líquido. 2) Aquecimento a $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até 300°C . 3) Isoterma de 3 min. 4) Resfriamento $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até -150°C . 5) Isoterma de 3 min. 6) Aquecimento a $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até 300°C . Finalmente, para a análise dos resultados foram tomados os dados do primeiro e segundo aquecimento.

4.5.14 Massa específica aparente (MEA)

Foi obtida a massa específica aparente baseada na metodologia da norma ASTM C642-06, 2008 para observar a tendência desta propriedade alterada pelas novas adições do agregado de borracha e dos aditivos colocados na argamassa (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008). Os corpos empregados para o ensaio de determinação da massa específica aparente foram retirados dos corpos de prova do ensaio de flexão, tentando manter as mesmas proporções dimensionais de $60 \times 20 \times 20$ mm para todos os corpos.

As peças analisadas foram obtidas do corte próximos à superfície retificada para o ensaio de flexão e a medição das peças foram determinadas por média aritmética de triplicata de amostras. Adicionalmente foi desenhada e fabricada a estrutura para obter as massas específicas aparentes das peças mergulhadas em água para obter a massa específica aparente das diferentes composições trabalhadas (Apêndice F). Para a obtenção da massa específica aparente foram consideradas as massas medidas para o posterior cálculo:

- A: Massa da amostra seca em estufa e esfriada no ar até temperatura ambiente (g);
- B: Massa da amostra seca na superfície após ser submersa por 48 horas em água a temperatura ambiente (g);
- C: Massa da amostra seca na superfície após ser submersa por 5 horas em água fervendo e esfriada por 14 horas. (g);
- D: Massa aparente da amostra submersa em água obtida depois da etapa anteriormente descrita na identificação C.

Na análise para obter a massa específica aparente dos compósitos foram empregadas as relações matemáticas 14 a 20.

Absorção depois da imersão (%): ADI

$$ADI = \left(\frac{B-A}{A} \right) * 100 \quad (14)$$

Absorção depois de imersão e fervura (%): ADIF

$$ADIF = \left(\frac{C-A}{A} \right) * 100 \quad (15)$$

Massa específica seca (g/cm³): MES

$$MES = \left(\frac{A}{C-D} \right) * \rho \quad (16)$$

Massa específica depois da imersão (g/cm³): MEDI

$$MEDI = \left(\frac{B}{C-D} \right) * \rho \quad (17)$$

Massa específica depois da imersão e da fervura (g/cm³): MEDIF

$$MEDIF = \left(\frac{C}{C-D} \right) * \rho \quad (18)$$

Massa específica aparente (g/cm³): MEA

$$MEA = \left(\frac{A}{A-D} \right) * \rho \quad (19)$$

Volume de espaço de poros permeável “Vazios” (%): VEPP

$$VEPP = \left(\frac{C-A}{C-D} \right) * 100 \quad (20)$$

O procedimento é descrito pelos passos:

- a) pesar as peças;
- b) secar as peças por 24 horas a 110°C ± 5°C;
- c) deixar esfriar até temperatura ambiente 20-25°C;
- d) pesar as peças, obtendo a massa da peça seca na estufa (A);
- e) molhar as peças com água por um período mínimo de 48h e posteriormente secar superficialmente a peça e pesar. Peça úmida a frio (B);
- f) colocar as peças por 5 horas em água fervendo;
- g) deixar esfriar por 14 horas até ficar a temperatura ambiente 20-25°C, retirar a umidade excessiva da peça e medir sua massa. Massa úmida a quente (C);
- h) em seguida, foi obtida a massa dos corpos de prova depois da imersão em água como é mostrado na Figura 22;

- i) por último foram registrados os dados, tabulados e plotados em figuras para sua respectiva interpretação e análise.

A Figura 22 mostra o sistema da montagem detalhada para medir a massa aparente imersa em água. O desenho da estrutura se encontra no Apêndice F, que está de acordo com a norma ASTM C642 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008).

Figura 22 - Sistema para a medição de massa aparente imersa

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: Ver Apêndice F: Plano geral da estrutura para obtenção de massa específica aparente.

4.5.15 Determinação dos módulos de elasticidades (ME)

Foram obtidos dois módulos de elasticidade quase estáticos (MEQ) e dois módulos de elasticidade dinâmicos (MED). Os módulos de elasticidade estáticos foram calculados os por compressão e flexão e os módulos de elasticidade dinâmicos foram calculados por excitação por impulso flexional e torsional.

4.5.15.1 Módulos de elasticidade quase estáticos (MEQ)

Os módulos de elasticidade estáticos foram obtidos dos ensaios mecânicos de compressão e flexão a partir da reta tangente da região linear da curva tensão-deformação ou tensão-deflexão, baseando-se nos procedimentos das normas ASTM C469 e ASTM C1609, respectivamente (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS,

2002, 2005). No caso do módulo de elasticidade por compressão foi empregada a Equação 21 como base para o cálculo:

$$E_C = \frac{S_{c2} - S_{c1}}{\epsilon_{c2} - \epsilon_{c1}} = \frac{S_{c2} - S_{c1}}{\epsilon_{c2} - 0,000050} \left(\frac{Pa}{mm/mm} \right) \quad (21)$$

sendo, E_C o módulo de elasticidade quase estático obtido pelo ensaio de compressão, S_{c2} e S_{c1} que corresponde à tensão longitudinal da reta tangente da região linear da curva tensão-deformação, e ϵ_{c2} e ϵ_{c1} que corresponde à deformação longitudinal nas tensões S_{c2} e S_{c1} , respectivamente. Por outro lado, o módulo de elasticidade por flexão das amostras foi obtido a partir da Equação 22:

$$E_F = \frac{S_{f2} - S_{f1}}{\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}} = \frac{L^3 m}{4bd^3} \left(\frac{Pa}{mm/mm} \right) \quad (22)$$

sendo, E_F o módulo de elasticidade quase estático obtido pelo ensaio de flexão, S_{f2} e S_{f1} corresponde à tensão na reta tangente da região linear da tensão-deflexão, e ϵ_{f2} e ϵ_{f1} corresponde à deflexão nas tensões S_{f2} e S_{f1} , respectivamente; L representa a distância entre apoios, b corresponde a espessura da amostra, d simboliza a altura da amostra e m representa a inclinação da reta tangente da curva tensão-deflexão.

4.5.15.2 Módulo de elasticidade dinâmico (MED)

Os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos por excitação por impulso em modo flexional e torsional foram obtidos empregando a instrumentação e o software Sonelastic® com o intuito de analisar as vibrações transitórias das quais se extrai as frequências para o cálculo dos módulos elásticos.

Para desenvolver este ensaio foram empregadas amostras prismáticas com dimensões próximas de 60x20x20 mm. Adicionalmente, foi empregado o suporte básico para amostras pequenas com referência SB-AP, captador omnidirecional referência CA-EL-PD para pedestal e um pulsador automático, referência IED.

Todos os instrumentos empregados neste ensaio são marca Sonelastic®. Na Figura 23 pode-se observar a configuração empregada para este ensaio. Finalmente, Os módulos de elasticidade dinâmicos foram obtidos com base às normas ASTM C215 e ASTM C597 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014b, 2016d).

Figura 23 - Configuração empregada para obtenção dos módulos de elasticidade dinâmico flexional e torsional por excitação por impulso

Fonte: Arquivo pessoal.

4.5.16 Análise termo-dinâmico mecânico (DMTA)

As resinas empregadas no presente trabalho e alguns compósitos de argamassas processados foram testados por meio da técnica de análise termo-dinâmico mecânico (DMTA), empregando um equipamento marca NETZSCH, modelo DMA 242 E Ertemis. Na Tabela 9 estão especificadas as condições técnicas utilizadas para a análise de DMTA para cada material.

Tabela 9 - Parâmetros empregados para a análise de DMTA para os materiais testados

Amostra	Método	Intervalo de temperaturas		Amplitude	Frequências	Força estática	Força dinâmica
		(°C)	(μm)				
Borracha	C	-100	200	30,0	1;5;10;25;50	1	2
A. RP	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. SC 2%B GF	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. SC 2%B GM	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. SC 2%B GG	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. CE 2%B	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. CFF 2%B	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010
A. CPI 2%B	C	-15	45	0,2	1;10;16,6;20;25	0,010	0,010

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A taxa de aquecimento para todas as amostras foi de 2°C/min.

Método empregado: C: Compressão, F3P: Flexão 3 pontos.

Siglas de identificação de amostras: **A**: Argamassa, **RP**.: Referência padrão, **SC**: Sem Compatibilizar, **%B**: Porcentagem mássica de agregado de borracha, **C**: Compatibilizado, **E**: R. Epóxica, **FF**: R. Fenol formaldeído, **PI**: R. Poliéster insaturada de borracha, **GF**: Granulometria fina de borracha, **GM**: Granulometria média de borracha, **GG**: Granulometria grossa de borracha.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

A Figura 24 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do cimento em sua forma tipicamente comercial, em que se observa que as partículas possuem dimensões menores que 25 μm , com diversas morfologias, predominando superfícies lisas com cantos vivos.

Figura 24 - Micrografia obtida por MEV Cimento Portland CPIII Tipo 40

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) 2,0kx.

B) 1,0kx

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da análise elementar do cimento, obtida pela técnica de FRX do cimento CPIII Tipo 40. O certificado do ensaio pode-se verificar no Apêndice A. Os valores registrados na literatura se encontram próximos à composição obtida experimentalmente por FRX (LIMA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2014; SCHÖLER et al., 2015; XU et al., 2017).

A norma técnica brasileira ABNT NBR 5735 afirma que a composição dos cimentos CPIII pode variar em função da composição química das matérias-primas empregadas e principalmente em função da receita, já que a norma permite faixas com variação de dosagens de matérias-primas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991).

Tabela 10 - Análise química por FRX do Cimento Portland CPIII Tipo 40

COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO (%)
CaO	54,79
SiO ₂	24,72
Al ₂ O ₃	7,78
MgO	4,95
SO ₃	2,89
Fe ₂ O ₃	2,5
K ₂ O	0,64
MnO	0,56
TiO ₂	0,5
Na ₂ O	0,33
SrO	0,18
P ₂ O ₅	0,15
Outros	~0,01
TOTAL	~100

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 25 e o Quadro 10 apresentam os resultados de difratometria de raios X (DRX) com a identificação das fases mais importantes do Cimento CPIII. Notam-se no difratograma os picos mais intensos dos silicatos C₃S e C₂S, e um pico mais discreto do aluminato C₃A, principais responsáveis pelo desempenho do material. Notam-se também os picos da ferrita C₄AF, wollastonita e cal livre. É importante frisar que os picos mais intensos (C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF) correspondem a aproximadamente 91% do conteúdo em massa do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Figura 25 - Difratograma de raios X do cimento Portland CPIII Tipo 40

Fonte: Arquivo pessoal.

Quadro 10 - Resumo das fases identificadas no cimento Portland CPIII Tipo 40

FASE IDENTIFICADA	SÍMBOLO DE IDENTIFICAÇÃO
C_3S	A
C_3A	B
C_2S	C
C_4AF	D
Wollastonita	E
Cal Livre	F
Gipsita	G

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 26 apresenta o espectro de FTIR do cimento Portland CPIII, em que se observa as bandas relacionadas ao grupo CO_3^{2-} nos comprimentos de onda 1480, 875 e 717 cm^{-1} , derivado das reações do hidróxido de cálcio com a atmosfera. A banda larga em 3400 cm^{-1} é devida à ligação O-H que reflete a presença da portlandita ($Ca(OH)_2$). Também é verificada uma banda atribuída a sulfatos SO_4^{2-} em 1160, 665 e 612 cm^{-1} e nos comprimentos de ondas de 925 e 534 cm^{-1} observam-se bandas relacionadas com a ligação Si-O dos silicatos (GOVINDARAJAN; GOPALAKRISHNAN, 2012; MOLLAH; HESS; TSAI, 1993; OMOTOSO; IVEY; MIKULA, 1998). Na Tabela 11 é apresentado o resumo das bandas do Cimento Portland CPIII.

Figura 26 - Espectro de FTIR do cimento Portland CPIII 40

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 11 - Resumo das principais bandas características do cimento Portland CPIII obtido por FTIR

CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS DO CIMENTO	
Grupo funcional	Número de onda (cm⁻¹)
OH	~3400 Banda larga e de baixa intensidade
CO ₃ ²⁻	~1480, ~875, ~717
SO ₄ ²⁻	~1160, ~665 e ~612
SiO	~925 e ~534

Fonte: Adaptado de Govindarajan e Gopalakrishnan (2012); Mollah, Hess e Tsai, (1993); Omotoso; Ivey e Mikula (1998).

A descrição das faixas granulométricas da areia e dos teores usados no desenvolvimento experimental da pesquisa são apresentados na

Tabela 12. A Figura 27 mostra as frações de areia peneirada de acordo com recomendações da norma técnica ASTM C778 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016e).

Tabela 12 - Faixas granulométricas da areia utilizada

Faixas Granulométricas (µm)	% Retida
+600	Descartado
-600+425	4%
-425+300	66%
-300+150	24%
-150	4%

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 27 - Frações da areia peneirada segundo a norma ASTM C778.

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) -600+425 µm.

B) -425+300 µm.

C) -300+150 µm.

D) -150 µm.

As Figuras 28 a 31 mostram as micrografias de MEV da areia empregada em suas diferentes faixas granulométricas. Em todas as faixas granulométricas são observados diferentes tipos de morfologia que se caracterizam por formatos de partículas que variam desde formas arredondadas até superfícies lisas com cantos vivos. Nota-se o aumento do tamanho de partícula, mostrando o processo de classificação por peneiração indicado na Tabela 12.

Figura 28 - MEV da areia peneirada com granulometria menor de 150 μm

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 100 X.

B) ampliação de 500 X.

Figura 29 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 150 a 300 μm

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 200X.

B) ampliação de 50X.

Figura 30 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 425 a 300 μm

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 200 X.

B) ampliação de 50 X.

Figura 31 - MEV da areia peneirada com granulometria na faixa de 600 a 425 μm

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 100X.

B) ampliação de 50X

A Tabela 13 apresenta a análise elementar da areia para as quatro diferentes faixas granulométricas empregadas neste trabalho, determinada pela técnica de FRX. No Apêndice B pode-se consultar o certificado do ensaio de FRX da areia. Pode-se observar que o maior constituinte é o SiO_2 com um teor de 77,21% para partículas menores ou iguais a 150 μm . No entanto, este teor varia em função do tamanho granulométrico analisado, sendo que com granulometrias mais grosseiras o teor de SiO_2 aumenta gradualmente, observando-se que na faixa granulométrica maior, estabelecida entre 425 e 600 μm , o teor de SiO_2 é aproximadamente de 90%. Este resultado pode ser devido ao fato de

que os minerais mais finos contidos na areia são mais pobres em SiO_2 e mais ricos em Al_2O_3 , Fe_2O_3 ou K_2O (CRUZ, 2011; MÜLLER et al., 2017). A Figura 32 mostra a variação do teor de SiO_2 em função da granulometria da areia.

Tabela 13 - Análise elementar da areia obtido por FRX

TAMANHO DE PARTÍCULA (μm)							
<150		150 - 300		300 - 425		425 - 600	
*	** (%)	*	** (%)	*	** (%)	*	** (%)
SiO_2	77,21	SiO_2	79,10	SiO_2	84,67	SiO_2	89,60
Al_2O_3	8,14	Al_2O_3	11,93	Al_2O_3	8,75	Al_2O_3	5,96
Fe_2O_3	4,20	K_2O	2,91	K_2O	2,43	K_2O	2,07
K_2O	3,43	Fe_2O_3	1,75	Fe_2O_3	1,08	Na_2O	0,73
TiO_2	2,16	MgO	1,26	Na_2O	1,03	Fe_2O_3	0,59
ZrO_2	1,02	Na_2O	1,19	MgO	0,88	MgO	0,44
CaO	1,01	TiO_2	0,79	CaO	0,44	CaO	0,29
Na_2O	1,01	CaO	0,56	TiO_2	0,43	TiO_2	0,17
MgO	0,65	ZrO_2	0,19	ZrO_2	0,08	P_2O_5	0,04
P_2O_5	0,44	P_2O_5	0,11	P_2O_5	0,07	ZrO_2	0,03
CeO_2	0,27	SO_3	0,07	SO_3	0,04	Cl	0,02
MnO	0,11	Cl	0,04	BaO	0,04	BaO	0,02
SO_3	0,08	MnO	0,04	Cl	0,03	SO_3	0,02
Y_2O_3	0,04	BaO	0,04	MnO	0,02	MnO	0,02
Rb_2O	0,02	Rb_2O	0,01	SrO	0,01	SrO	0,01

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: * Composto.

**Concentração.

Figura 32 - Teor de SiO_2 obtido por FRX da areia em função da granulometria

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 33 apresenta o difratograma de raios X da areia usada, com a identificação dos picos do SiO_2 com o símbolo (*) e dos planos de difração de cada pico. Observa-se que a fase dominante é o SiO_2 . No entanto, outros picos de difícil identificação também são verificados, que podem ser de contaminação por argilas ou siltes de difícil remoção e que no processo de lavagem da areia prevaleceram.

Figura 33 - Difratograma de raios X da areia utilizada

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 34 é apresentado o espectro de FTIR da areia. Nota-se uma banda larga próxima de 3750 a 3000 cm^{-1} que pode ser atribuída a ligações O-H dos grupos silanois, água absorvida ou de outros minerais contidos na areia. Por outro lado, duas bandas intensas próximas de 1075 e 1187 cm^{-1} que são atribuídas à deformação assimétrica das ligações do siloxano Si-O-Si e outra banda aproximadamente em 770 cm^{-1} gerada pela deformação simétrica deste grupo (BERA et al., 2013; PRADO; PADILHA, 2005). Além disso, é possível reconhecer no espectro duas bandas na faixa de 2931 e 3000 cm^{-1} geradas pelas deformações simétricas e assimétricas da ligação $-\text{CH}_2$ (BERA et al., 2013) que demonstra resquícios de material orgânico no agregado miúdo. Na Tabela 14 são listadas as bandas de FTIR características dos grupos funcionais mostrados na Figura 34.

Figura 34 - Espectro de FTIR da areia

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 14 - Resumo das principais bandas de FTIR características da areia

CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS DA AREIA	
Grupo funcional	Número de onda (cm^{-1})
O-H (Silanos e água)	~3700-3400 banda intensa e larga
-CH ₂	~3000 e ~2931 duas bandas pequenas
Si-O-Si	Banda de média intensidade ~1187
Si-O-Si	Banda intensa ~1075
Si-O	Banda intensa ~770

Fonte: Modificado de Bera et al., (2013); Prado e Padilha (2005).

A Figura 35 apresenta os resultados de perda de umidade da areia sob um programa de secagem que consistiu em submeter a areia a temperatura de 120 °C por um período estabelecido de 0 a 20 horas, pesando o material em intervalos de tempo pré-determinados. Observa-se que os teores de água na areia são baixos e que a correção de umidade pode ser desconsiderada. A pouca umidade da areia se deve ao seu prévio armazenamento em sacos em áreas secas fora da intempérie.

Figura 35 - Perda de massa referente à umidade da areia a 120 °C

Fonte: Arquivo pessoal.

A água potável empregada no processamento dos compósitos e durante o período de cura foi obtida da rede de abastecimento do Departamento de materiais DEMAR, e sua análise físico-química é apresentada na Tabela 15. A pureza e qualidade da água são fundamentais para gerar reações desejáveis durante a cura do material. Na Tabela 16 são ilustradas as reações químicas causadas pela hidratação das principais fases do cimento.

Tabela 15 - Análise físico-química da água potável utilizada no trabalho

Parâmetro	Valor	Unidade	Método de referência	Parâmetro	Valor	Unidade	Método de referência
Antimônio	0,001	mg/L	VIS	Mercúrio	<0,0002	mg/L	VIS
Alumínio	<0,118	mg/L	VIS	Níquel	<0,042	mg/L	VIS
Amônia (como NH ₃)	0,3	mg/L	VIS	Nitrato (como N)	1	mg/L	VIS
Arsênio	<0,0002	mg/L	VIS	Nitrito (como N)	0,01	mg/L	VIS
Bário	0,02	mg/L	VIS	Ph (potável)	7,5	-	Potenciometria
Cádmio	<0,004	mg/L	VIS	Selênio	<0,0002	mg/L	VIS
Chumbo	<0,009	mg/L	VIS	Sódio	10,27	mg/L	VIS
Cianeto	<0,005	mg/L	VIS	Sólidos dissolvidos totais	480	mg/L	Gravimetria
Cloreto	10	mg/L	Titulometria	Sulfato	15	mg/L	VIS
Cobre	<0,010	mg/L	VIS	Sulfeto de hidrogênio	<0,05	mg/L	VIS
Cor aparente	115	uH	VIS	Turbidez	21,8	uT	Turbidimetria
Cromo	<0,023	mg/L	VIS	Urânio	<0,001	mg/L	Cromatografia de íons
Dureza total	20	mg/L	Titulometria	Zinco	0,06	mg/L	VIS
Ferro	0,19	mg/L	VIS				
Fluoreto	<0,170	mg/L	VIS				
Manganês	0,03	mg/L	VIS				

Fonte: Adaptada de Santos (2015).

Nota: * VIS = Espectrofotometria no UV/Visível.

Tabela 16 - Principais reações químicas causadas pela hidratação do cimento

Nome da fase	Abreviação	Reação teórica esperada da fase com água
Silicato tricálcico	C ₃ S	$2C_3S [100] + 6H [24] \rightarrow C_3S_2H_3 [75] + 3Ca(OH)_2 [49]$
Silicato Dicálcico	C ₂ S	$2C_2S [100] + 4H [21] \rightarrow C_3S_2H_3 [99] + Ca(OH)_2 [22]$
Aluminato tricálcico	C ₃ A	$C_3A [100] + 6H [40] \rightarrow C_3AH_6 [140]$

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2010).

Nota: * Os números em colchetes representam as massas requeridas para a reação acontecer.

Na Tabela 17 são apresentadas as faixas granulométricas dos resíduos de borracha utilizada no trabalho. As faixas granulométricas foram escolhidas tentando distribuir e conservar o tamanho de partículas de uma argamassa tradicional. Imagens do resíduo de borracha devidamente peneiradas são apresentadas na Figura 36.

Tabela 17 - Granulometrias do agregado de borracha

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	
Peneira (Mesh)	Abertura (mm)
6-8	-3,38+2,38
8-10	-2,38+1,68
10-20	-1,68+0,85

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 36 - Imagens das três faixas granulométricas do agregado de borracha peneirada.

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) -1,68+0,85 mm.

B) -2,38+1,68 mm.

C). -3,38+2,38 mm

As Figuras 37, 38 e 39 mostram as imagens de MEV das três faixas granulométricas de borracha empregada. As principais características morfológicas presentes são sua forma alongada e diferentes tipos de rugosidade. Além disso, observa-se que as amostras têm cantos vivos.

Figura 37 - MEV da borracha com granulometria fina

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 200X.

B) ampliação de 30X.

Figura 38 - MEV da borracha com granulometria média

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 30X.

B) ampliação de 200X.

Figura 39 - MEV da borracha com granulometria grosseira

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) ampliação de 500X.

B) ampliação de 30X.

A Tabela 18 mostra os resultados da análise de FRX da cinza de borracha obtida após a calcinação do material. O processo de calcinação foi feito para eliminar a fração orgânica da borracha para a análise dos outros componentes inorgânicos. Assim mesmo, pode-se observar na Tabela 18 que a fração orgânica da borracha é de aproximadamente 95,49%. Por outro lado, observa-se que a borracha possui um conteúdo relativamente alto de óxido de zinco em comparação a outros óxidos presentes. O ativador óxido de zinco é gerado como resultado da calcinação do estearato de zinco contido na borracha. Ressalta-se que a molécula de estearato de zinco é responsável pela formação de camadas superficiais na borracha que impedem a boa adesão da borracha com outros substratos da argamassa (FEDROFF; AHMAD; SAVAS, 1996; GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009; KHATIB; BAYOMY, 1999; YOUSSEF et al., 2014).

Tabela 18 - Análise elementar por FRX do material remanescente da calcinação da borracha

Composto	Concentração (%)	Composto	Concentração (%)
PF*	95,49	K ₂ O	0,04
SO ₂	1,95	Cl	0,01
ZnO	1,53	TiO ₂	0,01
CaO	0,21	ZrO ₂	0,004
Al ₂ O ₃	0,2	CuO	0,003
SO ₃	0,18	MnO	0,002
MgO	0,16	PbO	0,002
Fe ₂ O ₃	0,15	NiO	0,001
P ₂ O ₅	0,06	SrO	0,001
TOTAL		~100	

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: * Perda ao fogo da Fração orgânica e do exofre.

A Figura 40 mostra o difratograma (DRX) da borracha utilizada, em que se nota o espectro típico de um material amorfo característico da borracha. Por outro lado, também são observados no difratograma vários picos que se ajustam aos planos da estrutura do óxido de zinco.

Figura 40 - Difratograma de raios X do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 41 apresenta o espectro de FTIR da borracha, em que são destacadas as bandas mais representativas da borracha. O espectro de FTIR da borracha mostra bandas características de grupos CH_2/CH_3 próximo de $\sim 2929 \text{ cm}^{-1}$ e na faixa de $\sim 1300\text{-}1480 \text{ cm}^{-1}$. A presença de grupos com ligação CH se evidencia pela banda na faixa $\sim 1450\text{-}1475 \text{ cm}^{-1}$. Bandas de grupos C=O podem ser observadas na faixa de $\sim 1556\text{-}1692 \text{ cm}^{-1}$. Adicionalmente o espectro mostra uma série de bandas próximas de 1050 cm^{-1} que podem ser atribuídas à ligação SiO derivada de cargas de reforço na matriz da borracha, concordando com a análise elementar (Tabela 18). A Tabela 19 apresenta a descrição das bandas do espectro de FTIR da borracha da Figura 41.

Figura 41 - Espectro de FTIR do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 19 - Resumo das principais bandas características de FTIR do agregado de borracha

CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS DA BORRACHA	
Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
O-H	~3400 banda intensa
CH ₂ /CH ₃	~2929 e ~2880 bandas medias
C=O	~1556-1556 varias bandas médias e intensas
C-H	~1300-1480 banda média
CH ₂	~1450-1475 várias bandas médias e pouco intensas
SiO	~1050 banda intensa

Fonte: Adaptado de Delva et al. (2013); Silverstein; Webster e Kiemle (2005)

A Figura 42 mostra as curvas de DSC e de TGA do agregado de borracha. O principal sinal verificado por DSC (Figura 42) é relativo à transição vítrea (T_g) do polímero em torno de - 62 °C. Por outro lado, a Figura 42B mostra o termograma de TGA do agregado de borracha, indicando uma perda de massa de aproximadamente 76% nas condições estabelecidas, com uma taxa máxima de perda de massa próximo a 444 °C.

Figura 42 - Análise térmica do agregado borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) curvas de DSC.

B) curvas de TGA.

A resina epóxídica foi caracterizada por meio da técnica de ATR/FTIR em estado líquido e sem agente de cura (Figura 43). Nota-se a presença de bandas de O-H próximo a 3500 cm^{-1} , bandas derivadas da ligação C-H do anel oxirano em $\sim 3055\text{ cm}^{-1}$, bandas de média intensidade das ligações C-H de CH_2 na faixa de $\sim 2964 - 2868\text{ cm}^{-1}$ derivadas do anel aromático e de carbono alifático, bandas intensas das ligações de carbono do anel aromático próximos a 1606 e 1509 cm^{-1} e uma banda intensa característica de grupos éteres C-O-C em $\sim 1032\text{ cm}^{-1}$. Além disso, também são verificadas bandas intensas do grupo oxirano C-O e C-O-C nas faixas de ~ 914 e $\sim 825\text{ cm}^{-1}$ e por último a banda de deformação angular intensa da ligação CH_2 em 768 cm^{-1} . Na Tabela 20 são apresentadas as atribuições das bandas de FTIR para os respectivos grupos químicos. (GONZÁLEZ; CABANELAS; BASELGA, 1988).

Figura 43 - Espectro de FTIR/ATR da resina epoxídica

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 20 - Bandas de FTIR características da resina epóxidica

Tipo de movimento por grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Deformação O-H	~ 3500
Deformação de C-H do anel oxirano	~ 3055
Deformação C-H de CH ₂ e CH aromático e alifático	~2964 - 2868
Deformação C-C de anéis aromáticos	~ 1606
Alongamento C-C de aromático	~ 1509
Estiramento C-O-C de éteres	~ 1032
Estiramento C-O do grupo oxirano	~ 914
Estiramento C-O-C do grupo oxirano	~ 825
Deformação CH ₂	~ 768

Fonte: Adaptada de González, Cabanelas e Baselga (1988).

A Figura 44 mostra os termogramas de DMTA do agregado de borracha. Como principal característica destas curvas são os picos próximos a $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ que representam a relaxação relativa à transição vítrea (T_g) da borracha, corroborando com os resultados de DSC (Figura 42).

Figura 44 - Termogramas de DTMA do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 45 mostra o espectro de FTIR obtido pela técnica de ATR da resina Fenol-formaldeído em estado líquido e sem agente de cura. Pode-se observar uma banda intensa e larga próximo a 3.264 cm^{-1} derivada dos grupos O-H do anel aromático, uma banda de baixa intensidade próxima a 1.697 cm^{-1} relacionada à ligação C-H dos grupos metila, metileno e metoxilo, uma banda intensa de C-O dos grupos laterais do anel aromático e OH fenólico próximo a 1.250 cm^{-1} .

Outra banda de intensidade elevada da ligação C-H do anel aromático fora do plano se manifesta na faixa de $\sim 980\text{ cm}^{-1}$. Outras bandas de intensidades média e alta relacionadas à ligação C-C do anel aromático se manifestam em ~ 1600 , ~ 1500 e $\sim 1450\text{ cm}^{-1}$. Por último, aparecem bandas intensas em ~ 814 e $\sim 753\text{ cm}^{-1}$, relacionadas com as

ligações C-C/C=C do anel benzênico. Na Tabela 21 as atribuições das bandas são descritas.

Figura 45- Espectro de FTIR/ATR resina Fenol-formaldeído

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 21 - Bandas de FTIR características da resina fenol formaldeído

Tipo de deformação ou deformação por grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Grupos O-H alifáticos do anel aromático	~3264
CH deformação dos grupos metil, metileno e metoxilo	~1697
C-O Grupos laterais anel aromático e OH fenólico	~1250
CH Deformação fora do plano anel aromático	~980
C=C Deformações relacionadas ao anel aromático	~1600, ~1500 e ~1450
C-C/ C=C Anel benzênico	~814 e ~753

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2015) e Qiao et al. (2015).

A compatibilidade das resinas fenol-formaldeído com diferentes substratos como os estudados nesta pesquisa vem do antecedente de serem amplamente usadas para unir materiais de natureza química distinta como metais e vidro; este antecedente permite inferir que o sistema estudado (argamassa-borracha) pode ser compatibilizado favoravelmente com resinas fenol-formaldeído.

A resina poliéster insaturada foi caracterizada por meio de espectroscopia de FTIR em seu estado puro (sem agente de cura) e líquido por meio do método de ATR (Figura 46). O espectro de FTIR da resina poliéster insaturada é caracterizada por bandas próximas a 2985 cm^{-1} de C-H. O estiramento da ligação C-H é observado entre 2985 e 2880 cm^{-1} . A contração e dilatação do anel aromático se evidenciam com as deformações próximas de 1600 e 1450 cm^{-1} ; por outro lado, o anel mostra outra banda próxima a 1100 cm^{-1} derivada de vibrações no plano de deformação e outras duas bandas próximo a 700 e 725 cm^{-1} , derivadas das vibrações de flexão fora do plano de deformação. Uma banda intensa de carbonila é observada em aproximadamente 1716 cm^{-1} e finalmente, as deformações dos grupos com oxigênio encontram-se refletidos nas bandas 1244 e 1100 cm^{-1} (KNUUTINEN; KYLLONEN, 2006). Na Tabela 22 são apresentadas as atribuições das bandas.

Figura 46 - Espectro de FTIR/ATR resina poliéster insaturada

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 22 Bandas de FTIR características da resina poliéster insaturada

Tipo de deformação ou deformação por grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
V = CH e V _a (CH ₂) e V _s CH ₂	~3082; ~ 2979
V C=O	~ 1716
V Ph	~1599, ~1447
V (C=O)O	~1244
V O-C, δ=CH	~1098
δ = CH	~1014
Y = CH	~ 724
Y Ph	~ 698

Fonte: Adaptada Knuutinen e Kyllonen (2006).

Nota: Nomenclatura FTIR: δ = Deformação em plano, Y=Deformação fora do plano, V_a=Deformação assimétrica, V_s=Deformação simétrica, Ph= Fenil.

A Tabela 23 mostra os resultados do ensaio da análise de área superficial específica (BET) ou teoria de absorção intramolecular, volume de poro e tamanho de poro para os materiais particulados empregados no projeto.

O uso desta técnica é de fundamental importância para calcular as quantidades de compatibilizante a serem empregadas nos compósitos, evitando o uso escasso ou excessivo destes agentes. Além disso, pode-se observar como a área superficial aumenta em função do tamanho de partícula. No caso da areia, o resultado sintetiza a soma das quatro faixas granulométricas em suas respectivas proporções mássicas (Tabela 12).

Além disso, observa-se que o cimento tem uma área superficial maior por conta de possuir um tamanho de partícula menor. Também são apresentados os resultados relacionados com porosidade para o cimento e a areia. No entanto, não são apresentados os resultados relacionados com porosimetria para a borracha pelo fato da borracha não ter sido detectados poros na superfície do material.

Tabela 23 - Área superficial (BET) e porosidade das matérias-primas

Material	Área superficial específica (BET) (m ² /g)	Volume de Poro (cm ³ /g)	Tamanho do poro (Å)
Areia*	0,1801	0,000583	129,3823
Cimento	1,0569	0,003877	146,7404
Borracha (8-10 mesh)	0,1824	**	**
Borracha (6-8 mesh)	0,0262	**	**

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: *A Análise superficial da areia foi feita baseada na união das faixas granulométricas e nas proporções percentuais de massa mostradas na Tabela 12.

**O Ensaio não forneceu informação relacionada com a porosimetria da borracha.

5.2 MOLHABILIDADE

O efeito da molhabilidade desempenha um papel importante no processamento e nas propriedades gerais de muitos materiais compósitos. Esta propriedade da matéria tradicionalmente integra as fases sólida, líquida e gasosa. No entanto, pode variar dependendo das condições de ensaio. Por outro lado, esta capacidade pode-se associar a diversos processos como espalhamento, impregnabilidade, compatibilidade e até a absorção, motivos pelo qual se torna indispensável analisar a molhabilidade em materiais a serem empregados como adesivos ou materiais que tenham qualidades de compatibilizante em substratos a serem aderidos. A molhabilidade pode também ser vinculada a outras características físicas como a tensão superficial e energia de superfície que são essenciais na compatibilização de um compósito (PETRIE, 2006, 2007).

Teoricamente o fundamento de molhamento surge quando dois fluidos imiscíveis entram em contato, interagindo de forma que diminui a energia livre de superfície e deformando sua área de contato e sua forma, o que pode levar ao surgimento de interações moleculares. No entanto, estas interações moleculares são neutralizadas por outras forças geradas pela tensão interfacial que resultam pela baixa energia de coesão.

Quando um fluido encontra-se em contato com o ar ao seu redor, a tensão interfacial é chamada de tensão de superfície e representada pela letra grega γ . Na ausência de forças externas, um líquido adota uma morfologia esférica, que é a menor área superficial adotada para um volume. Por outro lado, a pressão interna do líquido da gota tem que ser maior que

a pressão exterior, pressão da atmosfera circundante, para poder fornecer a tensão superficial no líquido.

A Figura 47 mostra o esquema de molhamento de uma gota de líquido sobre uma superfície sólida, em que se observa a identificação vectorial das forças de tensão interfacial geradas no processo de molhamento que dependem da variável tempo (KORHONEN, 2013).

Figura 47 - Esquema ilustrativo de molhamento sobre superfície e forças vectoriais de contato derivadas das tensões interfaciais

Fonte: Adaptado de Korhonen (2013).

A molhabilidade pode ser avaliada e quantificada pelo parâmetro de molhamento S , que relaciona a diferença de energia livre de superfície da superfície molhada e seca, de acordo com a equação 3:

$$S = \gamma_{SV} + \gamma - \gamma_{SL} \quad (3)$$

em que: γ_{SV} , γ_{SL} e γ são as tensões interfaciais de sólido-atmosfera, sólido líquido e superfície livre de tensão.

A molhabilidade de um sistema pode ser classificada por compatibilidade, sendo eles hidrofílico e hidrofóbico. Esta denominação depende do ângulo θ , sendo considerado hidrofílico sistemas que possuem valores de θ menores de 90° e hidrofóbico sistemas com valores de θ maiores de 90° (KORHONEN, 2013). A Figura 48 mostra as diferenças entre os diferentes tipos de molhamento existente entre um fluido e uma superfície sólida.

Figura 48 - Esquema representativo de terminologia de molhamento

Fonte: Adaptado de Korhonen (2013).

Pesquisas prévias sobre molhabilidade de superfícies de borracha foram desenvolvidas com diferentes fluidos como água, formamida, di-iodometano, etilenoglicol, hexadecano, fluido corporal simulado, gotículas de sangue e vários grupos epóxicos, mostrando em todos os resultados qualidades hidrofílicas com molhamento parcial, obtendo ângulos de molhabilidade θ , que dependendo do fluido, pode chegar até 17° (MARCELO et al., 2018; SARAMOLEE; LOPATTANANON; SAHAKARO, 2014; ZHOU; FAN, 2017).

A Figura 49 mostra o critério de medição inicial do ângulo θ relacionado com a molhabilidade das resinas e da água sobre as superfícies da borracha. Estas superfícies foram previamente tratadas para conhecer os parâmetros de molhabilidade das resinas e água sob os três tipos de rugosidades obtidas por polimento com lixas de numeração 40, 320 e 1000. As Figuras 49 a 53 mostram as fotografias iniciais e finais de alguns testes de molhabilidade para superfícies tratadas com lixa com numeração 1000.

Figura 49 - Esquema empregado para a medição do ângulo theta θ

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 50 - Teste de molhabilidade entre água e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 51 - Teste de molhabilidade entre a resina fenol formaldeído e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 52 - Teste de molhabilidade entre a resina epóxidica e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 53 - Teste de molhabilidade entre a resina poliéster insaturada e a borracha com superfície polida com lixa 1000 nos tempos de: A) 0 minuto e B) 10 minutos

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 54 mostra os resultados do teste de molhabilidade das resinas e da água na superfície de borracha tratada com três rugosidades diferentes. Em termos gerais, pode-se observar várias características importantes como o ângulo θ que vai diminuindo gradualmente no decorrer do tempo determinado para o ensaio (10 minutos).

Outra característica é que a rugosidade tem um papel fundamental na molhabilidade dos sistemas, considerando que a rugosidade que mostrou uma maior diminuição do ângulo θ e, portanto, o maior espalhamento foi com a rugosidade fina obtida pelo polimento da borracha com lixa número 1000, seguida da borracha de rugosidade média obtida por polimento com lixa número 320 e finalmente a menor diminuição do ângulo θ foi registrada para a rugosidade grosseira, obtida com lixa número 40. Este fenômeno é constatado em todos os líquidos empregados (resinas e água).

Pode-se constatar também que o sistema que mostrou maior molhabilidade pela diminuição do ângulo θ foi na borracha com superfície fina e a resina epóxi e as molhabilidades com rugosidade média e grosseira mostraram um comportamento similar em todos os sistemas avaliados.

Foi constatado que os sistemas estudados (borracha, resinas epóxicas, fenol formaldeído, poliéster insaturada e água) mostram qualidades hidrofílicas com molhamentos parciais, obtendo molhamentos que dependendo da rugosidade variam em seu ângulo θ de aproximadamente de 65° a 45° em um intervalo de tempo de 10 minutos.

Figura 54 - Molhabilidade entre os fluidos do compósito e a borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Rugosidade obtida de polimento com lixa fina número 1000;
 ▲) Rugosidade obtida de polimento com lixa média número 320 e
 ●) Rugosidade obtida de polimento com lixa grosseira número 40.

5.3 RECOBRIMENTO DAS PARTÍCULAS COM RESINAS

Foi avaliada microscopicamente a secção transversal das camadas das resinas formadas por meio de aplicação manual sobre superfícies polidas de borracha, com o intuito de conhecer as respectivas espessuras destas camadas sobre a borracha (Figuras 55 a 57).

Verifica-se que as espessuras médias se encontram em uma faixa de 10 a 30 μm . Esta estreita faixa de espessuras das camadas das resinas na borracha observada no microscópio óptico confirma matematicamente o modelo de camada limite baseado na lubrificação elastohidrodinâmica do item 4.3.2, considerando que os outros modelos citados não oferecem resultados próximos às dimensões das camadas obtidas pela microscopia óptica (Figuras 55, 56 e 57).

A inspeção visual e as imagens de microscopia óptica da secção transversal das três resinas sobre a borracha mostram também que os métodos mecânicos para incorporação da resina na borracha são capazes de promover a formação de uma camada que contorna toda a superfície das partículas de borracha, indicando boa impregnabilidade. Este teste permite inferir que o uso de misturadores mecânicos empregados para a mistura de argamassas e concretos podem ser empregados para a impregnação das resinas nas partículas de borracha, processo que resulta como passo prévio na preparação de compósitos de argamassas ou concretos com cargas de borracha compatibilizadas com resinas.

O efeito de atrito mecânico contribui para o espalhamento dos aditivos sobre superfícies de borracha, gerando camadas que podem envolver a borracha de modo efetivo; este resultado pode contrastar com os resultados de molhabilidade parcial verificada nos resultados apresentados na Figura 54.

No entanto, deve-se considerar que o teste de molhabilidade empregado se fundamenta na deformação da resina por efeitos de gravimetria, energia superficial, pressão atmosférica entre outros; estes efeitos negativos podem se minimizar no caso das resinas com ajuda de mecanismos que envolvem o atrito mecânico. No caso de materiais particulados, um simples misturador contribui para o espalhamento de fluidos em sua superfície.

Figura 55 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina epóxídica insaturada na superfície de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 56 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina fenol formaldeído na superfície de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 57 - Fotomicrografias da seção transversal da camada da resina poliéster insaturada na superfície de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

5.4 QUANTIDADE DE COMPATIBILIZANTE POR COMPOSIÇÃO

Baseado no modelo matemático da lubrificação elastohidrodinâmica que complementa a equação 1 (itens 4.3.1 e 4.3.2), e nas micrografias das camadas obtidas da secção transversal das camadas das resinas sobre as superfícies de borracha obtidas (Figuras 55, 56 e 57), foram calculadas as frações mássicas dos aditivos para cada composição. Estas proporções são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Porcentagens mássicas dos aditivos compatibilizantes adicionados aos compósitos em função das quantidades de borracha empregadas

ADITIVO POLIMÉRICO	PORCENTAGEM DE RESINA EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE BORRACHA						
	0%	1%	3%	4%	6%	8%	10%
Resina Fenol-formaldeído	0,00	0,60	1,79	2,38	3,52	4,64	5,74
Resina epóxidica	0,00	0,60	1,78	2,36	3,49	4,60	5,69
Resina Poliéster insaturado	0,00	0,62	1,84	2,44	3,61	4,76	5,88

Fonte: Arquivo pessoal.

5.5 SEGREGAÇÃO DO MATERIAL

A Figura 58 apresenta a imagem da superfície polida de um corpo de prova de compressão importada para o programa “ImageJ” com a identificação do norte da imagem simbolizando o topo do corpo em função de seu posicionamento de cura. Também é possível visualizar a divisão por quadrantes gerada para quantificar a segregação por porcentagem de área de borracha identificada.

Figura 58 - Divisão por quadrantes da superfície polida do corpo de prova cilíndrico

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: N: Norte ou parte superior da amostra em relação à posição de cura dos corpos de prova.

Na Figura 59 é apresentada o roteiro parcial para a medição da porcentagem de área da fase de borracha em “ImageJ”. Por outro lado na Figura 60 são mostradas as fotografias original e tratada da composição em que se verificou um gradiente de segregação do agregado polimérico no compósito de argamassa. As regiões negras identificadas como borracha têm uma maior presença na parte superior da Figura 60 e verifica-se uma menor presença do agregado polimérico na parte inferior desta Figura, indicando uma falta de homogeneidade ao longo da amostra. A presença desta segregação gera propriedades anisotrópicas indesejáveis no material estudado. Entretanto, o traço empregado para todas as composições estudadas neste projeto não apresentou gradientes de segregação aparente.

Figura 59 - Nível analisado com identificação do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: N: Norte ou parte superior da amostra em relação à posição de cura dos corpos de prova.

Posterior à obtenção das porcentagens de borracha nas regiões do agregado na argamassa, foram registrados os resultados da porcentagem da área diferenciada, os quais são apresentados na Figura 61. Desta forma, são apresentados os resultados de segregação em função do uso de métodos mecânicos de vibração e de diversas quantidades de água. Nota-se que houve uma segregação representativa em função das diferenças no gradiente de área ocupada pelo agregado de borracha na amostra preparada com 1,0 % em massa de água.

Esta segregação se mostra logicamente por uma estratificação da borracha no topo da amostra, região norte da amostra, que se apresenta principalmente por causa da ação gravimétrica. Adicionalmente se observa que nos primeiros níveis, a área que representa a borracha se mostra constante e posterior ao nível 4 a área vai aumentando gradualmente. Este comportamento é esperado ao analisar que a quantidade de água contribui na segregação da argamassa.

Figura 60 - Segregação da borracha no compósito com traço de 2.75: 1.00: 1.00: 0.475 de areia, cimento, água e borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Foto original.

B) Foto tratada.

Por outro lado, as outras amostras não apresentaram segregação, considerando que os valores próximos à precisão das ferramentas de medição “Threshold” empregada na área é de aproximadamente 1% no programa “ImageJ” e esta precisão pode variar levemente, dependendo da imagem. Mesmo assim, na Figura 61 observa-se que a porcentagem de área entre todas as amostras oscila em uma tolerância próxima de 1 % e sem padrão definido, indicando que a dispersão das partículas de borracha é homogênea em toda a superfície axial do corpo de prova.

Figura 61 - Segregação do agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Segregação por tempo de vibração.

B) Segregação por quantidade de água.

Os resultados apresentados na Figura 61 demonstram o risco de segregação do material, comprometendo as propriedades mecânicas do material. Este fenômeno já foi estudado por outros autores de forma qualitativa (TURATSINZE; GARROS, 2008). Entretanto, o presente estudo permitiu estabelecer vários parâmetros em que se pode trabalhar o compósito, como quantidade de água e vibração, sem que haja uma segregação significativa nos materiais desenvolvidos.

5.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR

Foram caracterizados por meio de testes mecânicos os compósitos sem compatibilizar, os quais possuem borracha em diferentes porcentagens de massa e em diferentes faixas granulométricas (Tabela 7), obtendo-se as resistências e as deformações à compressão e flexão. Além disso, foram determinados os módulos de elasticidades quase estáticos de compressão e flexão e os módulos de elasticidade dinâmicos por excitação por impulso flexional e torsional. Em

todos os ensaios verificaram-se qualidades mecânicas que podem ser equiparáveis à referência padrão (RP).

5.6.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Na Figura 62 são apresentadas curvas representativas normalizadas de tensão-deformação geradas nos ensaios de compressão em função dos tamanhos das partículas empregadas e dos conteúdos do agregado de borracha. A diminuição das propriedades mecânicas como resistência à compressão, deformação e módulo de elasticidade a compressão com o aumento de conteúdo de borracha para todas as granulometrias de agregado de borracha sugere que o agregado de borracha não contribui como reforço no compósito ante o estímulo de compressão.

Figura 62 - Curvas de tensão-deformação típicas de ensaios de compressão com diferentes granulometrias e diferentes tipos de carga de borracha sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão;

□) 1% de carga de agregado de borracha;

●) 2% de carga de agregado de borracha;

○) 3% de carga de agregado de borracha;

▲) 4% de carga de agregado de borracha;

△) 6% de carga de agregado de borracha;

◆) 8% de carga de agregado de borracha;

◇) 10% de carga de agregado de borracha.

Na Figura 63 são apresentados os resultados de resistência à compressão do conjunto de amostras da etapa 3. Pode-se observar que o material tem uma queda gradual na resistência à compressão com o aumento do teor de borracha, este fenômeno pode ser

devido à falta de ligação interfacial entre a borracha e as diferentes fases da argamassa propriamente dita. Além disso, a falha prematura com o aumento do conteúdo de agregado de borracha pode-se dever também à diferença entre as massas específicas da borracha e as diferentes fases da argamassa, que influencia diretamente nas propriedades do material. Por outro lado, não é visível uma diferença significativa nos resultados da resistência à compressão entre as três diferentes granulometrias, mostrando um comportamento similar entre os três tipos de granulometrias. No Apêndice H encontram-se a descrição completa dos resultados da resistência à compressão junto com seus respectivos intervalos de confiança de 95%.

Figura 63 - Resistência à compressão (fm') dos materiais com diferentes granulometrias e tipos de carga de borracha sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina.
 ○) Borracha de granulometria média.
 ▲) Borracha de granulometria grossa.

A Figura 64 mostra a deformação normalizada no momento da fratura gerada no ensaio de compressão da argamassa com carga de borracha, mostrando uma deformação homogênea na faixa de 0,008 até 0,022 mm/mm entre todos os tipos de compósitos com diferentes cargas e os três tipos de granulometrias das diferentes amostras. Em comparação

com a composição de referência sem a presença de borracha, que possui uma faixa de deformação que varia de aproximadamente 0,011 a 0,017 mm/mm, pode-se assegurar que a borracha não altera significativamente os limites de deformação das composições trabalhadas nesta pesquisa. Além disso, esta faixa de deformação encontra-se próxima às verificadas na literatura consultada (CABRERA et al., 2016; KONSTA-GDOUTOS et al., 2017; LIMA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2014; SANTOS et al., 2016).

Figura 64 - Deformação máxima à compressão com diferentes granulometria e tipos de carga de borracha sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina.

○) Borracha de granulometria média.

▲) Borracha de granulometria grossa.

5.6.2 ENSAIO DE FLEXÃO

A Figura 65 mostra curvas representativas normalizadas de tensão-deflexão em função do tamanho de partícula e do conteúdo de borracha. Pode-se observar que a resistência à flexão das composições oscila entre 1% a 4%, sendo iguais ou superiores à composição de referência e refletindo sinergismo nestas composições ao se avaliar seu desempenho sob o estímulo mecânico de flexão. Isto indica que até aproximadamente 4%

o agregado de borracha contribui como reforço ante o estímulo de tração por flexão. Além disso, pode-se observar como o agregado contribui para obter maiores deformações com teores iguais ou superiores a 4%.

A Figura 66 apresenta os resultados da resistência à flexão dos compósitos de argamassa com diferentes conteúdos de borracha. A particularidade mais importante dos resultados deste ensaio é a conservação ou aumento das propriedades de flexão até um teor aproximado de 4% de borracha. Esta conservação de resistências à flexão pode atingir conteúdos de até 5% se for empregado interpolação de dados.

Com teores maiores de borracha, a resistência à flexão do material vai diminuindo gradualmente. Paralelamente, pode-se observar a similaridade em relação ao ensaio de compressão (Figura 63) quanto à granulometria da borracha, a qual não gera uma distinção nas propriedades de resistência à flexão e deformação, indicando que nestas faixas granulométricas são geradas propriedades mecânicas de flexão análogas entre eles. No Apêndice H encontram-se a apresentação dos resultados da resistência à flexão junto com seus respectivos intervalos de confiança do 95%.

Figura 65- Curvas de tensão-deflexão típicas de ensaios com diferentes granulometria e tipos de carga de borracha

Fonte Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão,

□) 1% de carga de agregado de borracha,

●) 2% de carga de agregado de borracha,

○) 3% de carga de agregado de borracha,

▲) 4% de carga de agregado de borracha,

△) 6% de carga de agregado de borracha,

◆) 8% de carga de agregado de borracha,

◇) 10% de carga de agregado de borracha.

Figura 66 - Resistência à tração por flexão (S_f^*) dos compósitos não compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina.
○) Borracha de granulometria média.
▲) Borracha de granulometria grossa.

Na Figura 67 são apresentados os resultados das deformações de deflexão geradas nos testes de flexão das diferentes composições. Nota-se que teores inferiores a 4% produzem deformações menores que a composição padrão; no entanto, em teores maiores de 4%, as deformações aumentam em relação à composição de referência.

As deformações no ensaio de flexão oscilam aproximadamente entre 0,15 até 0,9 mm, demonstrando que o agregado de borracha contribui para o aumento da deformação em tensões de tração; por outro lado, a literatura consultada mostra faixas de deformações na fratura por flexão maiores às obtidas que podem chegar até aproximadamente 2 mm para compósitos (WANG et al., 2017).

Ao se comparar as Figuras 66 e 67 pode-se observar que as curvas descritas são inversamente senoidais, indicando uma relação entre a resistência à flexão e a deformação. Assim, quanto maior a resistência, menores são as deformações máximas no ensaio de flexão.

Figura 67 - Deflexão máxima dos compósitos não compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina.

○) Borracha de granulometria média.

▲) Borracha de granulometria grossa.

Comparando os resultados dos ensaios de compressão e flexão dos compósitos sem compatibilizar, observa-se que os valores de resistência à compressão são maiores que os da resistência à flexão; além disto, o comportamento dos resultados em conjunto das resistências mecânicas são diferentes ante os estímulos de compressão e flexão, fenômeno que pode ser causado pela morfologia alongada das partículas de borracha.

No caso da resistência à compressão, uma queda quase linear se apresenta com o aumento no teor de borracha, diferentemente da resistência à flexão, que descreve um aumento até aproximadamente 4% de massa e uma posterior queda com o aumento no teor de borracha. Assim, comparativamente a resposta do material na presença do agregado de borracha é melhor sob estímulos de tração por flexão do que sob estímulos de compressão axial.

5.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS COM DIFERENTES MÉTODOS DE COMPATIBILIZAÇÃO

O intuito desta etapa foi verificar qual a melhor metodologia de compatibilização. Para isso, foram caracterizados os compósitos compatibilizados com um teor fixo de borracha de 2%, que foi a porcentagem de carga com melhor desempenho, segundo o estudo da etapa 3, item 5.6 (Propriedades mecânicas de compressão e flexão dos compósitos sem compatibilizar) em uma faixa granulométrica fixada entre 3,38 e 2,38 mm, empregando as resinas epóxídica, fenol-formaldeído e poliéster como compatibilizantes. A faixa granulométrica da borracha foi fixada por causa de seu desempenho destacado e de sua baixa área superficial que afeta diretamente a quantidade de agentes compatibilizantes resinosos empregados para compatibilizar a interfase entre a borracha e a argamassa.

Além disso, foram variados os métodos de compatibilização com o intuito de estabelecer o melhor mecanismo de compatibilização, obtendo-se as resistências à compressão e flexão, as deformações máximas à compressão e flexão dos ensaios mecânicos de compressão e flexão, respectivamente.

O Quadro 11 descreve os métodos de compatibilização dos compósitos empregados na etapa 4 e as respectivas identificações.

Quadro 11 - Identificação dos métodos de compatibilização

MÉTODO DE COMPATIBILIZAÇÃO	SIGLA
Agregado de borracha impregnada com resina Epóxídica + Areia + Cimento	EAC
Agregado de borracha impregnada com resina Epóxídica + Areia	EA
Agregado de borracha impregnada com resina Epóxídica + Cimento	EC
Agregado de borracha impregnada com resina Fenol-formaldeído + Areia + Cimento	FAC
Agregado de borracha impregnada com resina Fenol-formaldeído + Areia	FA
Agregado de borracha impregnada com resina Fenol-formaldeído + Cimento	FC
Agregado de borracha impregnada com resina Poliéster + Areia + Cimento	PAC
Agregado de borracha impregnada com resina Poliéster + Areia	PA
Agregado de borracha impregnada com resina Poliéster + Cimento	PC
Argamassa com 2% de borracha sem aditivo compatibilizante	SA
Referência padrão (argamassa sem borracha e sem compatibilizantes)	RP

Fonte: Arquivo pessoal.

5.7.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Curvas tensão-deformação normalizadas dos compósitos de argamassa compatibilizados são apresentadas na Figura 68, mostrando em alguns casos, desempenho melhor do material em comparação à referência padrão (RP) em termos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformações para todos os compatibilizantes utilizados. Além disso, destaca-se uma diminuição das deformações, em termos gerais, para todos os mecanismos de compatibilização e para todos os aditivos resinosos em relação à referência padrão (RP).

Figura 68 - Curvas tensão-deformação típicas de ensaios de compressão dos materiais com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão;
□) Resina com cimento e areia;
○) Resina com areia;
▲) Resina com cimento.

A Figura 69 mostra os resultados de resistência à compressão dos compósitos de argamassa com 2% de carga de borracha processados com diferentes métodos de compatibilização. Nota-se que o desempenho dos compósitos com adição de resinas compatibilizantes melhora, na maioria dos casos, quando comparado com a referência sem adição de resina compatibilizante (SA). Além disso, alguns resultados de resistência à compressão podem ser equiparados à resistência da referência padrão (RP) que não tem adição de agregado de borracha. No caso da resina fenol-formaldeído nota-se que o método de interação do aditivo com a areia (FA) favorece notavelmente o desempenho da argamassa em relação aos outros dois métodos de compatibilização (FAC e FC). No caso

dos métodos de compatibilização empregando a resina poliéster, não se observam grandes diferenças entre suas respectivas resistências à compressão. Por outro lado, o método de compatibilização da resina epóxi e o cimento (EC) mostra melhores desempenhos quanto à resistência à compressão, além de manter um desvio padrão menor em relação aos outros métodos de compatibilização (EAC e EA).

A Figura 70 apresenta os resultados de deformação máxima pelo ensaio de compressão dos compósitos, empregando diferentes métodos de compatibilização. Os resultados nesta figura mostram deformações claramente menores para os compósitos com resina epoxídica (EAC, EA e EC) quando comparado com a referência padrão (RP) e com a mesma composição sem aditivo compatibilizante (SA). Além disso, podem-se observar deformações equiparáveis entre os compósitos compatibilizados com a adição da resina de poliéster insaturada (PAC, PA e PC), a referência padrão (RP) e a mesma composição sem aditivo compatibilizante. Os resultados da resistência à compressão e das deformações obtidas mostram melhores resultados com as compatibilizações de EC, PA e FA que serão empregadas na etapa 5.

Figura 69 - Resistência à compressão (fm') dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 70 - Deformação máxima à compressão dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

5.7.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Na Figura 71 são apresentadas as curvas normalizadas de tensão-deflexão dos compósitos, empregando diferentes métodos de compatibilização, em que se destaca algumas curvas com resistências à flexão similares à referência padrão (RP). Os resultados da resistência à flexão com diferentes métodos de compatibilização são apresentados na Figura 72.

O uso de resinas como aditivos de compatibilização não gera mudanças favoráveis na resistência à flexão, inclusive pode-se observar claramente que o compósito sem adição de resinas tem um maior desempenho quando comparado à referência padrão (RP). Por outro lado, observa-se que todos os compósitos possuem uma maior deformação; no entanto, menor resistência à flexão.

Figura 71 - Curvas tensão-deflexão típicas dos materiais com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão;
□) Resina com cimento e areia;
○) Resina com areia;
▲) Resina com cimento.

Na Figura 72 são apresentados os resultados de resistência à flexão dos compósitos com vários métodos de compatibilização, sendo que a seleção dos melhores métodos de compatibilização para estímulos de flexão respeita os mesmos critérios que foram abordados na análise do ensaio de compressão axial, item 5.7.1. A Figura 73 mostra os resultados de deformação máxima à flexão. É notório que as deformações aumentam levemente em quase todas as amostras compatibilizadas com relação à composição sem aditivos compatibilizantes (SA). Adicionalmente, observa-se que o desvio padrão da deformação diminui em relação à composição da referência padrão (RP), indicando um aumento de homogeneidade das amostras.

Os resultados obtidos dependem da capacidade de união entre os substratos a serem aderidos. No caso das composições de FA e PA é evidente que a capacidade de adesão dos aditivos e da areia é mais forte que dos mesmos aditivos com os outros substratos da argamassa, particularmente com o cimento. Por outro lado, os resultados da resina epóxidica mostra melhores propriedades mecânicas com a compatibilização com o substrato de cimento e suas respectivas fases que são predominantemente silicatos e aluminatos. Os resultados obtidos permitem selecionar os métodos mais adequados entre os mostrados no Quadro 11 para desenvolver a etapa 5, sendo os mais adequados os métodos de compatibilização mostrados no Quadro 12.

Figura 72 - Resistência à flexão (S_f) dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 73 - Deflexão máxima dos compósitos com diferentes métodos de compatibilização

Fonte: Arquivo pessoal.

Quadro 12 - Métodos selecionados para a etapa 5

Tipo de resina	Sigla	Método de mistura selecionada
Epóxidica	EC	Agregado de borracha impregnada com resina Epóxi+ Cimento
Fenol-Formaldeído	FA	Agregado de borracha impregnada com resina Fenol-formaldeído + Areia
Poliéster insaturado	PA	Agregado de borracha impregnada com resina Poliéster + Areia

Fonte: Arquivo pessoal.

5.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS

Foram caracterizados os compósitos compatibilizados em sua interfase (borracha-argamassa) com os três tipos de resinas (epoxídica, fenol-formaldeído e poliéster) com diferentes cargas de agregado polimérico, obtendo-se as resistências à compressão e flexão, as deformações máximas à compressão e flexão dos ensaios de compressão e flexão, respectivamente, e os módulos de elasticidades estáticos e dinâmicos obtidos a partir do ensaio de compressão, flexão e excitação por impulso flexional e torsional, mostrando propriedades mecânicas equiparáveis à referência padrão (RP) processada.

5.8.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Na Figura 74 são apresentadas curvas normalizadas de tensão-deformação dos ensaios de compressão dos compósitos de argamassa compatibilizados. Nota-se que existem várias curvas dos compósitos com propriedades equiparáveis às propriedades da referência padrão (RP) para os três aditivos compatibilizantes, entre elas está a resistência à compressão e o módulo de elasticidade por compressão. Verifica-se também que as curvas próximas à referência padrão (RP) que vai de 0 até aproximadamente 4 % de borracha mantêm algumas propriedades equiparáveis com a referência padrão (RP) como a resistência a compressão. No entanto, em teores de borracha acima de 4% todas as propriedades começam a diminuir gradualmente. Além disso, a Figura 74 mostra deformações menores à referência padrão (RP). Estes resultados podem ser causados pelos baixos níveis de deformação que oferece os termofixos empregados como aditivos compatibilizantes, diminuindo a porcentagem de deformação geral do compósito.

A Figura 75 mostra os resultados da resistência à compressão dos compósitos compatibilizados. Nota-se que existem várias composições equiparáveis com a referência padrão (RP) quando o teor de borracha no material é de até 2%. Para os compósitos compatibilizados com fenol-formaldeído, verifica-se que este limite sobe para 3% de borracha no compósito. Este resultado permite concluir que a compatibilização é efetiva quando comparada com os mesmos resultados dos compósitos sem compatibilizar (Figura 63).

Figura 74 - Curvas de tensão-deformação típicas de ensaios de compressão dos compósitos de argamassa compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão,

-) 1% de carga de agregado de borracha;
-) 2% de carga de agregado de borracha;
-) 3% de carga de agregado de borracha;
- ▲) 4% de carga de agregado de borracha;
- △) 6% de carga de agregado de borracha;
- ◆) 8% de carga de agregado de borracha;
- ◇) 10% de carga de agregado de borracha.

Assim, com até 3% de borracha no compósito ocorre funcionalização da borracha que atua como reforço no compósito de argamassa. Por outro lado, pode-se observar que os desvios padrão dos compósitos compatibilizados diminuem com relação aos compósitos não compatibilizados, indicando que as resinas poliméricas contribuem na estabilização dos defeitos que originam falhas no material durante cargas de compressão. No Apêndice H encontra-se a apresentação dos resultados da resistência à compressão junto com seus respectivos intervalos de confiança de 95%.

Figura 75 - Resistência à compressão (fm') dos compósitos compatibilizados com diferentes teores de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ●) Compósitos sem compatibilizar;

□) Resina Epóxica;

Δ) Resina Fenol-Formaldeído;

○) Resina Poliéster insaturada.

Figura 76 - Deformação máxima à compressão da argamassa compatibilizada

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ●) Compósitos sem compatibilizar;

□) Resina Epóxica;

Δ) Resina Fenol-Formaldeído;

○) Resina Poliéster insaturada.

Na Figura 76 são apresentados os resultados da deformação máxima obtidos a partir do ensaio de compressão dos compósitos compatibilizados. Destaca-se que estas deformações conservam as mesmas proporções que os compósitos sem compatibilizar (Figura 64) com exceção do compósito de 8% compatibilizado com resina epóxica, que obteve valores maiores para o mesmo compósito sem compatibilizar.

5.8.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Na Figura 77 são apresentadas curvas normalizadas representativas de tensão-deflexão. Nota-se como principais características que alguns compósitos possuem resistência à flexão equivalente ou maior à referência padrão (RP); além disso, a maior parte destes compósitos possui deformações maiores que a referência padrão (RP). Nota-se também que a partir de 3% de borracha no material a resistência diminui gradualmente e em contrapartida a deformação máxima aumenta.

Figura 77 - Curvas tensão-deflexão típicas dos ensaios de flexão dos compósitos compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Amostra padrão;

□) 1% de carga de agregado de borracha;

●) 2% de carga de agregado de borracha;

○) 3% de carga de agregado de borracha;

▲) 4% de carga de agregado de borracha;

△) 6% de carga de agregado de borracha;

◆) 8% de carga de agregado de borracha;

◇) 10% de carga de agregado de borracha.

Os resultados de resistência à flexão dos compósitos compatibilizados são apresentados na Figura 78. Observa-se que até aproximadamente 2% de borracha alguns compósitos conservam resistências equiparáveis à referência padrão (RP). Além disso, os

desvios padrões sofrem uma diminuição em relação às mesmas composições sem compatibilizar (Figura 66) indicando que, possivelmente, as resinas atuam como um agente estabilizador e homogeneizador dos defeitos que originam a falha no ensaio destrutivo. No Apêndice H encontra-se a apresentação dos resultados da resistência à flexão junto com seus respectivos intervalos de confiança de 95%.

Os resultados da deformação máxima por deflexão obtidos a partir do ensaio de flexão são apresentados na Figura 79. A deflexão dos compósitos compatibilizados não possui um padrão definido quando comparados aos compósitos não compatibilizados (Figura 67). Por outro lado, cabe destacar que a deflexão diminui, chegando a valores mínimos próximos de 0,40 mm, enquanto os compósitos não compatibilizados mostraram resultados próximos a 0,90 mm (Figura 67). A diminuição geral da deflexão dos compósitos compatibilizados pode ser causada pelas propriedades inerentes das resinas termofixas empregadas como compatibilizante, considerando que as deformações naturais deste tipo de polímero são baixas em relação a outros polímeros, atuando na argamassa como limitador de deformação em baixos níveis de tração.

Figura 78 - Resistência à flexão (S_f') dos compósitos compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ●) Compósitos sem compatibilizar;

□) Resina Epóxidica;

Δ) Resina Fenol-Formaldeído;

○) Resina Poliéster insaturada.

Figura 79 - Deformação máxima à flexão dos compósitos de argamassa compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ●) Compósitos sem compatibilizar;

□) Resina Epóxidica;

△) Resina Fenol-Formaldeído;

○) Resina Poliéster insaturada.

5.9 MÓDULOS DE ELASTICIDADE

5.9.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR

A Figura 80 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dos compósitos sem compatibilizar e com as três diferentes faixas granulométricas do agregado de borracha. A característica geral em todos os módulos de elasticidade é a queda das propriedades com o aumento nos teores de carga de agregado polimérico. No entanto, nos módulos de elasticidade por flexão e por excitação por impulso torsional tem-se um leve aumento e posteriormente uma queda gradual com o aumento do teor da carga de agregado de borracha. Além disso, a Figura 80 mostra, comparativamente, a diferença de escalas entre os módulos de elasticidade, sendo maiores as escalas dos módulos dinâmicos e manifestando-se em menor escala nos módulos de elasticidade quase estáticos.

Figura 80 - Módulos de elasticidade obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Módulo de elasticidade por compressão;

B) Módulo de elasticidade por flexão;

C) Módulo de elasticidade por excitação por impulso flexional;

D) Módulo de elasticidade por excitação por impulso torsional.

■) Borracha de granulometria fina.

○) Borracha de granulometria média.

▲) Borracha de granulometria grossa.

Ao analisar os resultados da Figura 80 pode-se observar que todos os módulos de elasticidade possuem uma faixa que pode ser equiparável à referência padrão (RP) ou casos em que o módulo de elasticidade pode chegar a ser superior comparado com a referência padrão (RP) que não possui carga de agregado polimérico. No Apêndice H encontram-se a apresentação dos resultados dos módulos de elasticidade junto com seus respectivos intervalos de confiança do 95%.

5.9.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS

A Figura 81 apresenta resultados obtidos dos módulos de elasticidade quase estáticos e dinâmicos dos compósitos compatibilizados. Várias características podem ser observadas entre estes módulos como, por exemplo, a diferença de escalas entre os dois tipos de módulos de elasticidade. Como era de se esperar, os módulos de elasticidade dinâmicos mostram-se com valores maiores que os módulos de elasticidade estáticos por causa da velocidade dos ensaios em questão.

O tempo dos ensaios mecânicos que fornecem os módulos de elasticidade quase estáticos é de alguns segundos até alguns minutos e a metodologia do teste integra diversos fatores que são relacionados com mecanismos inelásticos macromoleculares e defeitos no material que limita física e matematicamente os resultados ideais dos materiais. Por outro lado, os ensaios que fornecem os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos podem ser considerados como um resultado instantâneo que é determinado pela detecção de sinais e de propagação de vibrações em forma de ondas que dependem do comportamento viscoelástico da velocidade de dispersão e da energia de dissipação vibracional, tendo um tempo de duração de teste próximo a frações de segundo e integra características microestruturais que fornecem resultados mais próximos a um material ideal sem ser seriamente alterado por defeitos internos ou defeitos de processamento (MASHINSKY, 2003). Possíveis discrepâncias entre os diferentes módulos de elasticidade podem depender da velocidade do estímulo em que está sendo submetido um determinado material ou pela quantidade de defeitos que possa possuir determinado material.

Além disto, os módulos de elasticidade quase estáticos de vários compósitos com cargas de borracha de até 3%, no caso de módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão, e de 2% de carga de borracha, no caso do módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão, possuem módulos quase estáticos similares à referência padrão (RP). Estas características permitem manter parâmetros de desenho similares aos empregados nas argamassas tradicionais.

Mesmo fenômeno é observado com os módulos de elasticidade dinâmico flexional e torsional, com teores de borracha acima de 3%, que diminuem gradualmente. No Apêndice H encontram-se a apresentação dos resultados da resistência à flexão junto com seus respectivos intervalos de confiança do 95%.

Figura 81 - Módulos de elasticidade dos compósitos compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Módulo de elasticidade por compressão.

B) Módulo de elasticidade por flexão.

C) Módulo de elasticidade por excitação por impulso flexional.

D) Módulo de elasticidade por excitação por impulso torsional

■ Resina Epóxídica.

○ Resina Fenol-Formaldeído.

▲ Resina Poliéster insaturada.

A Figura 82 mostra os espectros de frequência vs amplitude da referência padrão (RP) e do compósito com 10% de agregado de borracha sem compatibilizar, indicando os picos das frequências naturais de vibração relacionadas com os módulos de elasticidade dinâmicos de excitação por impulso flexional e torsional. No Apêndice G encontram-se algumas imagens da configuração e dos resultados típicos do ensaio no software Sonelastic 3.0®. Nota-se que os picos que definem os módulos de elasticidade dinâmicos sofrem deslocamentos para valores de frequências mais baixas e os valores relativos da amplitude também sofrem quedas significativas com a adição do agregado de borracha, indicando que o agregado de borracha atua como dissipador de energia na propagação de ondas vibracionais ao longo do material compósito em escalas de até aproximadamente 20.000 Hz, que representam sons altos e/ou agudos.

Figura 82 - Espectros de frequências vs amplitude gerados pelo programa Sonelastic 3.0

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Espectro da referência padrão (RP).

B) Espectro do compósito com 10% de granulometria fina sem compatibilizar

O fenômeno de dissipação de energia vibracional se encontra estreitamente relacionada com a massa específica aparente, considerando que quanto mais denso o material, mais favorável é a propagação de vibrações ao longo do material. No caso de materiais compósitos, a soma de todos seus constituintes afeta de forma positiva ou negativa a dissipação da energia vibracional. Este fenômeno físico permitiria o possível uso deste material em aplicações de amortização de vibrações como é o caso de isolantes

acústicos ou materiais resistentes a trepidações causados pela transmissão de diversos tipos de vibrações.

5.10 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA (DMTA)

5.10.1 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR

A Figura 83 ilustra os resultados dos fatores de perda (Tan delta) dos compósitos sem compatibilizar em diferentes frequências. Nota-se que os picos gerados na curva dos compósitos perdem intensidade com a adição do agregado de borracha, enquanto a curva da referência padrão (RP) mostra uma maior amplitude de valores, indicando que a energia mecânica aplicada nos compósitos é dissipada de forma mais homogênea em toda a faixa de temperatura avaliada.

Figura 83 - Fatores de perda (Tan de delta) dos compósitos sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Tan Delta a 1.0 Hz;

B) Tan Delta a 16.6 Hz e

C) Tan Delta a 25.0 Hz.

(--) Referência Padrão;

(-- blue) 2% de carga de borracha Granulometria Fina;

(-- red) 2% de carga de borracha Granulometria Media;

(-- green) 2% de carga de borracha Granulometria Grosseira.

Já o módulo de armazenamento (E'), que está relacionado com a capacidade elástica do material, apresenta uma diminuição do valor para os compósitos em todas as frequências empregadas (Figura 84), sobretudo nos compósitos contendo borracha com granulometria fina e média. Esta diminuição dos módulos de armazenamento indica uma menor rigidez dos compósitos quando submetidos a regimes de baixa deformação mecânica cíclica ao serem comparados com a referência padrão (RP). Deve-se destacar que esta mudança acontece nos compósitos com teores de apenas 2% de borracha adicionada na argamassa. Além disso, esta característica é conservada em todo o programa de temperatura empregado (-20 a 60 °C).

Figura 84 - Módulo de armazenamento (E') dos compósitos sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Módulo de armazenamento a 1.0 Hz;

B) Módulo de armazenamento a 16.6 Hz;

C) Módulo de armazenamento a 25.0 Hz.

(--) Referência Padrão;

(--) 2% de carga de borracha Granulometria Fina;

(--) 2% de carga de borracha Granulometria Média;

(--) 2% de carga de borracha Granulometria Grosseira.

5.10.2 ANÁLISE TERMO-DINÂMICO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS

Os resultados de fator de perda (Tan delta) dos compósitos compatibilizados são apresentados na Figura 85. Nota-se o mesmo fenômeno observado na Figura 83; no entanto, a dissipação da energia mecânica nos compósitos compatibilizados é mais discreta. Nos resultados de módulo de armazenamento dos compósitos compatibilizados (Figura 86) verifica-se que não há mudanças consideráveis nos materiais contendo teor de 2% de borracha em comparação a argamassa sem a presença de borracha. Entretanto, as mudanças são evidentes nos compósitos com teores de 8% de carga de borracha. Assim, o efeito de compatibilização promovido pelas resinas termorrígidas conduz a um comportamento dinâmico-mecânico dos compósitos com baixos teores de borracha mais próximo ao da argamassa sem a presença de borracha.

Figura 85 - Fatores de perda (Tan de delta) dos compósitos compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Tan Delta a 1.0 Hz;

B) Tan Delta a 16.6 Hz;

C) Tan Delta a 25.0 Hz.

(--) Referência Padrão;

(-- magenta) Compósito 2% de borracha compatibilizada com resina epóxi;

(-- ciano) Compósito 2% de borracha compatibilizada com resina fenol formaldeído;

(-- azul) Compósito 2% de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada;

- (--) Compósito 8% de borracha compatibilizada com resina fenol formaldeído;
 (---) Compósito 8% de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada.

Figura 86 - Módulo de armazenamento (E') dos compósitos compatibilizados

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) Módulo de armazenamento a 1.0 Hz;

B) Módulo de armazenamento a 16.6 Hz;

C) Módulo de armazenamento a 25.0 Hz.

(--) Referência Padrão;

(---) Compósito 2% de carga de borracha compatibilizada com resina epóxi;

(- - -) Compósito 2% de carga de borracha compatibilizada com resina fenol formaldeído;

(- - -) Compósito 2% de carga de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada;

(- - -) Compósito 8% de carga de borracha compatibilizada com resina fenol formaldeído;

(- - -) Compósito 8% de carga de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada.

Os resultados obtidos de DMTA sugerem o potencial deste tipo de compósito em aplicações onde for importante o isolamento de vibrações acústicas de baixa frequência como é o caso de sons baixos ou graves. Ao se analisar em conjunto os resultados das análises termo-dinâmico mecânico e das análises de módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos verifica-se o potencial dos compósitos em dissipar ou não absorver energia vibracional que pode ser explorado em aplicações acústicas ou vibracionais.

5.11 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

5.11.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS COMPÓSITOS SEM COMPATIBILIZAR

As micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos de argamassa com agregado de borracha são apresentadas nas Figuras 87 a 90. Estas imagens foram tomadas das superfícies geradas pela fratura durante os ensaios de compressão. Na Figura 87 pode-se visualizar a argamassa de referência preparada sem adição de borracha, em que é possível distinguir as diferentes fases da argamassa, sendo o agregado fino (areia) e matriz cimentícia (cimento curado).

Figura 87 - Micrografia obtida por MEV de argamassa sem agregado de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Por outro lado, na Figura 88 observa-se a micrografia obtida por MEV da amostra com 2% de agregado de borracha, podendo-se assim distinguir as três fases do compósito, sendo elas a fase cimentícia, o agregado fino (areia) e o agregado de borracha em baixa proporção. A Figura 89 apresenta a imagem de MEV do compósito contendo 10% de borracha. Neste caso observam-se características morfológicas similares ao da composição com 2% de borracha (Figura 88), no entanto, com maior presença do agregado de borracha.

A distinção morfológica entre a fase dispersa polimérica e a matriz cerâmica foi feita com base nas características típicas de falha de ambos os materiais. A fração polimérica apresenta alto grau de deformação que no caso do material estudado pode possuir este atributo morfológico devido a pré-tratamentos prévios ao processamento ou ter obtido esta característica durante os tratamentos e/ou ensaios do material deste projeto.

Por outro lado, as características morfológicas das superfícies das falhas da argamassa se apresentam com superfícies rugosas na fase cimentícia e totalmente lisa na fratura do agregado (areia), assim mesmo é possível visualizar na argamassa regiões com poros.

Figura 88 - Micrografia obtida por MEV de argamassa com agregado de borracha com teor de 2% em massa de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 90 mostra a micrografia de MEV do compósito com 10% de agregado grosseiro de borracha sem compatibilizar, focando a região de falha interfacial entre o agregado de borracha e a argamassa. É possível visualizar uma pobre aderência e espaços vazios gerados pelo deslocamento da borracha na argamassa.

Este deslocamento provavelmente induz à propagação de trincas, desencadeando a falha do material. Além disso, a probabilidade de se apresentar estes tipos de falhas aumenta com o aumento do teor de borracha na argamassa, o que justifica a queda nas

propriedades mecânicas com o aumento no teor de agregado de borracha adicionado na matriz da argamassa.

Figura 89 - Micrografia obtida por MEV de argamassa com agregado de borracha. Teor 10% em massa de borracha

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 90 - Micrografia MEV da falha da interface borracha-argamassa

Fonte: Arquivo pessoal.

5.11.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS COMPÓSITOS COMPATIBILIZADOS

A Figura 91 mostra micrografias de MEV dos compósitos de argamassa com agregado de borracha, compatibilizados com resina epoxídica, revelando diferentes características morfológicas vinculadas à compatibilização das frações poliméricas e cerâmicas do compósito.

Nas Figura 91A a 91D dos compósitos contendo 2% em massa de borracha observa-se a existência de um grau de aderência entre o agregado polimérico de borracha e a fração cerâmica da argamassa devido ao total envolvimento do agregado de borracha pela fração cerâmica e não se observa trincas interfaciais tais como observado no compósito não compatibilizado (Figura 90). Características similares se apresentam nas micrografias dos compósitos contendo 3% de borracha (Figura 91E a 91G).

Nos compósitos contendo 4% de borracha (Figuras 91H a 91J) pode-se observar finas camadas que recobrem a borracha e posteriormente um vazio que representa um poro, indicando que o método de compatibilização permite recobrir e aderir a fração cerâmica nos contornos da borracha.

A princípio, não deveria existir vazios ou poros em contato direto com o agregado de borracha, pelo fato deste estar encapsulado pela resina e recoberto pela fração cerâmica. A literatura consultada relata que, no caso dos compósitos sem compatibilizar, pelo caráter natural apolar da borracha, ocorre deposição e adesão de ar nos contornos superficiais do agregado de borracha em estado fresco e endurecido da argamassa, contribuindo para falha do material (FEDROFF; AHMAD; SAVAS, 1996; KHATIB; BAYOMY, 1999).

Nas Figura 91K e 91L observa-se um padrão que sugere a quebra do agregado de polímero, fenômeno que não foi observado nos compósitos sem compatibilizar (Figuras 88 a 90), considerando que se apresentam bordas na argamassa com formas que aparentam prolongações dos contornos do agregado de borracha; além disso, as superfícies desses agregados de borrachas mostram superfícies estriadas que podem ser do material sendo rasgado. Este comportamento pode indicar que a borracha compatibilizada serve de reforço no compósito.

A micrografia da Figura 91M confirma a presunção de reforço, mostrando um agregado de borracha parcialmente rasgado e com frações de argamassa aderidas aos contornos do agregado de borracha. Finalmente, na Figura 91N, se mostra uma falha próxima ao contorno da borracha compatibilizada, indicando que existem forças de adesão

suficientes entre a borracha-resina-fração da argamassa para funcionalizar a borracha como reforço, confirmando os resultados dos diferentes ensaios mecânicos.

Figura 91 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina epóxídica

Continua

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) 2% de carga de borracha 100x;
 B) 2% de carga de borracha 150x;
 C) 2% de carga de borracha 350x;
 D) 2% de carga de borracha 1.0kx;
 E) 3% de carga de borracha 80x;
 F) 3% de carga de borracha 100x;
 G) 3% de carga de borracha 1.0kx;
 H) 4% de carga de borracha 1.8kx;
 I) 4% de carga de borracha 800x;
 J) 4% de carga de borracha 150x;
 K) 4% de carga de borracha 250x;
 L) 4% de carga de borracha 150x;
 M) 6% de carga de borracha 100x;
 N) 6% de carga de borracha 200x.

Na Figura 92 são apresentadas micrografias de MEV dos compósitos de argamassa com agregado de borracha compatibilizado com resina fenol-formaldeído. Nota-se que muitas características descritas da Figura 91, se apresentam na Figura 92 como o total envolvimento do agregado polimérico por parte da fração de argamassa (Micrografias 91A a 91E); notam-se também diversas imagens em que a borracha está envolvida por uma fina camada interfacial da resina fenol-formaldeído (Micrografias 91F a 91L).

Além disso, a micrografia 91D mostra características de uma possível separação do agregado derivada da falha da borracha, e contornos de possíveis prolongamentos próximos ao agregado que se assemelham à forma do agregado polimérico, indicando que a compatibilização funcionaliza a borracha como reforço.

Figura 92 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina Fenol-formaldeído

Continua

Continuação

Continua

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota:

- A) 1% de carga de borracha 200x;
- B) 2% de carga de borracha 100x;
- C) 3% de carga de borracha 100x;
- D) 3% de carga de borracha 100x;
- E) 3% de carga de borracha 200x;
- F) 4% de carga de borracha 1.0kx;
- G) 4% de carga de borracha 4.0kx;
- H) 4% de carga de borracha 150x;
- I) 4% de carga de borracha 120x;
- J) 4% de carga de borracha 200x;
- K) 8% de carga de borracha 80x;
- L) 8% de carga de borracha 800x.

As micrografias de MEV dos compósitos de argamassa com borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada são apresentadas na Figura 93. Verificam-se características similares às Figuras 91 e 92 em relação à adesão dos contornos da borracha pela fração cerâmica da argamassa, funcionalizando o agregado de borracha como reforço (Micrografia 92C) e possíveis fraturas do agregado de borracha que mostra contornos da argamassa que parecem ter continuidade nas formas do agregado de borracha (Micrografias 92A a 92F).

Adicionalmente, é importante destacar que, mesmo a borracha sendo funcionalizada com os compatibilizantes resinosos (resinas epóxidica, fenol-formaldeído e poliéster insaturada), a fração polimérica é uma das principais responsáveis pela geração de falhas mecânicas nos compósitos compatibilizados estudados. Esta afirmação parte da análise das micrografias de MEV (Figuras 91, 92 e 93) que mostram diversas superfícies de agregado de borracha livres das suas respectivas camadas de aditivo compatibilizante e as propriedades mecânicas que mostram quedas a partir de determinados teores de polímero adicionado na argamassa. Estes resultados devem-se às diferenças entre as forças de

coalescência entre os ligantes cimentícios e poliméricos empregados, que na prática são maiores nos ligantes cerâmicos cimentícios.

Figura 93 - Micrografias de MEV de argamassa com agregado de borracha compatibilizada com resina poliéster insaturada

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: A) 2% de carga de borracha 200x;
 B) 4% de carga de borracha 60x;
 C) 4% de carga de borracha 80x;
 D) 4% de carga de borracha 100x;
 E) 6% de carga de borracha 50x;
 F) 6% de carga de borracha 50kx.

5.12 ANÁLISE ELEMENTAR POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

A Figura 94 apresenta a micrografia e a região analisada por EDS da argamassa, enquanto que na Figura 95 e na Tabela 25 são apresentados o espectro de EDS e os resultados da composição química obtidos por meio da análise semiquantitativa de EDS da argamassa sem adição de borracha ou compatibilizantes. A análise foi feita em uma área de imagem com largura de 1,968 mm de argamassa livre de borracha.

Como previamente relatado, todas as amostras contam com o mesmo traço de areia e cimento, sendo que a carga de borracha é incorporada de maneira progressiva nas composições. Desta forma, as regiões livres de borracha possuem a mesma composição química em todos os materiais. Tendo em vista as matérias-primas para a produção de argamassas, pode-se observar a presença de oxigênio, silício, cálcio, alumínio, potássio e magnésio.

Nota-se que o oxigênio é o elemento com maior conteúdo em massa (59%), seguido do silício com 20% e cálcio com 14%, aproximadamente, que devem estar na argamassa na forma de óxidos, silicatos e compostos com cálcio. Estas proporções foram praticamente constantes para todos os compósitos com borracha, sem borracha, compatibilizados e sem compatibilizar na fração que não possuía fases poliméricas.

A Figura 96 apresenta a micrografia e a região analisada por EDS, da argamassa, enquanto na Figura 97 e na Tabela 26 são apresentados o espectro de EDS e os resultados da composição química, respectivamente, obtidos por meio da análise semiquantitativa de EDS do agregado de borracha. A análise foi feita em uma área de análise com largura de aproximada de 0,312 mm.

A análise permitiu identificar o agregado de borracha, obtendo teores aproximados de elementos da borracha e de elementos das cargas adicionadas tradicionalmente à borracha, como é o caso do silício que é tradicionalmente usado como reforço, o enxofre, amplamente utilizado para o processo de vulcanização, e o zinco que é comumente empregado como pigmento ou aditivador e acelerador do mesmo processo de vulcanização.

Figura 94 - Micrografia da região analisada por EDS do compósito de argamassa

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 95 - Espectro de microanálise de composição por EDS do compósito da argamassa

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 25 - Análise elementar por EDS do compósito de argamassa

Elemento	Massa %	Atômico %
Oxigênio	58.810	73.573
Silício	20.563	14.654
Cálcio	13.979	6.981
Alumínio	4.054	3.007
Magnésio	1.468	1.209
Potássio	1.126	0.576

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 96 - Micrografia da região analisada por EDS do agregado de borracha no compósito

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 97 - Espectro de microanálise de composição por EDS do agregado de borracha no compósito

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 26 - Análise elementar por EDS do agregado de borracha

Elemento	Massa %	Atômico %
Carbono	79.629	86.364
Oxigênio	13.658	11.121
Cálcio	1.938	0.630
Silício	1.762	0.817
Enxofre	1.232	0.501
Zinco	1.030	0.205
Alumínio	0.751	0.363

Fonte: Arquivo pessoal.

5.13 MASSA ESPECÍFICA APARENTE

A Figura 98 mostra alguns corpos de prova empregados para realizar os ensaios para determinação da massa específica aparente dos compósitos estudados incluindo os compatibilizados e sem compatibilizar. Uma característica interessante é a mudança de cor em algumas composições, como é o caso dos compósitos compatibilizados com resina fenol-formaldeído que adquire uma coloração avermelhada.

Figura 98 - Fotografia de amostras utilizadas para determinação da massa específica aparente

Fonte: Arquivo pessoal.

Os resultados da massa aparente dos compósitos de argamassa sem compatibilizar são apresentados na Figura 99. Observa-se uma redução progressiva da massa aparente com o aumento do teor mássico do agregado de borracha. Este fenômeno pode ser explicado como um efeito da adição do agregado de borracha que possui massa específica muito menor ($1,04 \text{ g/cm}^3$) que dos outros constituintes da argamassa (Apêndice C), provocando uma redução geral do compósito.

Por outro lado, o volume de espaço de poros permeáveis, mostrado na Figura 100, aumenta em função do teor crescente de agregado de borracha, indicando que o teor de borracha modifica o volume do espaço de poros permeáveis, possivelmente por causa da falta de interação molecular entre a fração polimérica e cerâmica que permite a infiltração de ar nos contornos do agregado de borracha.

É interessante notar que o volume de espaço de poros permeáveis tem um comportamento inversamente proporcional à resistência à flexão destes compósitos (Figura 66), demonstrando uma vez mais a relação entre a massa específica com diversas propriedades.

Portanto, ao considerar que o volume do espaço de poros tem uma influência direta na massa específica, se torna lógico que o aumento de porosidades, que são considerados concentradores de tensão, aumente a nucleação e propagação de trincas, levando à falha do material prematuramente.

Figura 99 - Massa específica aparente dos compósitos de argamassa sem compatibilizar

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina;

○) Borracha de granulometria média;

▲) Borracha de granulometria grossa.

Figura 100 - Volume de espaço de poros permeáveis dos compósitos sem compatibilizar

Forte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Borracha de granulometria fina;
 ○) Borracha de granulometria média;
 ▲) Borracha de granulometria grossa.

Nas Figura 101 e 102 são apresentados os resultados da massa específica aparente e o volume de espaço de poros permeáveis, respectivamente, dos compósitos compatibilizados. Observa-se que as massas específicas aparentes dos compósitos compatibilizados são menores que dos compósitos não compatibilizados (Figura 99), adicionalmente se observa uma inclinação da função da massa específica com maior redução nos compósitos compatibilizados. Este comportamento deve ser resultante da adição proporcional dos aditivos resinosos em relação ao teor do agregado de borracha e sua respectiva área superficial compatibilizada, sendo importante ressaltar que os aditivos possuem menor massa específica que a argamassa.

Por outro lado, o volume de espaço de poros permeável mostra diferenças substanciais em relação aos compósitos compatibilizados e não compatibilizados (Figuras 99 e 102), sendo representativamente maiores para os compósitos compatibilizados. Este resultado pode ser devido à produção de voláteis gerados durante a cura dos aditivos

compatibilizantes resinosos, que permanecem e são interconectados durante o processamento e cura dos compósitos de argamassa.

Figura 101 - Massa específica aparente dos compósitos de argamassa compatibilizados

Forte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Resina Epóxidica;
○) Resina Fenol-Formaldeído;
▲) Resina Poliéster insaturada.

Durante processos de cura com ou sem aplicação de tratamentos térmicos, diversos polímeros podem produzir emissões de compostos orgânicos voláteis, produtos de combustão como CO, CO₂, NO_x, SO_x ou material particulado (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1994).

As reações de cura de resinas termorrígidas podem liberar diversos voláteis. No caso da resina fenol formaldeído, a liberação de água na forma de vapor acontece na faixa de temperatura de 70 a 80°C. Estes gases podem escapar pelos poros gerados no processo de cura do material polimérico (LINKE, 2016), resultando em possível geração de porosidade aberta e interconectada.

Figura 102 - Volume de espaço de poros permeáveis de compósitos compatibilizados

Forte: Arquivo pessoal.

Nota: ■) Resina Epóxidica;
○) Resina Fenol-Formaldeído;
▲) Resina Poliéster insaturada.

6 ANÁLISE DE CUSTOS DE PRODUÇÃO

A análise de custos foi desenvolvida com os valores representativos para a produção e processamento dos materiais estudados com a metodologia empregada e os equipamentos descritos no documento. Foram considerados os custos de insumos e matérias-primas e os custos energéticos para operação dos equipamentos utilizados para o processamento dos compósitos. O valor representativo de consumo de energia foi baseado nas tarifas energéticas cobradas na cidade de Lorena-SP. Para a análise de custos de processamento não foram consideradas os custos de mão-de-obra, nem os custos por desgaste de equipamentos. Na Tabela 27 são apresentados os valores unitários empregados como base para o cálculo de análise de custos de produção.

Tabela 27 - Preços unitários empregados como base de cálculo dos custos gerais

	Item	Quantidade/Unidade	Unidade de Medida (UM)	Preço por unidade (R\$/UM)	Preço por quilograma
	Cimento	50	kg	R\$ 30,00	R\$ 0,60
	Areia	20	kg	R\$ 3,19	R\$ 0,16
	Água	1000	L	R\$ 2,53	R\$ 0,002532
Insumos	Borracha	1	kg	R\$ -----	R\$ -----
	R. Epóxidica	1	kg	R\$ 24,90	R\$ 24,90
	R. Fenol Formaldeído	1	kg	R\$ 23,90	R\$ 23,90
	R. Poliéster	1	kg	R\$ 25,90	R\$ 25,90
Consumo energético	Peneiração	0,55	kWh	R\$ 0,03	
	Estufa	1,44	kWh	R\$ 0,07	
	Misturador	0,12	kWh	R\$ 0,01	

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 103 são apresentados os custos em Reais (R\$) por quilograma de compósito de argamassa processada. É importante destacar que estes valores representam o custo de processamento para o presente trabalho. O desenvolvimento deste mesmo material em grande escala apresentaria diminuições significativas em relação aos custos apresentados. Além disso, cabe destacar que os compósitos sem compatibilizar têm uma queda nos custos do material por causa da adição de um passivo ambiental que não possui cotação monetária inicial. Por outro lado, observa-se o aumento nos custos no material processado para os compósitos compatibilizados, aumentando linearmente por causa do

aumento na quantidade de aditivo compatibilizante adicionado em função da quantidade de agregado de borracha no compósito.

Os compósitos de argamassa com borracha compatibilizada com as resinas epoxídica, fenol-formaldeído e poliéster insaturada possuem um alto potencial comercial e de aplicação, considerando os resultados custo-benefício. Por outro lado, ao serem empregados estes produtos no setor civil podem ser obtidos benefícios específicos relacionados com isolamento acústico, resistência mecânica de compressão e flexão e dissipação de energia absorvida.

Figura 103 - Custos do material processado.

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: ●) Compósitos sem compatibilizar;
 □) Compósitos com resina epoxídica;
 △) Compósitos com resina Fenol-Formaldeído;
 ○) Compósitos com resina Poliéster insaturada.

7 CONCLUSÕES

Baseando-se nas propriedades apresentadas pelos compósitos de argamassa com borracha em presença das resinas epoxídica, fenol-formaldeído e poliéster insaturada, verificou-se a ocorrência de compatibilização interfacial entre a borracha e a argamassa causada por estas resinas termorrígidas, gerando materiais compósitos com potencial de uso em aplicações específicas. No geral, a incorporação das resinas fenol-formaldeído e poliéster insaturada produziram melhor desempenho das propriedades dos compósitos quando comparadas ao aditivo compatibilizante epoxídico.

O uso da borracha em diferentes faixas granulométricas não provoca mudanças consideráveis nas propriedades dos compósitos, de modo que a utilização do resíduo de borracha de pneu dispensa etapas prévias de segregação do material por tamanho de partículas ou processos de moagem e trituração do resíduo de borracha, antes da incorporação na argamassa.

Dependendo da propriedade de interesse para a aplicação da argamassa, é possível incorporar o resíduo de borracha em teores de 3 a 4% em massa no material, mesmo na ausência dos aditivos compatibilizantes, sem afetar a qualidade ou até melhorando o desempenho de propriedades mecânicas da argamassa, levando a uma alternativa para o consumo dos resíduos de borracha.

No preparo dos compósitos de argamassa com borracha é fundamental ter um controle do teor de água no traço do material, uma vez que conteúdos de água acima 0,8% em massa podem levar a um efeito de segregação crítico do agregado de borracha.

A capacidade dos compósitos de argamassa com borracha em dissipar energia vibracional em baixas deformações, denota o grande potencial deste tipo de material em aplicações que necessitam de amortecimento acústico ou vibracional.

O uso de cargas de borrachas oriundas de rejeitos de pneu em argamassas mostra-se viável a nível econômico e exequível para aplicações especiais. Do mesmo modo, o presente estudo apresenta informações que podem contribuir para a busca de alternativas para a reciclagem e redução dos resíduos de borracha que se enquadram como um passivo ambiental.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in Polymer Science**, v. 25, n. 7, p. 909–948, 2000.
- AIELLO, M. A.; LEUZZI, F. Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. **Waste Management**, v. 30, n. 8–9, p. 1696–1704, 2010.
- ALBANO, C. et al. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. **Waste Management**, v. 29, n. 10, p. 2707–2716, 2009.
- ALEXANDER, M. **Aggregates in concrete**. 1st. ed. New York: Taylor & Francis, 2010.
- ALMQVIST, E. **History of industrial gases**. Springer Science & Business Media, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C348**. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. West Conshohocken, 1998. v. 04
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C469**. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, 2002. v. 04
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D724 - 99**. Standard Test Method for Surface Wettability of Paper (Angle-of-Contact Method). West Conshohocken, 2003. v. D724
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1609**. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). West Conshohocken, 2005. v. i
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C642-06**. Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C294 – 98**. Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates. West Conshohocken, 2014a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C215**. Standard test method for fundamental transverse , longitudinal , and torsional resonant frequencies of concrete specimens. West Conshohocken, 2014b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C136M–14**. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, 2016a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109/C109M – 16**: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, 2016b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C305 – 14**. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. West Conshohocken, 2016c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, 2016d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C778 – 13**. Standard Specification for Standard Sand. West Conshohocken, 2016e.

ANSON, M. An investigation into a hypothetical deformation and failure mechanism for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 16, n. 47, p. 73–82, 1964.

ASARO, L. et al. Recycling of rubber wastes by devulcanization. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 250–262, November, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5735**. Cimento Portland de alto-forno. São Paulo, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. São Paulo, 2009.

ATAHAN, A. O.; YÜCEL, A. Ö. Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 617–622, 2012.

AZIZ, F. N. A. A. et al. A Comparative Study of the Behaviour of Treated and Untreated Tyre Crumb Mortar with Oil Palm Fruit Fibre Addition. **Pertanika Journal of Science & Technology**, v. 25, n. 1, p. 101–120, 2017.

BALAH, M. M.; BADAWY, A. A. M.; HASHISH, M. Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, v. 14, n. 6, p. 427–435, 2007.

BERA, A. et al. Adsorption of surfactants on sand surface in enhanced oil recovery: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies. **Applied Surface Science**, v. 284, p. 87–99, 2013.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67–73, 2012.

BIEL, T.; LEE, H. Magnesium oxychloride cement concrete with recycled tire rubber. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1561, p. 6–12, 1996.

BIGNOZZI, M. C.; SANDROLINI, F. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 735–739, 2006.

BOWEN, R. M.; MARK, H. F. **Encyclopedia of polymer science and engineering**. New York: Wiley Online Library, 1989.

BRASIL. Congresso. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010.** Política nacional de resíduos sólidos, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 14 jan. 2016.

BRITO, J. et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1–16, 2016.

BRYDSON, J. A. **BRYDSON, John Andrew (Ed.).** Rubbery materials and their compounds. [s.l.] Springer, 1988.

CABRERA, F. G. et al. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain. **Materials**, v. 9, n. 12, p. 1–24, 2016.

CAETANO, M. J. L. **Ciência e da Tecnologia da Borracha. O que é um pneu.** Disponível em: http://ctborracha.com/?page_id=8919. Acesso em: 4 dez. 2016.

CAIRNS, R.; KENNY, M. J. The use of recycled rubber tyres in concrete. In: **The use of recycled rubber tyres in concrete. Used/post-consumer Tyres.** Londres: Thomas Telford, 2004. p. 135.

CARASEK, H. **The use of recycled rubber tyres in concrete.** São Paulo: IBRACON, 2010.

CATALDO, F. Guayule rubber: A new possible world scenario for the production of natural rubber? **Progress in rubber and plastics technology**, v. 16, n. 1, p. 31–59, 2000.

CBIC. **Consumo anual de cimento - por UF, Grandes Regiões e Total Brasil.** Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>. Acesso em: 24 out. 2016.

CHEN, S. J. et al. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the pyrolysis of scrap tires. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 6, p. 1209–1220, 2007.

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 União, 2009. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>. Acesso em: 24 jan. 2017.

CORNISH, K. Similarities and differences in rubber biochemistry among plant species. **Phytochemistry**, v. 57, n. 7, p. 1123–1134, 2001.

CRUZ, T. T. **Caracterização de depósitos de areia da bacia sedimentar de taubaté para a fabricação de vidros.** 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011.

CYBÈLE, C. S. **Argamassas tradicionais de cal.** Salvador: Scielo Books, 2007.

DALL, A. **Estudo do desempenho mecânico e térmico de compostos de borracha natural (NR) de diferentes clones.** 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

DAY, K. E. et al. Toxicity of leachate from automobile tires to aquatic biota. **Chemosphere**, v. 27, n. 4, p. 665–675, 1993.

DELVA, L. et al. **The use of rubber as a compatibilizer for injection moulding of recycled post-consumer mixed polyolefines**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE WASTES: SOLUTIONS, TREATMENTS AND OPPORTUNITIES, 2. Anais...Braga: CVR, 2013.

DOMINIC, B.; FEIREISL, E.; HOFMANOVÁ, M. Stochastically Forced Compressible Fluid Flows: **Navier-Stokes Equations with Stochastic Driving Forces**. 3. ed. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018.

DOWSON, D.; HIGGINSON, G. R. Elasto-hydrodynamic lubrication: international series on materials science and technology. Guildford: Elsevier, 2014.

GOLANDA, A. D. Preparação e caracterização de compósitos abrasivos resinoides reforçados com alumina reciclada. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2017.

EGE, S. **Química orgánica: estructura y reactividad**. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1998.

ELDIN, N. N.; SENOUCI, A. B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 5, n. 4, p. 478–496, 1994.

ELEAZER, W.; BARLAZ, M.; WHITTLE, D. **Resource recovery alternatives for waste tires in North Carolina**. School of Engineering. [s.l.] North Carolina State University, 1992.

FARHAN, A. H. et al. Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure. **Materials and Design**, v. 88, p. 897–905, 2015.

FARHAN, A. H.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Effect of cementation level on performance of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures. **Materials and Design**, v. 97, p. 98–107, 2016.

FEDROFF, D.; AHMAD, S.; SAVAS, B. Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1532, p. 66–72, 1996.

FIORITI, C. F. Evaluation of concrete blocks for interspersed paving with addition of rubber residues from the retreading of tires. n. 18, p. 43–54, 2007.

FREEDONIA. World Tires. Disponível em: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/world-tires-3357.htm>. Acesso em: 6 dez. 2018.

FREITAS, C. et al. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, v. 32, n. 4, p. 913–918, 2009.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1828–1836, 2009.

GENT, A.; WALTER, T. D. **The Pneumatic Tire National Highway Traffic Safety Administration**. Washington DC: US Department of Transportation, 2006.

GENT, A.; WALTER, J. **The Pneumatic Tire**. Washington DC: NHTSA, 2006.

GHALY, A. M.; CAHILL IV, J. D. Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 32, n. 6, p. 1075–1081, 2005.

GISBERT, A. N. et al. Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 671–682, 2014.

GOBBO, L. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland**. 2009. 251 f. Tese (Doutorado em ciências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2009.

GONÇALVES, P.; PINHEIRO, J. **Tempo (aproximado) de decomposição de materiais**. Disponível em: <http://www.lixo.com.br/content/view/146/252/>. Acesso em: 24 out. 2016.

GONZÁLEZ, M. G.; CABANELAS, J. C.; BASELGA, J. Applications of FTIR on Epoxy Resins – Identification , Monitoring the Curing Process , Phase Separation and Water Uptake. **Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology**, v. 2, p. 262–284, 1988.

GOVINDARAJAN, D.; GOPALAKRISHNAN, R. Spectroscopic Studies on Indian Portland Cement Hydrated with Distilled Water and Sea Water. **Frontiers in Science**, v. 1, n. 1, p. 21–27, 2012.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ÖZTURAN, T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2309–2317, 2004.

GUO, Z. et al. The production of lignin-phenol-formaldehyde resin derived carbon fibers stabilized by BN preceramic polymer. **Materials Letters**, v. 142, p. 49–51, 2015.

GUPTA, T. et al. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 35–45, 2017.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 562–574, 2014.

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R. **Fundamental of Fluid Film Lubrication**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.

HAN, J.; SUN, W.; PAN, G. X-ray microtomography of the carbonation front shape evolution of cement mortar and modeling of accelerated carbonation reaction. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 28, n. 2, p. 303–308, 2013.

HARTWELL, S. I. et al. Toxicity of scrap tire leachates in estuarine salinities: Are tires acceptable for artificial reefs? **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 127, n.

5, p. 796–806, 1998.

HEIMANN, R. B. **Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications**. Darmstadt: John Wiley & Sons, 2010.

IBRACON. Concreto: Material Construtivo Mais Consumido no Mundo. **Concreto**, p. 80, 2009.

ISSA, C. A.; SALEM, G. Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 48–52, 2013.

JATMA. **Tyre industry of Japan, 2014**. Tokio, 2014. Disponível em: http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tyre_industry_2013.pdf. Acesso em: 03 Nov. 2017.

JEAN, P.; GLEIZE, P. Comparative analysis of the properties of composite mortar with addition of rubber powder from worn tires. n. 48, p. 257–267, 2012.

KAEWUNRUEN, S. et al. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. **Materials**, v. 11, n. 7, 2018.

KARGARZADEH, H. et al. Cellulose nanocrystal : A promising toughening agent for unsaturated polyester nanocomposite. **Polymer**, v. 56, n. December, p. 1–12, 2014.

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M. Rubberized portland cement concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 11, p. 206–213, 1999.

KNUUTINEN, U.; KYLLONEN, P. Two case studies of unsaturated polyester composite art objects. **e-PRESERVATIONscience**, v. 3, p. 11–19, 2006.

KONSTA-GDOUTOS, M. S. et al. Fresh and mechanical properties, and strain sensing of nanomodified cement mortars: The effects of MWCNT aspect ratio, density and functionalization. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 137–151, 2017.

KORHONEN, J. T. **Studies on Wettabilit. From Fundamental Concepts and Nanofibrous Materials to Applications**. [s.l.] Aalto University, 2013.

KOSMATKA, S. H. et al. **Diseño y control de mezclas de concreto**. 1st. ed. Illinois: Portland Cement Association, 2004.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A. Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fibre. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 38–46, 2014.

LINKE, B. **Manufacturing and sustainability of bonding systems for grinding tools** **Production Engineering**. Washington D. C.: Springer, 2016.

MARCELO, R. et al. Wettability Study on Natural Rubber Surfaces for Applications as Biomembranes. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, v. 4, p. 2784–2793, 2018.

MASHINSKY, E. I. Differences between static and dynamic elastic moduli of rocks. **Russian Geology and Geophysics**. v. 44, n. 9, p. 953–959, 2003.

MIRANDA, A. et al. Analysis of Modulos of Elasticity Static and Dinamic for Different

Strengths of Concrete. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55. **Anais...IBRACON**, 2013.

MOHAMMADI, I.; KHABBAZ, H.; VESSALAS, K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 456–471, 2014.

MOHAMMED, B. S.; ADAMU, M.; SHAFIQ, N. A review on the effect of crumb rubber on the properties of rubbercrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 9, 2017.

MOLLAH, M. Y. A.; HESS, T. R.; TSAI, Y. An ftir and xps investigations of the effects of carbonation on the solidification/stabilization of cement based systems-portland type v with zinc. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 773–784, 1993.

MÜLLER, N. S. et al. The effect of inter- and intra-source variation: A comparison between WD-XRF and NAA data from Cretan clay deposits. **Journal of Archaeological Science: Reports**, p. 1–9, September, 2017.

NAGDI, K. Rubber as an Engineering Material: Guideline for Users. [s.l.] Hanser Verlag, 1993.

NAIK, B. T. R.; SINGH, S. S.; ROBERT, B. **Application of scrap tire rubber in asphaltic materials: state of the art assessment**. Milwaukee. Disponível em: <[https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1995 CBU Reports/REP-234.pdf](https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1995%20CBU%20Reports/REP-234.pdf)>. Acesso em: 26 ago. 2017.

NAIK, T. R.; SINGH, S. S. Utilization of Discarded Tires as Construction Materials for Transportation Facilities. Report No. CBU-1991-02, UWM Center for By-Products Utilization. n. January, p. 16, 1991.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2nd. ed. Harlow: Pearson, 2010.

OIKNOMOU, N.; STEFANIDOU, M.; MAVRIDOU, S. Improvement of the bonding between rubber tire particles and cement paste in cement products. In: CONFERENCE OF THE TECHNICAL CHAMBER OF GREECE, 15. **Proceedings...Alexandroupoli**: 200

OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. **Sustainability of Construction Materials**, v. 9, p. 213–238, 2009.

OMOTOSO, O. E.; IVEY, D. G.; MIKULA, R. Containment mechanism of trivalent chromium in tricalcium silicate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 60, n. 1, p. 1–28, 1998.

PETRIE, E. M. **Epoxy adhesive formulations**. New York: McGraw-Hill, 2006.

PETRIE, E. M. **Handbook of adhesives and selants**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

PIERCE, C.; WILLIAMS, R. Scrap tire rubber modified concrete: Past, present and future. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ORGANIZED BY THE CONCRETE AND MASONRY RESEARCH GROUP. SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING: USED–POST-CONSUMER TIRES. **Proceedings...** Londres: Thomas

Telford, 2004. p. 1–16.

PINTO, J. C. **Impactos ambientais causados pelos plásticos: Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2012.

PRADO, A. G. S.; PADILHA, P. M. Aplicação e modificação química da sílica gel obtida de areia. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p. 544–547, 2005.

QIAO, W. et al. Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 1417–1422, 2015.

RAGHAVAN, D.; HUYNH, H.; FERRARIS, C. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. **Journal of Materials Science**, v. 33, p. 1745–1752, 1988.

RAHMAN, R. O. A. et al. **Cementitious materials for nuclear waste immobilization**. Pondicherry: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

RESENDE, E. L. **Canal de Distribuição Reverso na Reciclagem de Pneus: Estudo de Caso**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica Do Rio de Janeiro, 2004.

REZAIFAR, O.; HASANZADEH, M.; GHOLHAKI, M. Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 59–68, 2016.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. D. C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 818–826, 2009.

SANTOS, A. C. **Sinterização e caracterização mecânica e microestrutural de cerâmicas de SiC aditivadas com misturas de AlN/Dy₂O₃ e AlN/Yb₂O₃**. 2015. 186 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

SANTOS, F. et al. Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 315–323, 2016.

SARAMOLEE, P.; LOPATTANANON, N.; SAHAKARO, K. Preparation and some properties of modified natural rubber bearing grafted poly(methyl methacrylate) and epoxide groups. **European Polymer Journal**, v. 56, n. 1, p. 1–10, 2014.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production-present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SCHÖLER, A. et al. Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 374–382, 2015.

SCRIVENER, K. L. et al. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray

diffraction/Rietveld analysis and independent methods. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1541–1547, 2004.

SEGRE, N.; JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1421–1425, 2000.

SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix. **Journal of colloid and interface science**, v. 248, n. 2, p. 521–3, 2002.

SHAMES, I. H. **Mecânica de Fluidos**. 3. ed. New York: McGraw-Hil International Editions, 1992.

SHREVE, R. N.; BRINK, J. A. **Chemical Process Industries**. 4th. ed. McGraw-Hill Book Co., 1977.

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber - An overview. **Waste Management**, v. 24, n. 6, p. 563–569, 2004.

SILVEIRA, S. Reciclagem de pneus. **Pesquisa Fapesp**, v. 246, p. 78–79, 2017.

SILVERSTEIN, R.; WEBSTER, F.; KIEMLE, D. **Spectrometric identification of organic compounds**. California: John Wiley & Sons, 2005.

SKRIPKIŪNAS, G.; GRINYS, A.; ČERNIUS, B. Deformation properties of concrete with rubber waste additives Deformation Properties of Concrete with Rubber Waste Additives. **Materials Science**, p. 1–6, January, 2007.

SNELSON, D. G. et al. Sustainable construction: Composite use of tyres and ash in concrete. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 360–367, 2009.

SNIC. **Produção e Consumo de Cimento no Brasil**. Disponível em: <http://www.cimentoverdedobrasil.com.br/producao-e-consumo-de-cimento-no-brasil/>. Acesso em: 26 ago. 2018.

SNIC. **Resultados Preliminares de Julho 2018**. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=27>. Acesso em: 26 aug. 2018.

SUKONTASUKKUL, P.; CHAIKAEW, C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 7, p. 450–457, 2006.

TOPÇU, I. B. The properties of rubberized concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 304–310, 1995.

TOPÇU, İ. B.; BILIR, T. Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete. **Materials & Design**, v. 30, n. 8, p. 3056–3065, 2009.

TORGAL, F. P. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. TecMinho, 2010. p. 1-460.

TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Potential of rubber aggregates to

modify properties of cement based-mortars: Improvement in cracking shrinkage resistance. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 176–181, 2007.

TURATSINZE, A.; GARROS, M. On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 10, p. 1209–1215, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Emission Factor Documentation for AP-42 Abrasives Manufacturing Final Report**. Washington D. C. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/bgdocs/b11s31.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

UPADHYAY, A. Prediction of Effective Elastic Modulus of Biphasic Composite Materials. **Modern Mechanical Engineering**, v. 02, n. 01, p. 6–13, 2012.

VALADARES, F. **Desempenho mecânico de betões estruturais com granulado de borracha proveniente de pneus usados**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

VIEIRA, R. K. et al. Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1754–1760, 2010.

WANG, S. et al. Effect of high strain rate on compressive behavior of strain-hardening cement composite in comparison to that of ordinary fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 31–43, 2017.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative. Report**. Geneva: 2012. Disponível em: <https://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-Summary.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2017.

WEI, W. et al. Preparation of supported carbon molecular sieve membrane from novolac phenol–formaldehyde resin. **Journal of Membrane Science**, v. 303, n. 1–2, p. 80–85, 2007.

Wysocky, K. **Around the world, discarded tyres tread again**. London. Disponível em: <http://www.bbc.com/autos/story/20140802-discarded-tires-tread-again>. Acesso em: 11 jul. 2019.

XU, L. et al. Influence of curing temperatures on the hydration of calcium aluminate cement/Portland cement/calcium sulfate blends. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 298–306, 2017.

XUE, J.; SHINOZUKA, M. Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 196–204, 2013.

YOUSSEF, O. et al. An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 522–532, 2014.

YOUSSEF, O.; ELGAWADY, M. An overview of sustainable concrete made with scrap

rubber. In: SAMALI, B.; ATTARD, M. M.; SONG, C. (Eds.). . **From Materials to Structures: Advancement through Innovation**. London: CRC Press, 2013. p. 1039–1044.

YU, Q. L.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. **Cement and Concrete Composites**, v. 61, p. 18–28, 2015.

ZHANG, J. et al. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 5, 2015.

ZHENG, L.; SHARON HUO, X.; YUAN, Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 939–947, 2008.

ZHOU, Y. et al. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 137–145, 2015.

ZHOU, Y.; FAN, M. Recycled tyre rubber-thermoplastic composites through interface optimisation. **RSC Advances**, v. 7, n. 47, p. 29263–29270, 2017.

APÊNDICE A - CERTIFICADO ENSAIO DE FRX MATERIAIS BASE

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO Escola de Engenharia de Lorena – EEL Laboratório de Caracterização Química

CERTIFICADO 28/2016

OS: 24/2016DATA: 27/10/2015

SOLICITANTE: Diego David Pinzón Moreno

MATERIAL: Água, Areia, Borracha e Cimento.

RESULTADOS: Resultados expressos em percentual em massa de compostos, normalizados a 100%, exceto para Água.

Água		Areia		Borracha		Cimento	
Composto	Concentração	Composto	Concentração	Composto	Concentração	Composto	Concentração
MgO	0,01 %	Na ₂ O	1,01 %	MgO	0,16 %	Na ₂ O	0,33 %
SiO ₂	0,004 %	MgO	0,65 %	Al ₂ O ₃	0,20 %	MgO	4,95 %
P ₂ O ₅	0,17 %	Al ₂ O ₃	8,14 %	SiO ₂	1,95 %	Al ₂ O ₃	7,78 %
CaO	0,07 %	SiO ₂	77,21 %	P ₂ O ₅	0,06 %	SiO ₂	24,72 %
		P ₂ O ₅	0,44 %	SO ₃	0,18 %	P ₂ O ₅	0,15 %
		SO ₃	0,08 %	Cl	0,01 %	SO ₃	2,89 %
		K ₂ O	3,43 %	K ₂ O	0,04 %	K ₂ O	0,64 %
		CaO	1,01 %	CaO	0,21 %	CaO	54,79 %
		TiO ₂	2,16 %	TiO ₂	0,01 %	TiO ₂	0,50 %
		MnO	0,11 %	MnO	0,002 %	MnO	0,56 %
		Fe ₂ O ₃	4,20 %	Fe ₂ O ₃	0,15 %	Fe ₂ O ₃	2,50 %
		Rb ₂ O	0,02 %	NiO	0,001 %	SrO	0,18 %
		Y ₂ O ₃	0,04 %	CuO	0,003 %	Y ₂ O ₃	0,01 %
		ZrO ₂	1,02 %	ZnO	1,53 %		
		CeO ₂	0,27 %	SrO	0,001 %		
		Pr ₂ O ₃	0,12 %	ZrO ₂	0,004 %		
		ThO ₂	0,08 %	PbO	0,002 %		
				PF	95,49 %		

Observações:

1. Análises realizadas por fluorescência de raios X, em equipamento Axios MAX, marca PANalytical. Análise semiquantitativa sem padrões, com determinação de elementos químicos de flúor a urânio;
2. Amostra, da Areia e Cimento, preparada por fusão, da Borracha Prensada em cama de H₃BO₃, após Perda ao Fogo;
3. Os resultados apresentados referem-se exclusivamente às amostras ensaiadas, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes. A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração, e com autorização prévia da EEL-USP.

Dra. Rosa Ana Conte
Responsável pelo Serviço

Dr. Viktor Pastoukhov
Chefe do DEMAR

Escola de Engenharia de Lorena EEL
Estrada Municipal do Campinho, s/no.
CEP 12602-810 – Bairro Campinho - Lorena – SP
CNPJ 63.025.530/0100-96

USP Lorena

www.eel.usp.br

Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Caracterização Química
Tel. (12) 31 59-9000 e 31 59-9924
labfrx.demar@gmail.com

APÊNDICE B - CERTIFICADO ENSAIO DE FRX DA AREIA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL
Laboratório de Caracterização Química

CERTIFICADO 10/2017

OS: 12/2017   DATA: 08/05/2017

SOLICITANTE: DIEGO DAVID PINZÓN MORENO

MATERIAL: Areia

RESULTADOS: Resultados expressos em percentual de massa de compostos, normalizados a 100%.

Areia 150 - 300		Areia 300 - 425		Areia 425 - 600	
Composto	Concentração	Composto	Concentração	Composto	Concentração
SiO ₂	79,10 %	SiO ₂	84,67 %	SiO ₂	89,60 %
Al ₂ O ₃	11,93 %	Al ₂ O ₃	8,75 %	Al ₂ O ₃	5,96 %
K ₂ O	2,91 %	K ₂ O	2,43 %	K ₂ O	2,07 %
Fe ₂ O ₃	1,75 %	Fe ₂ O ₃	1,08 %	Na ₂ O	0,73 %
MgO	1,26 %	Na ₂ O	1,03 %	Fe ₂ O ₃	0,59 %
Na ₂ O	1,19 %	MgO	0,88 %	MgO	0,44 %
TiO ₂	0,79 %	CaO	0,44 %	CaO	0,29 %
CaO	0,56 %	TiO ₂	0,43 %	TiO ₂	0,17 %
ZrO ₂	0,19 %	ZrO ₂	0,08 %	P ₂ O ₅	0,04 %
P ₂ O ₅	0,11 %	P ₂ O ₅	0,07 %	ZrO ₂	0,03 %
SO ₃	0,07 %	SO ₃	0,04 %	Cl	0,02 %
Cl	0,04 %	BaO	0,04 %	BaO	0,02 %
MnO	0,04 %	Cl	0,03 %	SO ₃	0,02 %
BaO	0,04 %	MnO	0,02 %	MnO	0,02 %
Rb ₂ O	0,01 %	SrO	0,01 %	SrO	0,01 %
SrO	0,01 %	Rb ₂ O	0,01 %	Rb ₂ O	0,01 %

Observações:

1. Análises realizadas por fluorescência de raios X, em equipamento Axios MAX, marca PANalytical. Análise semiquantitativa sem padrões, com determinação de elementos químicos;
2. Amostra preparada por prensagem com Ácido Bórico
3. Os resultados apresentados referem-se exclusivamente às amostras ensaiadas, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes. A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração, e com autorização prévia da EEL-USP.

_____
 Dra. Rosa Ana Conte
 Responsável pelo Serviço

_____
 Dr. Viktor Pastoukhov
 Chefe do DEMAR

Escola de Engenharia de Lorena EEL
 Estrada Municipal do Campinho, s/no.
 CEP 12602-810 – Bairro Campinho - Lorena – SP
 CNPJ 63.025.530/0100-96

USP Lorena

www.eel.usp.br

Departamento de Engenharia de Materiais
 Laboratório de Caracterização Química
 Tel. (12) 3159-9000 e 3159-9924
labfrx.demar@gmail.com

**APÊNDICE C - MASSA ESPECÍFICA E VISCOSIDADE DOS MATERIAIS
EMPREGADOS A TEMPERATURA AMBIENTE**

Tabela 28 -Massa específica média e viscosidade média (μ) dos materiais empregados

MASSA ESPECÍFICA MÉDIA E VISCOSIDADE MÉDIA (μ) DOS MATERIAIS EMPREGADOS A TEMPERATURA AMBIENTE (25 °C)		
Material	Massa Específica aparente	Viscosidade média μ
	(g/cm³)	Pa*s
Borracha	$\cong 1,04$	--
Areia	$\cong 2,64$	--
Cimento	$\cong 2,84$	--
Resina Epóxidica	$\cong 0,93$	$\cong 2,280$
Resina Fenol-formaldeído	$\cong 0,92$	$\cong 1,545$
Resina Poliéster insaturada	$\cong 0,90$	$\cong 3,650$

Fonte: Arquivo pessoal.

Nota: * Viscosidade média obtida de ensaio com viscosímetro Brookfield

APÊNDICE D - PLANO MOLDE DE COMPRESSÃO

APÊNDICE E - PLANO MOLDE DE FLEXÃO

APÊNDICE F - PLANO GERAL ESTRUTURA PARA OBTENÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE

APÊNDICE G - GRAFICOS SONELASTIC COMPÓSITOS DE ARGAMASSA

APÊNDICE H - SÍNTESE DE RESULTADOS MECÂNICOS RESISTÊNCIAS, MÓDULOS DE ELASTICIDADES E CONFIABILIDADE.

Tabela 29 - Resistências à compressão (fm') de ensaios de compressão com diferente granulometria e diferentes tipos de carga de borracha sem compatibilizar referentes à Figura 63

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	MPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	15,18	1,37	13,00	17,36
2	14,9	2,72	10,57	19,24
3	12,52	2,57	8,43	16,62
4	10,9	1,48	8,54	13,26
6	9,13	0,51	8,32	9,94
8	7,29	0,42	6,63	7,96
10	5,94	0,19	5,63	6,25
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	MPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	16,82	1,22	14,87	18,77
2	15,20	3,47	9,67	20,72
3	13,58	0,71	12,45	14,71
4	11,20	0,76	9,98	12,41
6	7,67	0,43	6,99	8,35
8	5,63	0,39	5,02	6,25
10	2,76	0,96	1,23	4,28
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	MPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	16,62	2,97	11,89	21,34
2	14,26	2,21	10,75	17,77
3	11,38	1,00	9,78	12,97
4	11,74	0,90	10,31	13,17
6	7,63	2,45	3,73	11,54
8	7,28	0,19	6,98	7,58
10	4,51	0,23	4,14	4,88

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 30 - Resistências à tração por flexão (S_f) dos compósitos não compatibilizados referentes à Figura 66

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	MPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	6,15	1,23	4,19	8,10
2	6,21	0,51	5,41	7,02
3	5,80	0,21	5,46	6,15
4	5,41	0,81	4,13	6,70
6	5,06	0,21	4,72	5,40
8	3,64	0,30	3,16	4,12
10	3,92	0,25	3,53	4,32
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	6,06	1,75	1,71	10,41
2	6,60	0,60	5,65	7,55
3	6,58	0,40	5,94	7,22
4	5,36	0,26	4,95	5,77
6	4,46	0,41	3,81	5,10
8	4,44	0,44	3,74	5,13
10	2,04	0,18	1,75	2,32
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	MPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	6,21	0,56	5,32	7,10
2	6,07	0,37	5,48	6,65
3	4,97	0,49	4,19	5,74
4	5,33	0,36	4,75	5,90
6	4,55	0,45	3,85	5,26
8	3,77	0,13	3,57	3,97
10	4,28	0,72	3,13	5,43

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 31 - Resistências à compressão dos compósitos compatibilizados com diferente teor de borracha referentes à Figura 75

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	20,07	1,31	17,98	22,16
2	16,43	0,45	15,71	17,16
3	10,38	0,48	9,62	11,13
4	6,34	0,30	5,86	6,81
6	1,81	0,66	0,77	2,85
8	0,49	0,62	0,00	1,47
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	19,52	1,06	17,83	21,21
2	19,42	0,77	18,20	20,65
3	17,93	1,93	14,86	21,01
4	11,60	0,57	10,69	12,52
6	6,49	0,24	6,11	6,87
8	3,80	0,21	3,46	4,14
10	3,52	0,06	3,42	3,62
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	20,22	3,18	12,31	28,13
1	19,33	0,32	18,83	19,84
2	18,08	1,02	16,46	19,71
3	15,51	1,59	12,98	18,03
4	13,95	1,59	11,42	16,48
6	8,35	0,20	8,03	8,68
8	4,17	0,09	4,02	4,31

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 32 - Resistências à tração por flexão dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 78

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	5,52	0,57	4,62	6,43
2	4,79	0,16	4,53	5,05
3	3,55	0,47	2,38	4,71
4	2,77	0,04	2,71	2,83
6	0,43	0,01	0,41	0,45
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	5,39	0,49	4,60	6,17
2	4,44	0,13	4,24	4,64
3	4,27	0,24	3,89	4,65
4	3,50	0,14	3,28	3,72
6	2,33	0,11	2,16	2,51
8	1,75	0,15	1,51	1,99
10	1,44	0,18	1,15	1,73
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à flexão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	Mpa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	5,25	0,46	4,12	6,39
1	5,19	0,44	4,49	5,89
2	5,06	0,21	4,72	5,39
3	3,87	0,16	3,62	4,12
4	3,28	0,19	2,98	3,58
6	2,38	0,22	2,04	2,72
8	1,82	0,06	1,72	1,91

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 33 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(A)

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,75	0,39	2,08	3,32
1	2,41	0,37	1,48	3,34
2	2,32	0,13	2,11	2,53
3	2,00	0,34	1,45	2,5
4	1,75	0,45	1,03	2,47
6	1,69	0,24	1,31	2,06
8	1,20	0,39	0,58	1,82
10	1,26	0,43	0,57	1,95
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,70	0,39	2,08	3,32
1	2,31	0,13	2,10	2,52
2	2,19	0,18	1,90	2,48
3	2,23	0,18	1,94	2,52
4	1,66	0,25	1,26	2,05
6	1,28	0,20	0,96	1,59
8	0,85	0,28	0,41	1,29
10	0,44	0,12	0,22	0,61
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,70	0,39	2,08	3,32
1	2,28	0,49	1,50	3,06
2	2,30	0,47	1,55	3,04
3	1,53	0,41	1,88	2,18
4	1,81	0,14	1,59	2,03
6	1,24	0,24	0,65	1,83
8	1,22	0,19	0,91	1,53
10	0,73	0,19	0,42	1,04

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 34 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(B)

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,72	0,11	1,54	1,90
1	1,90	0,09	1,76	2,04
2	2,00	0,13	1,79	2,21
3	1,59	0,08	1,47	1,71
4	1,42	0,26	1,00	1,84
6	1,08	0,06	0,98	1,19
8	1,09	0,17	0,83	1,36
10	1,10	0,12	0,90	1,29
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,72	0,11	1,54	1,90
1	1,90	0,07	1,71	2,09
2	1,82	0,17	1,55	2,10
3	1,80	0,12	1,61	2,00
4	1,23	0,25	0,83	1,63
6	0,65	0,20	0,33	0,96
8	0,84	0,15	0,60	1,09
10	0,36	0,06	0,26	0,46
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,72	0,11	1,54	1,90
1	1,88	0,09	1,73	2,02
2	1,54	0,16	1,28	1,79
3	1,32	0,08	1,18	1,45
4	1,21	0,11	1,03	1,39
6	0,92	0,25	0,52	1,31
8	0,68	0,10	0,51	0,84
10	0,79	0,19	0,48	1,10

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 35 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(C)

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	20,87	0,08	20,78	20,95
2	20,69	0,08	20,61	20,77
3	18,02	0,64	17,35	18,69
4	18,87	0,03	18,84	18,90
6	14,77	0,40	14,35	15,18
8	12,66	0,52	12,11	13,21
10	12,74	0,06	12,68	12,81
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	22,30	0,12	22,17	22,43
2	23,83	0,34	23,47	24,19
3	20,74	0,12	20,61	20,87
4	17,67	0,16	17,50	17,84
6	16,25	0,03	16,21	16,28
8	14,89	0,04	14,84	14,93
10	4,86	0,42	4,42	5,30
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	18,58	0,04	18,53	18,63
2	18,56	0,08	18,48	18,65
3	18,11	0,26	17,84	18,38
4	17,66	0,78	16,84	18,48
6	14,54	0,14	14,40	14,69
8	12,30	0,18	12,11	12,48
10	9,50	0,98	8,59	10,41

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 36 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos sem compatibilizar referentes à Figura 80(D)

AGREGADO FINO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	9,47	0,02	9,45	9,49
2	8,88	0,02	8,86	8,89
3	7,86	0,01	7,85	7,87
4	8,36	0,02	8,34	8,38
6	6,20	0,08	6,11	6,28
8	5,49	0,09	5,40	5,58
10	5,36	0,02	5,34	5,37
AGREGADO MEDIO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	9,18	0,02	9,15	9,20
2	11,02	0,05	10,96	11,07
3	8,94	0,03	8,90	8,97
4	7,81	0,12	7,68	7,94
6	6,89	0,01	6,88	6,91
8	7,13	0,03	7,10	7,16
10	2,08	0,04	2,03	2,12
AGREGADO GROSSO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	8,51	0,03	8,48	8,54
2	8,69	0,20	8,48	8,90
3	7,75	0,07	7,67	7,82
4	7,45	0,02	7,43	7,47
6	6,29	0,02	6,27	6,31
8	6,31	0,14	6,16	6,45
10	5,08	0,11	4,97	5,19

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 37 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(A)

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,70	0,39	2,08	3,32
1	2,21	0,07	2,10	2,32
2	2,99	0,56	2,11	3,88
3	1,37	0,18	1,08	1,66
4	0,29	0,21	0,00	0,64
6	0,06	0,10	0,00	0,21
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,70	0,39	2,08	3,32
1	3,07	0,30	2,59	3,55
2	2,07	0,34	1,52	2,62
3	2,74	0,42	2,08	3,41
4	0,79	0,08	0,65	0,92
6	0,60	0,39	0,00	1,22
8	0,22	0,05	0,14	0,30
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	2,70	0,39	2,08	3,32
1	1,31	0,46	0,58	2,04
2	1,01	0,12	0,82	1,19
3	0,73	0,09	0,58	0,88
4	0,49	0,20	0,17	0,82
6	0,22	0,03	0,17	0,27

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 38 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referente à Figura 81(B)

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,67	0,35	0,81	2,54
1	1,72	0,67	0,66	2,79
2	0,59	0,34	0,04	1,13
3	0,41	0,07	0,30	0,53
4	0,10	0,04	0,04	0,16
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,67	0,35	0,81	2,54
1	1,58	0,367	1,00	2,17
2	1,50	0,23	1,13	1,87
3	0,83	0,13	0,62	1,04
4	0,42	0,07	0,31	0,54
6	0,45	0,10	0,29	0,61
8	0,27	0,03	0,22	0,33
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	1,67	0,35	0,81	2,54
1	2,37	0,54	1,51	3,24
2	1,47	0,32	0,97	1,98
3	1,01	0,14	0,78	1,23
4	0,45	0,09	0,30	0,60
6	0,44	0,09	0,30	0,58

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 39 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(C)

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	17,79	0,04	17,75	17,84
2	13,70	0,29	13,40	14,01
3	9,88	0,09	9,79	9,97
4	8,32	0,08	8,23	8,41
6	1,13	0,41	0,70	1,56
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	16,09	0,05	16,04	16,15
2	13,50	0,16	13,34	13,66
3	11,14	0,22	10,90	11,37
4	6,45	0,30	6,13	6,76
6	5,23	0,48	4,73	5,73
8	4,47	1,06	3,36	5,57
10	3,32	0,04	3,28	3,36
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	21,56	0,07	21,49	21,63
1	17,55	0,23	17,30	17,79
2	16,74	0,27	16,45	17,02
3	15,89	0,03	15,87	15,92
4	12,59	0,06	12,52	12,65
6	5,16	0,06	5,10	5,23
8	5,59	0,17	5,41	5,76

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 40 - Módulos de elasticidades obtidos por diferentes ensaios dos compósitos compatibilizados referentes à Figura 81(D)

RESINA EPÓXIDICA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	7,91	0,06	7,85	7,97
2	5,99	0,01	5,98	6,01
3	4,25	0,03	4,22	4,28
4	3,57	0,04	3,53	3,61
6	1,13	0,13	0,99	1,27
RESINA FENOL-FORMALDEIDO				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	6,99	0,03	6,97	7,02
2	5,83	0,03	5,80	5,86
3	4,77	0,03	4,74	4,80
4	2,54	0,03	2,50	2,57
6	2,52	0,28	2,22	2,81
8	2,56	0,30	2,24	2,88
10	3,35	0,73	2,58	4,12
RESINA POLIESTER INSATURADA				
Teor de borracha	Resistência à compressão	Desvio padrão.	Intervalo de confiança (IC)	
% Massa	GPa	--	Inferior 95%	Superior 95%
0	9,23	0,02	9,21	9,25
1	7,81	0,03	7,78	7,84
2	7,91	0,04	7,86	7,95
3	6,97	0,03	6,94	7,01
4	5,69	0,01	5,68	5,70
6	3,46	0,64	2,79	4,13
8	2,95	0,35	2,58	3,32

Fonte: Arquivo pessoal.

ANEXO A - PRINCIPAIS TIPOS DE CIMENTOS E SUA CLASSIFICAÇÃO

Quadro 13 - Classificação tradicionais de cimentos

Britânica	Americana
Portland comum (BS12)	Tipo I (ASTM 150)
Portland de alta resistência inicial (BS12)	Tipo III (ASTM 150)
Portland de baixo calor de hidratação (BS1370)	Tipo IV (ASTM 150)
Cimento modificado	Tipo II (ASTM 150)
Portland resistente a sulfatos (SRPC)(BS4027)	Tipo V (ASTM 150)
Portland de alto-forno (cimento de escoria) (BS146)	Tipo IS- Tipo S- Tipo I(SM) (ASTM 595)
Alto teor de escoria de alto-forno (BS4246)	--
Portland Branco (BS12)	--
Portland Pozolânico (BS 6588;3892)	Tipo IP- Tipo P - Tipo I(PM) (ASTM 595)

Fonte: Neville e Brooks, (2010).

Quadro 14 - Classificação europeia de cimentos bs8500-1:2006

Tipo	Especificação
Tipo (CEM) I	Portland.
Tipo IIA	Portland com 6-20% de cinza volante, EAF*, calcário ou 6 a 10% de sílica ativa.
Tipo IIB-S	Portland com 21 a 35% de EAF.
Tipo IIB-V	Portland com 21 a 35% de cinza volante.
Tipo IIB+SR	Portland com 25 a 35% de cinza volante com moderada resistência a sulfatos.
Tipo IIIA	Portland com 36 a 65% de EAF.
Tipo IIIA+SR	Portland com 36 a 65% de EAF com moderada resistência a sulfatos.
Tipo IIIB	Portland com 66 a 80% de EAF.
Tipo IIIB+SR	Portland com 66 a 80% de EAF com moderada resistência a sulfatos.
Tipo IIIC	Portland com 81 a 95% de EAF.
Tipo IVB-V	Portland com 36% a 55% de cinza de volante.

Fonte: Neville e Brooks, 2010.

Nota: *Escoria granulada de alto-forno moída (EAF).

ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS SEGUNDO O TIPO DE ROCHA

Quadro 15 - Classificação dos agregados naturais segundo o tipo de rocha

GRUPO BALSALTO	GRUPO CALCARIO	GRUPO GABRO
- Andesito - Basalto - Porfiritos Básicos - Diabásico - Todos os tipos de doleritos, incluído teralito e teschenito - Epidiorito - Lamprófito - Quartzo-dolerito - Espilito	- Dolomito - Calcário - Mármore	- Diorito básico - Gnaiss básico - Gabro - Hornblenda - Norito - Peridotito - Picrito - Serpentinó
	GRUPO ARENITO (INCLUINDO ROCHAS VULCÂNICAS FRAGMENTADAS)	
	- Arcóso - Grauvaca - Arenito - Tufo	
GRUPO GRANITO	GRUPO PORFIRITICO	
- Gnaiss - Granito - Granodiorito - Granulito - Pegmatito - Quartzo-diorito - Sienito	- Aplito - Dacito - Felsito - Granófito - Queratófito - Morcrogranito - Pófito - Quartzo-porfirítico - Riólito - Traquito	GRUPO QUARTZITO - Quartzito - Arenito Quartzítico - Quartzito recristalizado
		GRUPO XISTO - Filito - Xisto - Folhelho - Todas as rochas altamente cizalhadas
GRUPO FLINT		
- Chert - Flint		

Fonte: ASTM C294.