BALDAN, V. J. S. **Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2015.

Os compósitos são materiais formados por duas fases de diferentes propriedades químicas e físicas, sendo uma matriz e um reforço, que apresentam alta rigidez, melhores respostas à fadiga sob cargas cíclicas, leveza e resistência mecânica, o que os torna viáveis para substituir materiais nobres e de custo elevado, com diversas aplicações na aeronáutica, nos esportes, na indústria bélica e principalmente na construção civil. Além disso, os compósitos podem ser obtidos a partir da incorporação de resíduos em sua composição, solucionando problemas como o descarte irregular. Com o intuito de contribuir nessa área de conhecimento o presente estudo propôs o desenvolvimento de um compósito em forma de placas poliméricas a partir da incorporação do agregado reciclado de poliuretana termofixa reciclado à resina vegetal de mamona e à mantas de fibra de vidro. Para isso, o trabalho estabeleceu uma metodologia na qual o resíduo industrial de poliuretana termofixa é transformado em agregado reciclado, a partir de processos de corte e moagem, caracterização e classificação segundo as normas NBR 10.004 a 10.007 (ABNT, 2004). Na sequência, com o auxílio de uma prensa térmica, foi possível confeccionar as placas poliméricas e caracterizá-las quanto às suas propriedades mecânicas (tração, flexão, punção), físicas (absorção em água, inchamento e densidade), térmicas (condutividade térmica) e quanto ao seu potencial de durabilidade (à abrasão superficial, ao ataque químico, à exposição ao ultravioleta e às intempéries, resistividade elétrica e flamabilidade). Os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados apontaram que os parâmetros ensaiados comportaram-se como materiais semelhantes àqueles utilizados na construção civil, o que possibilita a utilização do material desenvolvido nesta pesquisa em aplicações por este setor.

Palavras-chave: resíduo industrial de poliuretana termofixa, reciclagem, resina vegetal de mamona, fibras de vidro, compósito polimérico, placas poliméricas.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS POLIMÉRICAS PRODUZIDAS A PARTIR DA RECICLAGEM DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE POLIURETANA TERMOFIXA

Victor José dos Santos Baldan

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

SÃO CARLOS – SP
2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

VICTOR JOSÉ DOS SANTOS BALDAN

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS
POLIMÉRICAS PRODUZIDAS A PARTIR DA
RECICLAGEM DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE
POLIURETANA TERMOFIXA

(versão corrigida)

Dissertação apresentada ao Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da USP de São
Carlos, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientador:

Prof. Dr. **JAVIER MAZARIEGOS PABLOS**

SÃO CARLOS – SP

2015

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

B175d Baldan, Victor José dos Santos
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS
POLIMÉRICAS PRODUZIDAS A PARTIR DA RECICLAGEM DO
RESÍDUO INDUSTRIAL DE POLIURETANA TERMOFIXA / Victor
José dos Santos Baldan; orientador Javier Mazariegos
Pablos. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2015.

1. resíduo industrial de poliuretana termofixa. 2.
reciclagem. 3. resina vegetal de mamona. 4. fibras de
vidro. 5. compósito polimérico. 6. placas poliméricas.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **Victor José dos Santos Baldan**

Título da tese: “Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa”

Data da defesa: 25/02/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Javier Mazariegos Pablos (Orientador)**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo – IAU-USP)

APROVADO

Profa: Dra. **Kelen de Almeida Dornelles**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo – IAU-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Valdir Schalch**
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADO

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Prof. Dr. **Márcio Minto Fabrício**

**“Tu és arquiteto de teu próprio destino. Trabalha, espera
e ousa”.**

(Ella Wheeler Wilcox)

**“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível”.**

(Charles Chaplin)

DEDICATÓRIA

Ao Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos,
Grande Mestre e Amigo;

Ao Prof. Tit. Eduvaldo Paulo Sichieri,
Pelo incentivo e pela amizade;

À minha família, em especial, aos meus pais, Pedro e Lucia,
e ao meu irmão, Emanuel,
Meu porto seguro;

Aos meus avós,
Verdadeiros anjos da guarda.

AGRADECIMENTOS

À Deus, grande mentor de todas as conquistas da minha vida.

À minha família, minha fonte de incentivo, em especial, meus pais, Lucia e Pedro, ao meu irmão Emanuel e aos meus avós.

Ao Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos, pela orientação, novos ensinamentos e pela amizade.

Aos estimados Prof. Assoc. Valdir Schalch, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles, do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU/USP), pelo conselhos e pelas valiosas contribuições com este trabalho.

Ao Prof. Tit. Eduvaldo Paulo Sichieri, amigo e grande incentivador desta pesquisa.

Ao Prof. Titular José Augusto Bolzan Agnelli, pelo apoio na realização de alguns ensaios propostos por esta pesquisa e pela amizade.

À Profa. Dra. Suzan Aline Casarin, pela troca de experiências e discussões sobre o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Tit. Ruy Alberto Correa Altafim e ao engenheiro eletricitista mestre Yuri Olivatto, pelo auxílio nos ensaios de resistividade elétrica;

Ao Prof. Dr. José da Costa Marques Neto, pelas observações, sugestões e ajuda, que enriqueceu o trabalho.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Córdoba, pela amizade e pelo apoio incondicional.

A todos os professores do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP, pelo apoio e atendimento.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil, Paulo Albertini, Paulo Pratavieira e principalmente ao Sérgio Trevelin, pelo carinho com o qual se dispuseram a me ajudar no desenvolvimento de parte desta pesquisa. A colaboração de vocês foi fundamental para que esta pesquisa atingisse a qualidade esperada.

Aos técnicos do Laboratório de Geossintéticos, Manuel, Thiago, Valter e em especial ao Clever Valentim, pela amizade e pelas dicas que muito contribuíram com esta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Júlio Troffino e Paulo Fragiácomo, pelo valioso auxílio na realização dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Ao técnico Thales, do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar (CCDM/DEMa), pelo auxílio na realização dos ensaios de ataque químico e de abrasão e na interpretação dos resultados.

À INPOL, que forneceu o resíduo que foi objeto de estudo desta investigação científica.

À Imperveg Poliuretano Vegetal, representada pelo amigo Donizeti Curcio Luciano, que gentilmente cedeu a resina vegetal de mamona utilizada no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos do ArqTeMa, em ordem alfabética: André de Oliveira Chaves, Aline Gouvêa Leite, Carlos Eduardo Guerra, Jane Eliza de Almeida Lacombe, Marieli Azoia Lukiantchuki, Mario Sérgio de Andrade Zago, Paulo Giovany Quadros do Amaral, Poliana Figueira Cardoso, William Miosso Moura, pelo apoio e pela troca de experiências.

Aos amigos do NEPER – Núcleo de Pesquisa e Estudo em Resíduo, Caroline Michele Palamin, Fernanda Resende Vilela, Prof. Dr. Marco Aurélio Soares de Castro, Julia Inforzato Juguermandi e Yovana Maria Barrera Saavedra, pela colaboração direta e indireta na realização desta pesquisa.

Aos colegas de IAU/USP, pelos prazerosos anos de convivência.

A todos os funcionários do IAU/USP em especial, Andrea Salla, Débora Martinez, Debora Verniz, Fátima Leal, Felipe Romano, Geraldo Pereira, José Renato Dibbo, Mara Lino, Marcelinho, Marcelo Brocco, Lessandro Carvalho, Valeria Neves e da USP São Carlos, Patrícia Leme Silva e Ruth Strozzi, pelo apoio incondicional.

Aos alunos de iniciação científica, André Borgato Morelli, Barbara Botteon, Bruna Milena Franco, Fernando Mellin, Maria Gabriela Nascimento, Lucas Mansano, Lucas Sandre Leopoldino Tatiane Caroline Rocha Lemos, pelo auxílio com as pesquisas e pela parceria.

Aos alunos das turmas 011 e 012 do curso de Arquitetura e Urbanismo e das turmas 011, 012 e 014 do curso de Engenharia Civil da USP São Carlos, pela troca de experiências.

Aos amigos de São Carlos, em ordem alfabética: André Pina de Mesquita, Alberto, Augusto Atique Motta Silva, Cléber dos Santos Hilário, Glauco Paulo, Gustavo de Pádua, Felipe Vitti Ronchinni, Helton Henrique Zorek, Julia Magioli Lopes, Levi Casolli Moraes, Leonardo Henrique Pedroso Pinheiro Silva, Leonardo Ramos Adriano, Maíra Nunes Toledo, Márcia de Arruda Fajardo, Poliana de Arruda Fajardo, Renato Binotto, Renato Nishimura, Rita de Arruda Fajardo, Roberta Iza Grau, Victor Adonis Belletti, pela parceria e apoio incondicional durante os últimos anos.

Aos amigos da Prefeitura Municipal de São Carlos e da PROHAB São Carlos: Cidinha Duarte, Dirceu Ferreira da Silva, Fernando Mazzeo Grande, João Batista Muller, José Enrique Vendrasco, Julio Cesar Ferreira, Marcos Alberto Martinelli, Maria Izabel Bráulio, Samir Costa Fagury, Samuel da Rocha e Valter Secco, que sempre me incentivaram a iniciar o curso de Mestrado, que hoje, é realidade.

Aos amigos limeirenses: Alex Marques Rosa, Andrea Julia Soares, Eduardo José Mecatti, Fabiana Araújo, Felipe Penedo de Barros, Jacqueline Emerich Souza, Lucas Caetano, Maxweel Campos, Debora Sequinatto Monteiro da Silva, Ivonei Teixeira, Marieli Luiz, Larissa de Oliveira, Mariana Drem Picolo e Wagner Pizzani Guidi, pela amizade sincera.

Ao Luis Claudio de Jesus, companheiro de república, pela amizade e por sempre ter uma palavra de incentivo.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil), pelo apoio financeiro concedido, o qual viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Muito obrigado.

RESUMO

BALDAN, V. J. S. **Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2015.

Os compósitos são materiais formados por duas fases de diferentes propriedades químicas e físicas, sendo uma matriz e um reforço, que apresentam alta rigidez, melhores respostas à fadiga sob cargas cíclicas, leveza e resistência mecânica, o que os torna viáveis para substituir materiais nobres e de custo elevado, com diversas aplicações na aeronáutica, nos esportes, na indústria bélica e principalmente na construção civil. Além disso, os compósitos podem ser obtidos a partir da incorporação de resíduos em sua composição, solucionando problemas como o descarte irregular. Com o intuito de contribuir nessa área de conhecimento o presente estudo propôs o desenvolvimento de um compósito em forma de placas poliméricas a partir da incorporação do agregado reciclado de poliuretana termofixa reciclado à resina vegetal de mamona e à mantas de fibra de vidro. Para isso, o trabalho estabeleceu uma metodologia na qual o resíduo industrial de poliuretana termofixa é transformado em agregado reciclado, a partir de processos de corte e moagem, caracterização e classificação segundo as normas NBR 10.004 a 10.007 (ABNT, 2004). Na sequência, com o auxílio de uma prensa térmica, foi possível confeccionar as placas poliméricas e caracterizá-las quanto às suas propriedades mecânicas (tração, flexão, punção), físicas (absorção em água, inchamento, densidade e dureza), térmicas (condutividade térmica) e quanto ao seu potencial de durabilidade (resistência ao impacto, à abrasão superficial, ao ataque químico, à exposição ao ultravioleta e às intempéries, resistividade elétrica e flamabilidade). Os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados apontaram que os parâmetros ensaiados comportaram-se como materiais semelhantes àqueles utilizados na construção civil, o que possibilita a utilização do material desenvolvido nesta pesquisa em aplicações por este setor.

Palavras-chave: resíduo industrial de poliuretana termofixa, reciclagem, resina vegetal de mamona, fibras de vidro, compósito polimérico, placas poliméricas.

ABSTRACT

BALDAN, V. J. S. **Development and characterization of polymeric plates produced from the recycling of industrial waste thermoset polyurethane.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2015.

This study proposes the development of a composite material in the form of polymer slabs. The material is created from the incorporation of recycled thermoset polyurethane to castor oil resin and glass fiber mats. Composite materials are formed by two phases with different chemical and physical properties. One phase is a matrix, and the other a reinforcement. These materials are highly stiff, light, have mechanical strength and present better responses to fatigue under cyclic loads. These properties make them a substitute for noble materials, being eligible for uses in aviation, sports, the arms industry and, specially, civil construction. Furthermore, composites may be obtained by the incorporation of residue, solving problems of waste disposal. In the procedures undertaken, the industrial waste of thermoset polyurethane is transformed into a recycled aggregate, achieved by the cutting, grinding, characterization and classification in compliance to the ABNT standards (NBR 10.004 to 10.007). Afterwards, with the use of a thermal press, it was possible to produce the slabs and characterize them according to the following properties: mechanical (tensile strength, and puncture), physical (water absorption, swelling and stiffness), thermal (conductivity) and the potential durability (resistance to impact, abrasion, chemical attack, ultraviolet and weather exposure, electrical resistance, and flammability). The test results indicated that the composite behaves similarly to materials used in civil construction, which enables its use in the area.

Keywords: industrial waste of thermoset polyurethane, recycling, castor oil resin, glass fiber, polymer composite, polymer slab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Divisão dos resíduos sólidos de acordo com origem, a partir da PNRS.....	8
Figura 2.2 – Síntese da uretana	20
Figura 2.3 – A molécula da poliuretana.....	21
Figura 2.4 – Fruto da mamoneira	23
Figura 2.5 – Fluxograma da obtenção do óleo de mamona	24
Figura 2.6 – Fibra de vidro	27
Figura 3.1 – Estrutura Metodológica	30
Figura 3.2 – Resíduo industrial de poliuretana na forma disponibilizada pela INPOL.....	31
Figura 3.3 – Pré-polímero e polioli, que compõem a resina vegetal de mamona....	32
Figura 3.4 – Representação da formulação da resina para sua aplicação	32
Figura 3.5 – Fibra de vidro utilizada na composição das placas poliméricas desta pesquisa	34
Figura 3.6 – Moinho adquirido pelo lcc-iau para a moagem do resíduo industrial de poliuretana	36
Figura 3.7 – Peneiras granulométricas utilizadas para a moagem do resíduo industrial.....	36
Figura 3.8 – Prensa térmica desenvolvida pelos técnicos do LCC/IAU	41
Figura 3.9 – Forma metálica desenvolvida no LCC/IAU	42
Figura 3.10 – Agregado reciclado acrescido de resina de mamona	44
Figura 3.11 – Preenchimento da forma com a mistura.....	44
Figura 3.12 – Nivelamento da mistura na forma	45
Figura 3.13 – Prensagem das placas poliméricas	46
Figura 3.14 – Placa polimérica pronta.....	48
Figura 3.15 – Máquina universal de ensaios	49
Figura 3.16 – Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração	50
Figura 3.17 – Instalação dos termopares na superfície da caixa e na placa cerâmica inferior.....	56
Figura 3.18 – Instalação dos termopares na placa polimérica	56
Figura 3.19 – Preparação do corpo de prova para ensaio de flamabilidade	58
Figura 3.20 – Aplica�o da chama no corpo de prova polimérico.....	58

Figura 3.21 – Célula de resistividade e fonte de resistência elétrica.....	60
Figura 3.22 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao ultravioleta e às intempéries.....	63
Figura 3.23 – Placas ensaiadas com diferentes idades	64
Figura 4.1 – A poliuretana como mistura de suas matérias primas	65
Figura 4.2 – Conjunto de formas utilizadas na moldagem das placas de poliuretana em forma de placas	66
Figuras 4.3 e 4.4 – Corte das peças de pu e a geração do resíduo de poliuretana	66
Figura 4.5 – Resíduos de poliuretana das peças produzidas pela inpol.....	67
Figura 4.6 – Descarte de material utilizado na fabricação das peças de PU....	67
Figura 4.7 – AG 05 e AG 10	68
Figura 4.8 – Corpo de prova após a realização do ensaio de flamabilidade	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Quantidade de material utilizado para a confecção de cada tipologia de placa polimérica	43
Tabela 3.2 – Tipologia das placas poliméricas produzidas e suas características	47
Tabela 4.1 – Determinação do módulo de finura e de diâmetro máximo característico dos agregados reciclados	69
Tabela 4.2 – Classificação dos tipos de um material quanto ao seu módulo de finura.....	69
Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de lixiviação do agregado reciclado de poliuretana	70
Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de solubilização do agregado reciclado de poliuretana	71
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de solubilização do agregado reciclado de poliuretana oriundo da placa polimérica	72
Tabela 4.6 – Tipologia das placas poliméricas produzidas e suas características	75
Tabela 4.7 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 01	76
Tabela 4.8 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 02	76
Tabela 4.9 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 03	77
Tabela 4.10 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 04.....	78
Tabela 4.11 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 05.....	78
Tabela 4.12 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 06.....	79
Tabela 4.13 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas placas da tipologia 07.....	79
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de absorção em água.....	80
Tabela 4.15 – Resultados dos ensaio de inchamento	82
Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios de densidade	83
Tabela 4.17 – Resultados obtidos com os ensaios de propriedades térmicas.....	84

Tabela 4.18 – Valores de condutividade térmica de materiais utilizados na construção civil	84
Tabela 4.19 – Resultados dos ensaio de flamabilidade	85
Tabela 4.20 – Critérios de avaliação do ensaio de flamabilidade	86
Tabela 4.21 – Avaliação dos critérios para classificação da placa polimérica quanto à sua flamabilidade.....	86
Tabela 4.22 – Valores de rigidez dielétrica de diferentes materiais	88
Tabela 4.23 – Valores de rigidez dielétrica da placa polimérica	88
Tabela 4.24 – Estágio e classes de abrasão	89
Tabela 4.25 – Resultados do ensaio de abrasão superficial da placa polimérica.....	89
Tabela 4.26 – Classificação dos revestimentos cerâmicos com relação à sua abrasão superficial	90
Tabela 4.27 – Resultados do ensaio de resistência ao ataque químico	92
Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo.....	93
Tabela 4.29 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo.....	94
Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo.....	95
Tabela 4.31 – Comparação entre os resultados de caracterização mecânica entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos	96
Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo.....	97
Tabela 4.33 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo.....	98
Tabela 4.34 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo.....	99
Tabela 4.35 – Comparação entre os resultados de absorção em água entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos	99
Tabela 4.36 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo	100
Tabela 4.37 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo	101

Tabela 4.38 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo	102
Tabela 4.39 – Comparação entre os resultados de inchamento entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos	102
Tabela 4.40 – Resultados dos ensaios de densidade das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo	103
Tabela 4.41 – Resultados dos ensaios de densidade das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo	104
Tabela 4.42 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo	104
Tabela 4.43 – Comparação entre os resultados de densidade entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos	105
Tabela A1 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo – resíduo polimérico #5	123
Tabela A2 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo – resíduo polimérico #10	125
Tabela A3 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 01	127
Tabela A4 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 02	127
Tabela A5 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 03	129
Tabela A6 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 04	129
Tabela A7 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 05	131
Tabela A8 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 06	131
Tabela A9 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 07	133

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Cálculo da absorção em água.....	53
Equação 02 – Cálculo do inchamento	54
Equação 03 – Cálculo da densidade	55

SUMÁRIO

Agradecimentos	vii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
Lista de figuras.....	xvii
Lista de tabelas	xix
Lista de equações	xxii
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Proposta e importância do trabalho	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivos gerais	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Conteúdo da dissertação	5
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Resíduos sólidos e rejeito: definições.....	7
2.2 Classificações dos resíduos sólidos	8
2.3 Reaproveitamento de resíduos sólidos e inovações no desenvolvimento de novos materiais	11
2.4 Compósitos.....	12
2.5 Polímeros	16
2.5.1 Definições.....	16
2.5.2 Classificação dos polímeros	17
2.5.3 Propriedades dos polímeros	18
2.6 A poliuretana.....	20
2.7 A resina vegetal de mamona	22
2.8 A fibra de vidro.....	26
3. Materiais e Métodos.....	29
3.1 Estrutura metodológica.....	29
3.2 Materiais.....	31
3.2.1 Resíduo industrial de poliuretana	31

3.2.2 A resina vegetal de mamona	31
3.2.3 A fibra de vidro	33
3.3 Métodos	35
3.3.1 Conhecendo a fonte geradora.....	35
3.3.2 Processo de transformação do resíduo industrial de poliuretana em agregado reciclado.....	35
3.3.3 Caracterização do agregado reciclado de poliuretana	37
3.3.3.1 Determinação da granulometria.....	37
3.3.3.2 Análise do extrato lixiviado	38
3.3.3.3 Análise do extrato solubilizado	39
3.4 Desenvolvimento do compósito polimérico e processo de manufatura das placas poliméricas	40
3.4.1 Procedimentos de manufatura das placas poliméricas.....	41
3.4.2 Dosagem dos materiais e corte das fibras de vidro	42
3.4.3 Preparação da resina vegetal, mistura e formação do colchão.....	43
3.4.4 Prensagem térmica	45
3.4.5 Desforma e cura.....	47
3.5 Caracterização mecânica das placas poliméricas	48
3.5.1 Ensaio de tração	48
3.5.2 Ensaio de flexão	50
3.5.3 Ensaio de punção	51
3.6 Caracterização das propriedades físicas	52
3.6.1 Absorção em água	52
3.6.2 Inchamento	53
3.6.3 Determinação da densidade	54
3.7 Caracterização das propriedades térmicas.....	55
3.8 Segurança contra o incêndio (ensaio de flamabilidade)	57
3.9 Caracterização quanto à durabilidade.....	59
3.9.1 Resistividade elétrica	59
3.9.2 Resistência à abrasão superficial	60
3.9.3 Ataque químico	61
3.9.4 Resistência à exposição ultravioleta e às intempéries.....	62

4. Análise e discussão dos resultados	65
4.1. Classificação e caracterização do agregado reciclado	65
4.1.1 Conhecendo a fonte geradora do resíduo industrial de poliuretana	65
4.1.2 Processo de moagem do resíduo industrial de poliuretana	67
4.1.3 Granulometria	68
4.1.4 Lixiviação e solubilização	69
4.2 Confeção das placas	73
4.3 Resultados dos ensaios de caracterização mecânica	75
4.4 Análises das propriedades físicas	80
4.4.1 Absorção em água	80
4.4.2 Inchamento	81
4.4.3 Determinação da densidade	82
4.5 Análise das propriedades térmicas	84
4.6 Segurança contra o incêndio	85
4.6.1 Flamabilidade	85
4.7 Desempenho quanto à durabilidade	87
4.7.1 Resistividade elétrica	87
4.7.2 Resistência à abrasão superficial	88
4.7.3 Ataque químico	90
4.7.4 Resistência ao envelhecimento à exposição ultravioleta e à exposição às intempéries	93
4.7.4.1 Caracterização mecânica	93
4.7.4.2 Absorção em água	96
4.7.4.3 Inchamento	100
4.7.5.4 Densidade	103
5. Conclusões	106
5.1 Objetivo específico 01	106
5.2. Objetivo específico 02	106
5.3 Objetivo específico 03	107
5.4 Objetivo específico 04	108
5.5. Objetivo específico 05	108
5.6 Objetivo geral 01	109

5.7 Objetivo geral 02	110
6. Propostas para trabalhos futuros	111
7. Referências.....	113
Anexos.....	121

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Na sociedade atual, as indústrias, impulsionadas pelo expressivo aumento da demanda pelos bens de consumo, em que os atos de consumir e descartar ocorrem de forma rápida e sucessiva, popularizados pelo crescimento populacional e pelo consequente fortalecimento da produção industrial, são, cada vez mais, obrigadas a apresentar novos produtos para um mercado exigente, dinâmico e competitivo.

Dessa forma, as atividades industriais, ao mesmo tempo em que oferecem benefícios para os indivíduos, através de seus inúmeros produtos, são responsáveis pela exploração de recursos naturais e pela consequente geração de rejeitos e de resíduos industriais que sobram da produção de bens de consumo.

Historicamente, os resíduos industriais, são considerados nocivos ao meio ambiente, pela própria transformação dos recursos naturais em bens de consumo, sendo que, deste processo, são geradas grandes quantidades de substâncias, na maioria das vezes, agressivas ao homem e ao espaço urbano. Daí, surge a necessidade de verificar o potencial de contaminação deste tipo resíduo bem como formas de tratá-lo. Além disso, a crescente geração de resíduo industrial, está tornando escassas as áreas para disposição deste tipo de resíduo, o que pode comprometer o equilíbrio dos ecossistemas e da vida (PABLOS, 2008).

Com base nesse paradigma, surge no século XX, discussões acerca do desenvolvimento sustentável, que sugerem suprir as necessidades da geração atual sem comprometer os recursos para o

futuro, reduzindo o uso de matérias primas e produtos e que incentivam a reciclagem e o reaproveitamento.

Assim, é estabelecido como atitude fundamentalmente responsável, por parte do ser humano, a necessidade de reciclar os resíduos por ele gerados, a fim de recuperar matéria e energia, diminuindo a utilização de recursos naturais, causando menor degradação ao meio ambiente e melhorando, de modo geral, as condições da vida em comunidade e promovendo a sustentabilidade ambiental.

1.2 Proposta e Importância do trabalho

O presente trabalho está baseado na reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa, como forma de minimizar seus impactos ambientais. Esse resíduo é oriundo das diversas atividades industriais da INPOL Indústria de Poliuretana, que está instalada no município de Novo Hamburgo, no estado do Rio Grande do Sul, e que atua desde o ano de 1.982 no desenvolvimento e na produção de peças de poliuretana, aplicadas em diferentes segmentos, dentre os quais, destacam-se o agrícola, o cerâmico, o moveleiro, o petroquímico, o têxtil e o coureiro-calçadista.

De acordo com sua classificação polimérica, a poliuretana pode ser termoplástica, ou seja, derretida e assim reaproveitada, ou como termofixa, não podendo ser derretida ou fundida para novamente ser utilizada (SICHERI, 1996). Como o resíduo industrial de poliuretana utilizado neste estudo é classificado como termofixo, um dos grandes desafios da presente pesquisa, foi desenvolver a adequada reciclagem deste resíduo, por meio de sua moagem.

Além disso, foi proposto adicionar o agregado reciclado, oriundo

da reciclagem (moagem) do resíduo industrial de poliuretana termofixa, à resina vegetal de mamona e à fibra de vidro, com o objetivo de desenvolver um compósito conforme sugerem as pesquisas desenvolvidas por Rosa e Guedes (2003), Motta (2005), Rodrigues (2008) e Neto (2011) e caracterizá-lo quanto às suas propriedades mecânicas, por meio dos ensaios de tração, flexão e punção, físicas (absorção em água, inchamento e densidade) e térmica (condutividade térmica), segurança contra o incêndio (flamabilidade) e durabilidade (resistividade elétrica, abrasão superficial, ataque químico e resistência à exposição ultravioleta e ao intemperismo).

O desenvolvimento de compósitos – material composto por duas fases de diferentes propriedades químicas e físicas e formados por uma matriz – no caso desta pesquisa, polimérica – e por um reforço, pode utilizar resíduos em sua composição, o que os torna viáveis para substituir materiais nobres e de custo elevado, podendo ser aplicados em diversas áreas como os esportes, a aeronáutica e a construção civil.

Cabe destacar que, nesta pesquisa, o agregado reciclado foi adicionado à resina derivada do óleo vegetal de mamona pelo fato desta resina possuir a vantagem de ser um material obtido a partir de recurso natural e renovável e por não ser prejudicial à saúde, que adicionada ao agregado reciclado, resultou na matriz polimérica do compósito estudado.

Já a manta de fibra de vidro, conforme afirma Ota (2004), foi utilizada como reforço, por ser altamente resistente, possuir excelentes propriedades mecânicas e ser de baixa densidade, permitindo a produção de peças com variedade de formatos e tamanhos, e de diversas aplicações, como pranchas de surf, fuselagens de aviões e cascos e hélices de barcos.

Portanto, as principais contribuições desta pesquisa visam o

desenvolvimento de um compósito a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana, que, por constituir uma alternativa mais viável ao descarte, além de minimizar os passivos ambientais e promover o desenvolvimento de novos materiais, torna possível a utilização de um resíduo extraído de um determinado setor no desenvolvimento de um novo material com aplicação por outro setor distinto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

A presente pesquisa teve dois objetivos principais:

- Promover a reciclagem do resíduo industrial de poliuretana, a fim de transformá-lo em agregado reciclado;
- Desenvolver, a partir do agregado reciclado de poliuretana, um compósito polimérico e caracterizá-lo quanto às suas propriedades físicas e térmicas, segurança contra o incêndio e durabilidade.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos relativos à reciclagem do resíduo industrial de poliuretana em agregado reciclado são:

- Desenvolver o procedimento adequado para reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa e classificar o material obtido de acordo com sua granulometria;
- Classificar o resíduo reciclado quanto ao seu potencial de contaminação (lixiviação e solubilização).

Os objetivos específicos relativos ao desenvolvimento do compósito polimérico e sua caracterização em relação às suas propriedades físicas e térmicas e à sua durabilidade são:

- Confeccionar placas poliméricas a partir da utilização do agregado reciclado de poliuretana, da resina vegetal de mamona e das fibras de vidro, em diferentes tipologias, com o propósito de qualificar o compósito desenvolvido;
- Avaliar o comportamento mecânico (ensaios de tração, flexão e punção) de cada tipologia de placa polimérica confeccionada, a fim de determinar a melhor tipologia confeccionada;
- Analisar as propriedades físicas (absorção em água, inchamento e densidade) e térmica (condutividade térmica), segurança contra o incêndio (flamabilidade) e a durabilidade (resistividade elétrica, abrasão superficial, ataque químico e resistência à exposição ultravioleta e ao intemperismo) da melhor tipologia de placa desenvolvida, comparando os resultados obtidos com a normatização brasileira e com dados da literatura.

1.4 Conteúdo da Dissertação

Esta Dissertação contém seis capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Análise e Discussão dos Resultados, Conclusões e Propostas para trabalhos futuros.

No capítulo 1, estão dispostos as ideias centrais, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 compreende a revisão bibliográfica sobre os assuntos que delimitam a pesquisa. Os temas pesquisados foram resíduos sólidos, desenvolvimento sustentável, compósitos, polímeros, resina vegetal de mamona e fibras de vidro.

O capítulo 3 apresenta e detalha os materiais aplicados na pesquisa e os procedimentos da fase de investigação experimental, recorrendo sobre os procedimentos dos ensaios de cada etapa.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos na fase de investigação experimental e as discussões acerca desses resultados, que estão fundamentadas na normatização brasileira ou em dados da literatura.

O capítulo 5 apresenta as conclusões referentes à pesquisa.

No capítulo 6, são indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros e desdobramentos da pesquisa.

Para finalizar, o Capítulo 07 apresenta a bibliografia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos e rejeito: definições

Massukado (2004), Marques Neto (2005), Souto e Povinelli (2013) e Córdoba (2014), definem resíduos sólidos como sendo todos os resíduos sólidos ou semissólidos oriundos das atividades humanas ou naturais que podem transformar-se em matéria para outras atividades.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos englobam todos os materiais, substâncias ou objetos originados por atividades humanas, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Já a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), define resíduos sólidos como sendo todos os materiais encontrados nos estados sólido e semissólido oriundos de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços, da construção civil, além do descarte dos produtos eletroeletrônicos.

Por outro lado, por não haver tratamento para sua reciclagem ou reaproveitamento, o rejeito é considerado um tipo específico de resíduo sólido, sendo que, a única destinação possível é o seu depósito em um aterro sanitário. (PNRS, 2010).

A maneira de diferenciar resíduo sólido de rejeito é de fundamental importância devido à implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Portanto, estabelecer o resíduo

sólido como sendo reutilizável e reciclável, é um dos principais, senão o mais importante item estabelecido pela PNRS, pois, além de enaltecer os ganhos ambientais, possibilita gerar renda e emprego.

2.2 Classificações dos resíduos sólidos

De acordo com Leite (1997), os resíduos sólidos são classificados da seguinte maneira: natureza física (seco ou molhado), composição química (matéria orgânica ou inorgânica) e biodegradabilidade (facilmente, moderadamente, dificilmente degradáveis e não degradáveis).

Entretanto, tais critérios de classificação ainda podem ser conforme a sua origem ou fonte geradora e segundo os riscos potenciais (periculosidade) que os resíduos sólidos oferecem ao meio ambiente ou à saúde humana.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), subdivide os resíduos sólidos em treze categorias de acordo com sua origem ou fonte geradora:

Figura 2.1 – Divisão dos resíduos sólidos de acordo com sua origem, a partir da PNRS

Fonte: NEPER (2014)

Conforme a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos, por sua vez, são classificados de acordo com sua periculosidade, sendo:

- Resíduos classe I – Perigosos:

“Apresentam ao menos uma das características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade”;

- Resíduos classe II – Não Perigosos:

- Classe II A – Não Inertes:

“São resíduos que não estão enquadrados nas classificações dos resíduos classe I – perigosos, resíduos classe II B – Inertes e nos termos da NBR 10.004 (ABNT, 2004), podendo apresentar características como a combustibilidade e a solubilidade em água”.

- Classe II B – Inertes;

“Os resíduos inertes são considerados quaisquer resíduos, que quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor”.

A caracterização do grau de periculosidade de um resíduo sólido, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), pode ser estabelecida pela obtenção dos resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, prescritos respectivamente pela NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004).

O ensaio de lixiviação é definido como o processo que, através de dissolução, determina o potencial de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólidos. Ou seja, a partir do processo de lixiviação, é possível determinar o potencial de periculosidade dos constituintes de um tipo específico de resíduo sólido.

Já o ensaio solubilização, foi desenvolvido com o objetivo de simular a deposição dos resíduos sólidos em um aterro quando submetidos ao ataque de solventes em condições estáticas, a fim de representar a situação destes resíduos quando dispostos em regiões com solo saturado.

A presente pesquisa, por tratar a reciclagem de um resíduo industrial – neste caso, o resíduo industrial de poliuretana termofixa – destaca o potencial de contaminação, suas definições e algumas potencialidades para a reciclagem deste resíduo.

Para isso, a pesquisa recorreu à Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que por meio do seu artigo 13, torna claro a definição de resíduos industriais como sendo o resíduo oriundo de processos de produção ou de instalações industriais. Nessa definição, também estão inclusos os resíduos que apresentam elevado potencial de impacto ambiental e que ofereçam sérios riscos à saúde humana, necessitando assim, de tratamentos especiais.

Com relação ao resíduo industrial, vale ressaltar que processo

de produção industrial gera uma grande variedade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que podem ser reutilizados ou reaproveitados na sua grande maioria.

Para adaptar-se à essa legislação e como forma de preservar o meio ambiente, deve ser recomendado, a exploração ao máximo do ciclo de vida dos produtos, visando reaproveita-los sempre que possível e preferindo aqueles que, posteriormente, possam ser reciclados ou reaproveitados.

2.3 Reaproveitamento de resíduos sólidos e inovações no desenvolvimento de novos materiais

Estudos realizados por Fiorelli (2002), Nascimento (2003) e Almeida (2011) apresentaram o desenvolvimento de materiais conhecidos como biomateriais, ou ecomateriais, como por exemplo, telhas com fibras vegetais, tijolos feitos com “terra crua”, estruturas feitas com reaproveitamento de madeiras e materiais recicláveis, entre outros. Vários destes produtos já estão sendo experimentados e demonstrados em protótipos. Por isso, o desenvolvimento contínuo dos componentes há muito se faz sentir na arquitetura e construção civil.

Ainda, foram desenvolvidos alguns estudos que permitiram a aplicação de determinados tipos de resíduos oriundos dos mais setores na confecção de materiais com aplicação na construção civil.

Por exemplo, a pesquisa de Salado (2011) visou aplicar tubos de papelão, que é um resíduo oriundo da indústria de papel, como componente alternativo para o desenvolvimento de um novo sistema construtivo para a produção habitacional, em substituição aos tradicionais sistemas de alvenaria.

Pablos (2008) e Nogueira (2011) desenvolveram peças de

concreto com aplicação na construção civil, a partir da estabilização e solidificação de um resíduo industrial oriundo de açiarias, visando a diminuição dos passivos gerados por estas indústrias e a inserção de um novo material na construção civil.

Visando o desenvolvimento de materiais a partir da utilização de resíduos dos mais variados setores, cabe reforçar que, neste sentido, os compósitos reforçados com fibras naturais ou sintéticas, surgem como uma boa alternativa no campo dos materiais para aplicações em diversos setores, como a construção civil, a indústria aeronáutica e a automobilística.

2.4 Compósitos

De acordo com Silva (2002), Monteiro et. al. (2006), Marinelli et. al. (2008) e Esswein Junior (2009), compósitos podem ser definidos como materiais multifásicos elaborados de maneira artificial, compostos por dois ou mais materiais que não sejam miscíveis, sejam compatíveis quimicamente e apresentem propriedades mecânicas complementares.

De forma geral, é possível definir um compósito como um produto que apresenta em sua composição, pelo menos dois materiais ou duas fases, sendo uma matriz e um reforço, com propriedades físicas e químicas diferentes, que, quando separados, os materiais ou fases do compósito mantêm suas características, porém quando misturados, formam um composto cuja suas propriedades não são obtidas com apenas um deles (TWE e LIAO, 2003).

As matrizes que podem ser metálicas, poliméricas e cerâmicas, são tipos de materiais que conferem estrutura ao material compósito, preenchendo os vazios que ficam entre os materiais de reforços. Os

reforços realçam propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do compósito como um todo (MARINELLI et.al., 2008).

Ainda, cabe destacar que alguns materiais de reforço são as fibras orgânicas, como o nylon e o poliéster, as fibras vegetais, como o sisal e as fibras de coco, de carbono, de vidro, de quartzo, metálicas, entre outras.

A grande versatilidade de fabricação e manipulação aliada à capacidade mecânica em aplicações estruturais proporcionam aos compósitos as mais diferentes aplicações de engenharia, incluindo-se os equipamentos esportivos, como tacos de golfe, raquetes de tênis e pranchas de surf e windsurfe, em proteção balística, cujas aplicações vão desde materiais para capacetes de soldados a coletes balísticos e blindagens para carros de combate e outros veículos militares, como lanchas e helicópteros e na fuselagem de aviões (GUIMARÃES, 2006).

Em vista disso, Silva (2003) afirma que é crescente o número de pesquisas desenvolvidas sobre compósitos. Esse interesse surge com intensidade na década de 90, devido às exigências legislativas quanto ao uso e destino final de fibras sintéticas e resinas derivadas do petróleo além da maior conscientização dos consumidores, da grande necessidade da preservação do meio ambiente e de fontes naturais e do desenvolvimento crescente número de pesquisas nesta área.

Fiorelli (2002) propôs em sua pesquisa de Mestrado, estudar o comportamento estrutural de vigas de madeira de espécies nacionais reforçadas com fibras de carbono e com fibras de vidro, e com isso, além de verificar a eficiência deste reforço e avaliar a resistência e a rigidez das vigas reforçadas, também verificar a eficiência de uma formulação de adesivos à base de mamona para fixação das

respectivas fibras na madeira, em substituição ao adesivo epóxi, normalmente utilizado. Para tal, foram efetuados ensaios de vigas de madeira reforçadas com polímeros, em modelo reduzido, e em protótipos, para diversas configurações de geometria e quantidade de fibras utilizadas. Os resultados obtidos indicam uma boa concordância entre os modelos teóricos para avaliar a resistência e a rigidez das vigas reforçadas, e os resultados experimentais, e a eficiência do reforço. Também foram conduzidos ensaios de tração em corpos-de-prova de fibras laminado com os adesivos, caracterizando a sua resistência e elasticidade e comparando o comportamento dos adesivos estudados. Os resultados indicaram o melhor comportamento do adesivo epóxi.

Nascimento (2003) analisou as propriedades mecânicas e físicas de compósitos produzidos a partir da utilização de resíduos de espécies de madeira do nordeste e da resina vegetal de mamona. Os resultados obtidos, demonstraram que o material desenvolvido pode ser aplicado como elemento de vedação vertical e horizontal na construção civil.

Silva (2003) em sua tese de doutorado processou e caracterizou o compósito formado por uma resina de poliuretano derivada do óleo da mamona e fibras de sisal e coco, por meio dos ensaios de tração, flexão, impacto, tenacidade à fratura e absorção de água. Os resultados mostraram que o desempenho dos compósitos com fibras de coco foi inferior aos compósitos com fibra de sisal.

Rodrigues (2008) desenvolveu em sua pesquisa de doutorado, uma tecnologia para a atenuação do impacto provocado pelo passivo ambiental gerado por pneus inservíveis, conjuntamente ao desenvolvimento de novos materiais compostos para uso na construção civil, a partir da utilização da borracha de pneus inservíveis. Após os pneus serem picados por processo mecânico,

foram confeccionadas placas de amortecimento sonoro e de revestimento de pisos para edificações. O agente de aglomeração utilizado foi a resina poliuretânica derivada do óleo de mamona (*Ricinus communis*). O composto obtido foi testado com relação à durabilidade, às propriedades mecânicas como resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e fluência por meio de termo análise. Os resultados apresentados foram satisfatórios, o que confirmou sua aplicação na construção civil como um elemento de vedação vertical e horizontal.

Borges (2009) em sua dissertação analisou o desempenho térmico do material compósito confeccionado a partir de uma matriz vegetal de poliuretano derivado do óleo da mamona com carga de vermiculita expandida em relação aos disponíveis comercialmente. Para tal, moldou corpos de prova com diferentes proporções em massa (10%,15% e 20%) para determinar propriedades térmicas como condutividade, difusidade e capacidade calorífica. Com base na análise dos resultados de desempenho e propriedades térmicas, foi possível concluir que os compósitos de poliuretano de mamona com carga de vermiculita expandida apresentaram bom comportamento com relação àqueles obtidos pelos materiais de isolamento disponíveis comercialmente.

Esta pesquisa procurou incorporar o agregado reciclado de poliuretana termofixa, oriundo da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana à resina vegetal de mamona e às fibras de vidro, que a partir da moldagem por compressão térmica, resultou em um compósito de matriz polimérica. Com isso, foi possível analisar o comportamento mecânico, as propriedades físicas e térmicas, a segurança contra o incêndio e o potencial de durabilidade de do material desenvolvido. Os resultados obtidos, quando comparados com materiais comumente aplicados na construção civil mostraram-

se satisfatórios.

2.5 Polímeros

2.5.1 Definições

A palavra polímero tem origem grega e significa muitas (poly) partes (meros). Entretanto, o atual conceito de polímeros surgiu por volta de 1930, definido como macromoléculas obtidas a partir de associações de pequenas moléculas, os monômeros, unidas umas às outras por ligações covalentes resultantes de muitas reações de adição ou condensação consecutivas. O processo de transformação desses monômeros, formando o polímero, é chamado de polimerização. Os monômeros ligam-se repentinamente formando cadeias longas (SICHERI, 1996).

A utilização dos materiais poliméricos remete à pré-história, porém, somente no século XIX, é que o homem começou a utilizá-los a partir de diversas formas. Os materiais poliméricos incluem os plásticos, a borracha, o isopor, entre outros materiais.

No início do século XX, muitos pesquisadores manifestaram o interesse em estudar o comportamento anormal na composição de algumas substâncias, o que os levou a orientar suas investigações na área dos materiais poliméricos.

No ano de 1953, o químico alemão Hermann Staudinger, apresentou um experimento em que, dentro dessas substâncias haviam grandes moléculas com milhares de átomos estavam unidos por meio de ligações covalentes. Por isso, o desenvolvimento dos polímeros se torna eficiente e propício (ARAÚJO, 1998).

Devido às suas propriedades diferenciadas, os polímeros são

capazes de substituir vários outros materiais, como o metal, a cerâmica e o concreto, o que permite projetar peças de grande complexidade com baixo peso, além de melhorar sua aparência e reduzir os custos.

Os polímeros apresentam uma série de vantagens, das quais, destacam-se a não corrosibilidade, a baixa manutenção, altos valores de isolamento, são leves (o que os torna fácil de serem manipulados) e tenazes (o que reduz a quebra). Além disso, podem ser produzidos pelos métodos da extrusão, injeção ou sopro, o que permite uma fácil produção em massa de produtos padronizados e com baixos custos, tornando atrativa a aplicação deste material (CHAVES, 1998).

2.5.2 Classificação dos polímeros

Dependendo do tipo de encadeamento dos polímeros, é possível obter cadeia poliméricas de dois tipos: lineares ou tridimensionais (CALLISTER Jr., 2002).

Segundo Canevarolo (2002), nas cadeias poliméricas lineares, a sequência de monômeros é constituída de forma contínua e aumenta em uma única dimensão.

Quanto aos polímeros tridimensionais, estes possuem cadeias poliméricas que são formadas a partir de ligações covalentes, sendo que, dependendo da quantidade de ligações cruzadas originadas a partir destas ligações covalentes, é possível encontrar polímeros com baixa e alta densidade.

Levando em consideração o comportamento mecânico dos polímeros a classificação mais aceita divide-se em elastômeros, termoplásticos e termofixos, também conhecidos como termorrígidos

(ANDRADE, 2007).

Os elastômeros são tipos de polímeros que podem deformar-se pelo menos duas vezes o seu comprimento inicial em temperatura ambiente, podendo retornar a esse comprimento inicial assim que o esforço cessar.

Já os polímeros termoplásticos podem ser amolecidos ou liquefeitos por aquecimento e endurecidos por resfriamento repetidamente sem perderem suas propriedades, ou seja, sofrendo apenas alterações físicas reversíveis. Tal característica é muito interessante para a indústria devido às diversas possibilidades de moldagem que oferecem, assim como a possibilidade de sua reciclagem. Alguns exemplos de termoplásticos são: polietileno, poliestireno, PVC (policloreto de vinila) e nylon. Os polímeros lineares e os ramificados estão inseridos também nesta classificação.

Os polímeros termofixos ou termorrígidos, são materiais que fluem a uma determinada temperatura e pressão, mas que, ao se solidificar, não sofrerá mais nenhum tipo de influência, fazendo com que, os materiais poliméricos originados sejam infusíveis, insolúveis e não recicláveis (CHAVES, 1998).

Os exemplos comuns de polímeros termofixos são as resinas fenólicas, epóxi e alguns tipos de poliuretanas, assim como o resíduo industrial que foi utilizado como agregado para formação das placas poliméricas propostas nesta pesquisa.

2.5.3 Propriedades dos polímeros

De acordo com Sichieri (1996), as propriedades de maior interesse para a avaliação do desempenho dos polímeros pode ser classificado principalmente em propriedades mecânicas, absorção

de água e solventes, flamabilidade, ataque químico e ações climáticas.

O comportamento mecânico de um polímero é caracterizado por suas propriedades de “tensão x deformação”, ou seja, a partir do momento em que se aplica uma tensão no material polimérico para deformá-lo até provocar sua ruptura (ROCHA, 1997).

Ainda de acordo com o autor, o comportamento mecânico de um polímero pode ser classificado através dos ensaios de tração, flexão, compressão, resistência ao impacto, dureza e resistência à abrasão.

Quanto à absorção de água e solvente, grande parte dos polímeros são insolúveis em água, no entanto eles podem absorvê-la e assim afetar de forma variável algumas de suas propriedades, como as propriedades mecânicas.

A flamabilidade dos polímeros é variável e depende tanto da natureza química que fazem parte de suas composições. Porém, a combustão dos polímeros ocorre de modo análogo ao que ocorre com qualquer outro tipo de material combustível, ou seja, a partir da combinação de uma série de processos físico-químicos.

O processo de queima dos polímeros é definido por quatro estágios, sendo eles o aquecimento, a pirólise, a ignição e a propagação de chamas.

Todos os fatores são importantes para o desempenho dos polímeros. Entretanto, é na última etapa – propagação de chamas – que se baseia grande parte dos métodos utilizados para a avaliação da combustibilidade destes materiais (SICHIERI, 1996).

O comportamento ao fogo dos polímeros pode ser melhorado a

partir da adição de retardantes de chamas. Porém, a natureza química do polímero prevalece e o seu comportamento ao fogo não é totalmente alterado.

Com isso, pode-se dizer que a incorporação de retardantes de chamas nos materiais poliméricos, principalmente aqueles empregados na construção civil, pode garantir alguns minutos de segurança dos usuários frente às chamas, oferecendo um mínimo de condição para que o ambiente seja desocupado antes da liberação de gases tóxicos (CHAVES, 1998).

Por fim, Agnelli (1996) sugere que a resistência de um polímero quando submetido aos ataques químicos depende da natureza deste polímero e dos produtos químicos em questão. Ou seja, cada polímero tem uma resistência própria a determinado produto ou classe de produtos. Como exemplo, os polímeros termofixos com relação aos polímeros termoplásticos, são menos sensíveis aos ataques químicos.

2.6 A poliuretana

No final do século XIX, Wurtz sintetizou em laboratório, uma substância que chamou de uretana, sendo este, o produto da reação química entre o grupo dos isocianatos com o grupo hidroxila, produzindo uma substância que é caracterizada pela presença da ligação (–NH–CO–O–) (CANGEMI, 2006).

isocianato hidroxila uretana

Figura 2.2 – Síntese da uretana

Fonte: ARAÚJO (1998)

Uma das grandes características da uretana é apresentar

grande versatilidade quanto à variação de suas estruturas, com capacidade de formar várias unidades uretânicas, compondo assim, a poliuretana, ou simplesmente PU, como também é conhecida.

Figura 2.3 – A molécula da poliuretana

Fonte: ARAÚJO (1998)

Dependendo da escolha dos precursores, podem-se preparar tanto substâncias termofixas, termoplásticas, espumas rígidas ou adesivas. Por esse motivo, podem ser encontradas poliuretanas termoplásticas e termorrígidas ou termorrígidas, como é o caso do resíduo pesquisado na presente investigação científica.

Além disso, a PU pode apresentar uma série de densidades e durezas que variam a partir da definição do monômero aplicado, conferindo-lhe características como alta resistência à abrasão, adesão, dureza e resistência química.

Entretanto, foi a partir da década de 30, na Alemanha, após Otto Bayer desenvolver os primeiros materiais poliuretânicos, como as espumas de alta rigidez, que a PU passou a ter ampla aplicação comercial e industrial. Na sequência, durante a década de 40, também na Alemanha e na Inglaterra, que os primeiros elastômeros foram desenvolvidos. E na década de 50, surgem as espumas flexíveis de PU (CANGEMI et.al., 2006).

Atualmente, a poliuretana pode ser utilizada na confecção de colchões, assentos automotivos, na produção de tintas para

revestimento e resina para impermeabilização, isolantes térmicos, próteses médicas e solados de calçados.

A grande variabilidade de aplicação da poliuretana, faz com que seu consumo industrial seja elevado, o que leva a uma expressiva quantidade de geração de resíduos oriundos das indústrias de poliuretana. Por isso, nos últimos anos, há a grande preocupação com relação ao descarte desse tipo de resíduo, sendo que, a alternativa mais viável é a reciclagem.

2.7 A resina de mamona

A mamoneira, planta afroasiática, como é popularmente conhecida ou cientificamente *Ricinus communis*, pode ser classificada como uma planta oleaginosa afroasiática que possui óleos e gorduras de elevado valor industrial (CANGEMI, 2006).

De acordo com Chierice e Claro Neto (2001), o fruto da mamona foi introduzido no Brasil através dos portugueses, que tinham a necessidade de utilizar o óleo extraído na lubrificação dos rolamentos das carroças e na iluminação. Já nos dias atuais, a grande utilização da mamona é na produção do óleo, utilizado na fabricação de resinas poliuretânicas.

Figura 2.4 – Fruto da mamoneira

Fonte: SOUZA (2009)

O óleo de mamona, constituinte da semente da mamona, apresenta em sua maior composição o ácido ricinoléico e a hidroxila, sendo que, esta última, fornece a propriedade em álcool para o óleo. Cabe destacar, que o óleo da mamona consegue ser estável em diversas condições de temperatura e pressão (CLARO NETO, 1997; CANGEMI et.al., 2010).

Segundo informações apresentadas por Souza (2009), a extração do óleo da mamona pode ser realizada de duas formas: com a semente sem descascar – neste caso, com a semente completa, ou somente da semente da mamona descascada, conhecida como baga. Os procedimentos mais comuns para realizar a prensagem da semente da mamona são os processos térmicos (que podem ser a quente ou a frio), por meio da extração dessa semente ou a partir da utilização de alguns tipos de solventes.

Já as tortas, são obtidas a partir da primeira prensagem da semente da mamona. Na sequência, o composto originado através da prensagem são trituradas com solvente, passam por processos de aquecimento e são novamente prensadas. Com isso, é obtido o óleo comercial originado a partir da semente da mamona.

A figura 2.5 apresenta as etapas da extração do óleo da mamona:

Figura 2.5 – Fluxograma da obtenção do óleo de mamona

Fonte: SOUZA (2009)

A partir da cadeia carbônica do ácido ricinoléico é possível realizar diversas reações químicas, obtendo-se diversos produtos derivados por meio da modificação da estrutura dessa cadeia carbônica, sendo a maioria aplicada na utilização de produtos biodegradáveis (CANGEMI, 2006).

Uma das características que torna o óleo da mamona atrativo é o fato de que, suas características químicas quando comparadas aos

demais óleos vegetais, a tornam capaz de ser utilizada na fabricação de produtos como biodiesel, plásticos, fibras sintéticas, resinas, lubrificantes e com destaque de aplicação na área médica, com os biopolímeros, o que causou uma revolução na produção de órgãos artificiais (próteses) do corpo humano (SILVA, 2003).

De acordo com Ignácio et.al. (1996), os polímeros poliuretânicos são aplicados na área médica desde a década de 80. Isso foi possível devido às pesquisas desenvolvidas com organismos vivos que não apresentaram nenhum tipo de rejeição. Além disso, cabe destacar também, as pesquisas desenvolvidas com as resinas poliuretânicas.

As resinas poliuretânicas podem ser obtidas tanto do petróleo como de fontes naturais, por meio da extração de óleos vegetais. Estes óleos podem derivar de um número de vegetais, tais como soja, milho, canola, amendoim, oliva e como no caso desta pesquisa, da semente da mamona (PETROVIC, 1999).

Woods (1990) afirma que as resinas poliuretânicas oriundas de petróleo, são inflamáveis e quando queimadas, podem emitir gases tóxicos.

Já resina poliuretânica vegetal à base da mamona é completamente atóxica, pois não possui em sua composição, materiais voláteis e pesados. Também totalmente isenta de solventes e não é agressiva ao meio ambiente ou ao homem, possuindo alta resistência aos agentes agressivos, tais como ácidos, álcalis e bases. Além disso, a resina poliuretânica vegetal à base da mamona pode ser mono ou bi componente, como no caso da resina utilizada nesta pesquisa.

A resina monocomponente é constituída por pré-polímeros a base de isocianato que curam à temperatura ambiente por reação

com a umidade do ar.

Por outro lado, a resina poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona é formada de dois componentes: um pré-polímero com terminação isocianato e um poliálcool. Quando curados por polimerização, esses dois componentes reagem entre si, resultando em um composto poliuretano. Na mistura dos componentes, quanto maior a proporção do poliálcool mais flexível fica a estrutura da resina. O tempo total de cura é de 24 horas a temperatura ambiente e o tempo de manuseio é de aproximadamente 10 minutos (ASSAGRA, 2011).

A polimerização das resinas poliuretanas ocorre quando um composto com dois ou mais isocianatos em uma estrutura reage com um poliálcool, que é um tipo de álcool polifuncional (CANGEMI et.al., 2010).

Geralmente, antes de ocorrer a polimerização das resinas poliuretânicas, é necessário realizar a pré-polimerização. Essa pré-polimerização é oriunda da reação do di ou poliisocianato com determinadas proporções de polióis. Essa pré-polimerização se faz necessária pelo fato da alta reatividade dos compostos envolvidos nesta reação (ASSAGRA, 2011).

2.8 A fibra de vidro

A fibra de vidro ou polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), é um material composto por finos filamentos de vidro, que podem ser agregados por meio da adição de resinas, silicones e outros compostos solúveis em solventes orgânicos (SOARES et.al., 2007).

Por volta do ano de 250 a.C., artesãos gregos e egípcios produziam fibras de vidro com o auxílio de uma vara de vidro

aquecida para aplicar como relevo sobre a superfície de produto acabados.

Atualmente, as fibras de vidro podem ser obtidas pelo processo de fundição do vidro: depois de fundido, o vidro passa pelo processo de fiação, atravessando uma fieira, por onde as fibras são produzidas. Após o processo de fiação, as fibras são recobertas com algum tipo de resina.

Figura 2.6 – Fibra de vidro

Fonte: KEMERICH et.al. (2013)

De modo comercial, a fibra de vidro começou a ser utilizada no ano de 1939, com o intuito de fornecer rigidez e leveza aos equipamentos bélicos utilizados durante a 2ª Guerra Mundial.

Devido à sua alta resistência à tração, à grande inércia química e ao seu baixo custo de produção, nos dias de hoje, as fibras de vidro são normalmente utilizadas como reforços para polímeros termoplásticos e termorrígidos. Essas características viabilizam sua comercialização e a aplicação nos mais variados setores, como as indústrias bélica, aeronáutica e automobilística e no desenvolvimento de compósitos poliméricos (OTA, 2004).

Os compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de vidro apresentam características como leveza, elevado quociente entre resistência e peso, boa estabilidade estrutural, boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão, não conduzem corrente elétrica, apresentam resistência a ambientes altamente agressivos aos materiais convencionais, além da facilidade de fabricação e do custo relativamente baixo, podendo ter indicação para aplicação na construção civil (BARCELLOS et.al., 2009; MATHEUS, 2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estrutura Metodológica

A estrutura metodológica desenvolvida para esta pesquisa, foi basicamente experimental sendo dividida em 4 etapas e 10 subetapas:

- Primeira etapa: foi realizado o conhecimento da fonte geradora, para identificação todos os processos de produção da empresa fornecedora do resíduo e verificar como o resíduo é gerado;
- Segunda etapa: com os processos identificados na primeira etapa, se permitiu transformar o resíduo de poliuretana termofixa em agregado reciclado, e classificá-lo e caracterizá-lo o quanto à sua granulometria e quanto ao seu potencial de contaminação, por meio da realização dos ensaios de lixiviação e solubilização;
- Terceira etapa: a partir da primeira e segunda etapa, foi possível confeccionar tipologias de placas poliméricas a partir do compósito polimérico formado pelo agregado reciclado de poliuretana, pela resina vegetal de mamona e pelas fibras de vidro, e analisar, a partir da caracterização mecânica, a melhor tipologia confeccionada;
- Quarta etapa: por fim, na quarta etapa, consequente as etapas anteriores, se permitiu caracterizar a tipologia de placa polimérica selecionada quanto às suas propriedades físicas, térmicas e à sua durabilidade.

A figura 3.1 apresenta a estrutura metodológica:

Figura 3.1 – Estrutura Metodológica

3.2 Materiais

3.2.1 Resíduo industrial de poliuretana

O resíduo de poliuretana utilizado nesta pesquisa foi cedido pela INPOL – Indústria de Poliuretana, localizada no município de Novo Hamburgo/RS, e foi gerado pelos vários processos industriais desenvolvidos nesta empresa.

Figura 3.2 – Resíduo industrial de poliuretana na forma disponibilizada pela INPOL

3.2.2 A resina vegetal de mamona

A resina a base de poliuretana vegetal, ou simplesmente, resina vegetal de mamona, utilizada no desenvolvimento da presente pesquisa foi desenvolvida e gentilmente fornecida pela Imperveg Polímeros Indústria e Comércio Ltda.

Esta resina, é um material obtido a partir de recurso natural e renovável, bi-componente, chamado de pré-polímero (que tem função adesiva) e poliol (que tem função catalisadora).

Figura 3.3 – Pré-polímero e poliál, que compõem a resina vegetal de mamona

Fonte: RODRIGUES (2008)

Sua formulação ocorre a partir da mistura a frio do pré-polímero e do poliál, nas proporções de 2:1, ou seja, para cada duas partes de pré-polímero, deve ser adicionada uma parte de poliál, apresentando assim, função aglomerante no compósito desenvolvido.

Figura 3.4 – Representação da formulação da resina para sua aplicação

Fonte: RODRIGUES (2008)

De acordo com os dados do fornecedor, a resina utilizada nesta pesquisa apresentam os seguintes dados técnicos:

- Densidade: 1,05 g/cm³;
- Consistência: fluida;

- Resistência ao calor: apresenta perda de massa somente após 210°C;
- Tempo de aplicação após a mistura/tempo de endurecimento: 10 a 20 minutos;
- Secagem ao toque: de 50 a 180 minutos, dependendo da temperatura ambiente;
- Temperatura de cura: entre 50°C e 100°C;
- Tempo total de cura: até 24 horas, dependendo da temperatura ambiente. Em dias mais quentes, a cura acontece mais rápido.

Ainda, de acordo com dados do fabricante, a resina pode ser aplicada como impermeabilizante de reservatório de água, revestimento de pisos com tráfego intenso e de tanques de aço carbono e como aglomerante para compósitos de fibras, conforme a utilização nesta pesquisa.

3.2.3 A fibra de vidro

Com o objetivo de aumentar a rigidez das placas poliméricas a serem confeccionadas, bem como inserir o reforço sugerido para um compósito, foram realizados alguns estudos que apontaram como solução, a aplicação da manta de fibra de vidro no processo de confecção do compósito de estudo. A fibra de vidro utilizada nesta pesquisa foi gentilmente fornecida pela empresa Tecnofibras Comércio e Acessórios de Fibras de Vidro, que tem sede no município de São Carlos/SP.

Figura 3.5 – Fibra de vidro utilizada na composição das placas poliméricas desta pesquisa

Para isso, foi incorporada ao processo de produção do compósito, a manta de fibra de vidro disponível comercialmente, cujas especificações do fornecedor são:

- Diâmetro das fibras: 15 micros;
- Espessura das fibras: 0,53 mm;
- Resistência mecânica: entre 1.200 e 2.000 MPa;
- Módulo de elasticidade: 80.000 MPa;
- Densidade: 2,72 kg/m³;
- N° de fibras/kg: 255 milhões.

O fornecedor ainda destaca que as fibras de vidro, são facilmente incorporadas no compósito, não criando aspereza à sua superfície, são inorgânicas e incombustíveis, não se oxidam e apresentam alta resistência aos agentes químicos.

3.3 Métodos

3.3.1 Conhecendo a fonte geradora do resíduo industrial de poliuretana

Com o objetivo de levantar dados sobre a fonte geradora do resíduo utilizado nesta pesquisa, foram realizadas duas visitas técnicas à INPOL Indústria de Poliuretana, que está instalada desde o ano de 1982 no município de Novo Hamburgo/RS.

Nestas visitas, foi possível conhecer os processos de produção, cura e estoque, bem como identificar o descarte dos resíduos gerados ao longo destes processos.

Conhecer os processos operacionais da INPOL é de suma importância para entender como é gerado o resíduo de poliuretana ao longo do processo de produção.

3.3.2 Processo de reciclagem do resíduo industrial de poliuretana em agregado reciclado

O processo de transformação do resíduo industrial de poliuretana em agregado reciclado foi possível através de sua moagem.

Para a moagem do resíduo industrial de poliuretana, foi adquirido pelo Laboratório de Construção Civil (LCC/IAU), o moinho da marca MA 580, produzido pela empresa MARCONI Equipamentos para Laboratórios e composto com três facas internas para corte de plásticos e madeira.

Figura 3.6 – Moinho para a moagem do resíduo industrial de poliuretano

Junto com o moinho, foram adquiridas duas peneiras granulométricas, especificadas pela empresa como meshe 05 e meshe 10. A diferença entre elas, é que a abertura da malha da peneira meshe 05 é maior que a abertura da malha da peneira meshe 10, o que tornou possível, a obtenção de dois tipos de agregado.

Figura 3.7 – Peneiras granulométricas utilizadas para a moagem do resíduo industrial de poliuretano termofixa (à esq., meshe 05 e à direita, meshe 10)

A partir desta moagem, foi possível obter dois tipos de agregados, identificados inicialmente como AG 05 e AG 10. Essa identificação está relacionada com as especificações das peneiras meshe 05 e meshe 10, de acordo com as especificações fornecidas pela empresa MARCONI Equipamentos para Laboratório.

3.3.3 Caracterização e classificação do agregado reciclado de poliuretana

A seguir, são apresentados os procedimentos para a caracterização do agregado com relação à granulometria e classificação quanto ao seu potencial de contaminação, por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização. Cabe destacar, que estes ensaios tem como objetivo, verificar o potencial de aplicação do agregado reciclado de poliuretana.

3.3.3.1 Determinação da granulometria

- **Objetivo:** Determinar as dimensões das partículas de cada um dos agregados reciclados em estudo, a fim de determinar suas características físicas.
- **Norma aplicada:** NM 248 (ABNT, 2003).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Construção Civil, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - As amostras de cada tipo de agregado foram secas em estufa, à temperatura de 110°C durante 24 horas, a fim de retirar a umidade presente.
- **Procedimentos experimentais (de acordo com informações retiradas da Norma NM 248, 2003):**

- As peneiras foram encaixadas, de forma a formar um único conjunto, com abertura de malhas em ordem crescente da base para o topo;
 - Individualmente, cada amostra do agregado reciclado foi colocada sobre a peneira superior do conjunto, de modo a evitar a formação de uma camada espessa de material sobre quaisquer peneiras;
 - Na sequência, foi realizada a agitação mecânica do conjunto durante 15 minutos, possibilitando a separação prévia dos diferentes tamanhos de grão da amostra;
 - Por fim, cada parte retida nas peneiras foi separada de acordo com o peneiramento.
- **Tratamento de dados:**
 - Para cada amostra de ensaio, foi calculada, em massa, a porcentagens médias retidas e acumuladas em cada peneira, o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos grãos;
 - Os resultados do ensaio foram expressos em tabelas e gráficos, conforme podem ser verificados no Anexo A.

3.3.3.2 Análise do extrato lixiviado

- **Objetivo:** Determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo em estudo por meio de dissolução para o meio ambiente.
- **Normas aplicadas:** NBR 10.004 (2004), NBR 10.005 (2004), NBR 10.007 (2004).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**

- 25 gramas de agregado reciclado, coletados de acordo com as recomendações da NBR 10.007 (ABNT, 2004).
- **Procedimentos experimentais:** Para obtenção do extrato lixiviado o resíduo é adicionado a solução de ácido acético glacial. A mistura é agitada mecanicamente e forma constante durante 18 horas, no equipamento extrator da marca Millipore. Na sequência, a solução lixiviada é submetida a processos de filtração: no primeiro momento, a solução é filtrada em papel filtro simples e depois em membranas mais finas, geralmente com o auxílio do compressor de vácuo. Com isso, é obtido o extrato lixiviado, que segue para análise de acordo com os parâmetros estabelecidas pela Norma NBR 10.004/2004.
- **Tratamento de dados:** Para identificar a presença de metais, o extrato lixiviado sofre o processo de digestão com ácidos nítrico e clorídrico. Após essa digestão, o extrato lixiviado é levado para o espectrofotômetro de absorção atômica, onde são calculados e obtidos os resultados.

3.3.3.3 Análise do extrato solubilizado

- **Objetivo:** Avaliar o potencial do resíduo em estudo de liberar seus componentes constituintes para água pura, comparativamente ao padrão de potabilidade.
- **Normas aplicadas:** NBR 10.004 (2004), NBR 10.006 (2004), NBR 10.007 (2004).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 250 gramas de agregado reciclado, coletados de acordo com as recomendações da NBR 10.007 (ABNT, 2004).
- **Procedimentos experimentais:** Para o ensaio de solubilização o

resíduo é adicionado a água destilada e submetido a agitação manual durante cinco minutos. Após essa etapa, a solução fica em repouso durante sete dias em temperatura constante. Na sequência, a solução solubilizada passa por filtragem, primeiramente em papel filtro simples e depois em membranas mais finas com o auxílio do compressor de vácuo. Com isso, é obtido o extrato solubilizado, que segue para análise de acordo com os parâmetros estabelecidas pela Norma NBR 10.004/2004.

- **Tratamento de dados:** Seguem os mesmos procedimentos descritos para o ensaio de lixiviação.

3.4 Desenvolvimento do compósito polimérico e processo de manufatura das placas poliméricas

Na revisão bibliográfica desta pesquisa, foram apresentados alguns estudos sobre compósitos, dos quais, destacam-se Silva (2003) e Rodrigues (2008) .

A partir destes estudos, foi possível definir a metodologia a ser seguida para a manufatura dos painéis propostos neste trabalho, que teve como um de seus objetivos, utilizar o agregado reciclado de poliuretano no desenvolvimento e na caracterização de materiais compósitos.

Ao analisar as referidas pesquisas, pode-se observar que as autoras, como forma de caracterizar o compósito desenvolvido em suas pesquisas, propuseram confeccionar placas, o que foi seguido nesta pesquisa.

Portanto, para que a pesquisa tornasse viável de ser realizada, foi necessária a utilização de uma prensa térmica, a fim de acelerar o processo de cura da resina vegetal de mamona e manufatura pela técnica de moldagem por compressão.

3.4.1 Procedimentos de confecção das placas poliméricas

De modo geral, o processo de manufatura das placas poliméricas desenvolvidas nesta pesquisa, foi baseado nas pesquisas de Almeida (2011). Com isso, foi possível desenvolver as seguintes etapas de manufatura das placas poliméricas: a) definição do traço; b) pesagem da quantidade de agregado, de pré-polímero e de polioli; c) adição do pré-polímero ao polioli, de forma a obter a resina vegetal de mamona; d) adição da resina ao agregado reciclado; d) formação do colchão sobre a forma metálica; d) prensagem; e) desforma e cura.

Para a confecção das placas poliméricas sugeridas nesta pesquisa, foram desenvolvidas pelo técnico Sérgio Aparecido Trevelin, do LCC/IAU, pelo Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos e pelo autor desta pesquisa, uma prensa térmica e uma forma metálica, que encontram-se no LCC/IAU.

Figura 3.8 – Prensa térmica para confecção das placas poliméricas

A prensa térmica desenvolvida possibilita que sejam controladas a temperatura, variando de 0 a 250°C e prensagem, de até 5 toneladas,

Junto a essa prensa, foi também desenvolvida uma fôrma metálica (figura 3.9), nas dimensões de 200 x 250 (mm) que permite moldar placas nestas dimensões e com espessuras de até 20 mm. Essa forma é capaz de suportar as altas temperaturas e os elevados carregamentos, conforme a prensa permite.

Figura 3.9 – Forma metálica para molde das placas

3.4.2 Dosagem dos materiais

A quantidade de agregados reciclados foram determinados de acordo com o traço de cada tipologia de placa confeccionada. Na sequência, foram pesados, nesta mesma balança, seguindo as recomendações do fabricante, o pré-polímero e o poliál utilizado na confecção de cada tipologia de placa confeccionada e foram promovidos os cortes nas mantas de fibras de vidro.

A tabela 3.1, mostra a quantidade de material utilizado para a confecção de cada tipologia de placa polimérica manufaturada.

Tabela 3.1 – Quantidade de material utilizado para a confecção de cada tipologia de placa polimérica

Tipologia	Agregado		Resina		Mantas de fibras de vidro (camadas)
	AG 05 (gramas)	AG 10 (gramas)	Pré-polímero (gramas)	Poliol (gramas)	
01	410	0	46	23	0
02	0	410	46	23	0
03	205	205	46	23	0
04	255	255	70	35	1
05	255	255	70	35	0
06	255	255	70	35	2
07	255	255	70	35	2

3.4.3 Preparação da resina vegetal, mistura e formação do colchão

Na sequência, o pré-polímero foi acrescentado ao polioli, e manualmente, foi agitado durante 3 minutos, a temperatura ambiente, até adquirir consistência de gel.

Com relação à mistura, primeiramente cada tipo de agregado foi acrescentado à resina de mamona (figura 3.10) em diferentes porções, de acordo com o traço estabelecido para cada tipologia de placa.

De forma manual, durante 3 minutos, a resina foi misturada junto do agregado reciclado. No caso da placa da tipologia 04, a mistura foi dividida em duas partes iguais. Já no caso das tipologias de 5 a 7, foram divididas em três partes, de forma a uniformizar o colchão na forma.

Figura 3.10 – Agregado reciclado acrescido de resina de mamona

As figuras 3.11 e 3.12 mostram o preenchimento da forma com a mistura agregado reciclado e resina vegetal de mamona junto das fibras de vidro e o nivelamento desta mistura como de garantir a espessura e estabilidade da placa.

Figura 3.11 – Preenchimento da forma com a mistura

Figura 3.12 – Nivelamento da mistura na forma

3.4.4 Prensagem térmica

De acordo com Silva (2003), o processo de confecção do compósito está ligado às características da matriz, principalmente no que diz respeito à temperatura. A técnica de moldagem por compressão pode ser aplicada em matrizes de polímeros termoplásticos ou termorrígidos. Entretanto, grande parte da aplicação da moldagem à compressão ocorre com polímeros termorrígidos, como no caso desta pesquisa.

Ainda de acordo com a autora, neste método, o compósito – fibras e resina – é inserido dentro de um molde que é subsequentemente fechado e mantido a alta pressão. Em grande parte dos casos, o molde é aquecido para iniciar e acelerar a reação de cura da resina.

No caso desta pesquisa, a forma metálica foi transportada até a prensa térmica, onde cada mistura foi submetida à pressão constante de 5 toneladas, independente da tipologia confeccionada (figura 3.13).

Figura 3.13 – Prensagem das placas poliméricas

Com relação às temperaturas, as placas das tipologias de 1 a 6, ficaram expostas a temperaturas que variaram de 50°C a 100°C, durante 1 hora. Já as placas da tipologia 7, ficaram expostas à temperatura de 50°C durante 15 minutos.

A Tabela 3.2 a seguir, detalha as tipologias de placas confeccionadas para esta pesquisa:

Tabela 3.2 – Tipologias de placas poliméricas confeccionadas

Tipologia	Espessura	Agregado	Qtde. total de resina	Qtde. de mantas de fibra de vidro	Tempo de prensa	Temperatura
01	5 mm	AG 05	69 g.	Não	60 min.	50 a 100°C
02	5 mm	AG 10	69 g.	Não	60 min.	50 a 100°C
03	5 mm	AG 05 + AG 10	69 g.	Não	60 min.	50 a 100°C
04	9 mm	AG 05 + AG 10	105 g.	1	60 min.	50 a 100°C
05	9 mm	AG 05 + AG 10	105 g.	Não	60 min.	50 a 100°C
06	9 mm	AG 05 + AG 10	105 g.	2	60 min.	50 a 100°C
07	9 mm	AG 05 + AG 10	105 g.	2	15 min.	50°C

3.4.5 Desforma e cura

Por fim, após o esfriamento da forma metálica, cada tipologia de placas polimérica confeccionada, pode ser desformada. Antes de ser submetida a algum ensaio, as placas ficaram em estado de repouso durante 24 horas.

Figura 3.14 – Placa polimérica pronta

Após estes procedimentos, as placas finalmente estavam preparadas para a realização de seus ensaios de caracterização.

3.5 Caracterização mecânica das placas poliméricas

Os ensaios de caracterização mecânica – tração, flexão e punção foram realizados com o objetivo de determinar a melhor tipologia de placas poliméricas desenvolvidas nesta investigação científica. Com isso, foi determinado que a tipologia que seria caracterizada quanto aos ensaios de propriedades físicas e térmicas e durabilidade seria a tipologia 07.

Como não há normatização específica para os ensaios realizados nesta pesquisa, foram adotadas as normas técnicas próximas de cada situação analisada.

3.5.1 Ensaio de tração

- **Objetivo:** Determinar a resistência de cada placa polimérica ensaiada a fim de analisar seu comportamento e sua resistência à tração quando submetido a um carregamento constante até a ruptura.
- **Norma aplicada:** NBR 12.824 (ABNT, 2003).

- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova com dimensões de 250 x 25 x 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Individualmente, cada corpo de prova foi medido com o paquímetro, a fim de verificar suas dimensões e espessura;
 - O corpo de prova foi fixado na máquina universal de ensaios por suas extremidades, numa posição que permitiu ao equipamento aplicar-lhe uma força axial de tração;

Figura 3.15 – Máquina universal de ensaios

Figura 3.16 – Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração

- A força de tração foi aplicada até o rompimento do corpo de prova.
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos foram anotados em uma planilha, o que tornou possível a análise estatística (cálculo das médias) e as comparações entre as diferentes tipologias de placas poliméricas confeccionadas.

3.5.2 Ensaio de flexão

- **Objetivo:** O ensaio visa estudar o comportamento de um corpo de prova submetido à flexão em 3 pontos.
- **Norma aplicada:** NBR 14.810 – 3 (ABNT, 2006b).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Construção Civil, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova nas dimensões de 250 x 25 x 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**

- Individualmente, cada corpo de prova foi medido com o paquímetro, a fim de verificar suas dimensões e espessura;
- Na sequência, cada corpo de prova foi fixado na máquina universal de ensaios por suas extremidades, sendo possível aplicar carregamentos constantes em três pontos do corpo de prova analisado;
- Os carregamentos foram aplicados até o rompimento do corpo de prova.
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos foram anotados em uma planilha, o que tornou possível a análise estatística (cálculo das médias) e as comparações entre as diferentes tipologias de placas poliméricas confeccionadas.

3.5.3 Ensaio de punção

- **Objetivo:** Este ensaio é importante para simular o comportamento das placas quando submetidas a uma carga pontual, ou seja, a sua resistência ao furo.
- **Norma aplicada:** NBR 13.359 (ABNT, 1995).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Geossintéticos, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de provas nas dimensões 90 x 90 x 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Individualmente, os corpos de prova foram encaixados na máquina universal de ensaios, junto do puncionômetro;
 - O puncionômetro deslocou-se à velocidade constante e perpendicularmente ao corpo de prova e sobre seu eixo central;

- Com isso, foi possível analisar a resistência do corpo de prova ao puncionamento.
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos foram anotados em uma planilha, o que tornou possível a análise estatística (cálculo das médias) e as comparações entre as diferentes tipologias de placas poliméricas confeccionadas.

3.6 Caracterização das propriedades físicas

3.6.1 Absorção em água

- **Objetivo:** Determinar o teor de absorção em água pela placa polimérica.
- **Norma aplicada:** Como não há normatização para o ensaio de absorção em água para polímeros, foi utilizada a metodologia proposta por NASCIMENTO (2003).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Construção Civil, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova nas dimensões 25 X 25 X 9 mm;
- **Procedimentos experimentais:**
 - Foram aferidas as massas dos 10 corpos de prova;
 - Todos os corpos de prova ficaram imersos em 500 ml. de água destilada durante 24 horas e a temperatura ambiente;
 - No final do período de duas horas de imersão, os corpos de prova foram retirados para que suas massas pudessem ser aferidas;
 - Novamente, os corpos de prova foram imersos na água destilada, e após 22 horas foram retirados para que fossem aferidas suas massas finais.

- **Tratamento de dados:** Realizados os procedimentos experimentais descritos, após 2 e 24 horas, foi possível determinar o valor da absorção de água de cada tipo de agregado pela equação:

$$A = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} * 100 \quad (1)$$

Onde,

A: absorção de água da massa do agregado (%);

M₂: massa do agregado após o período de imersão, em gramas;

M₁: massa do agregado antes do período de imersão, em gramas.

3.6.2 Inchamento

- **Objetivo:** Determinar o inchamento em espessura da placa polimérica em estudo, após absorção de água.
- **Norma aplicada:** NBR 14.810-3 (ABNT, 2006b).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Construção Civil, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova nas dimensões de 25 x 25 x 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Foram aferidas as espessuras dos 10 corpos de prova;
 - Todos os corpos de prova ficaram imersos em 500 ml. de água destilada durante 24 horas e a temperatura ambiente;
 - No final do período de duas horas de imersão, os corpos de prova foram retirados para que suas espessuras pudessem ser aferidas;

- Novamente, os corpos de prova foram imersos na água destilada, e após 22 horas foram retirados para que fossem aferidas suas espessuras finais.
- **Tratamento de dados:** A medida da espessura dos CP foi realizada após 2 horas e 24 horas de imersão. Posteriormente será determinado o valor do inchamento pela equação:

$$I = \frac{(E_2 - E_1)}{E_1} * 100 \quad (2)$$

Onde,

I: Absorção de água do corpo de prova (%);

E₂: Espessura do corpo de prova após o período de imersão, em mm;

E₁: Espessura do corpo de prova antes do período de imersão, em mm.

3.6.3 Determinação da densidade

- **Objetivo:** Determinar a densidade da placa polimérica e classificá-la de acordo com a normatização em baixa, média ou alta densidade.
- **Norma aplicada:** NBR 14.810-3 (ABNT, 2006b).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Construção Civil, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova nas dimensões 50 x 50 x 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Foram aferidas as massas e calculado o volume dos 10 corpos de prova analisados.

- A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular a densidade de cada corpo de prova através da equação:

$$D = \frac{M}{V} * 1000000 \quad (3)$$

Onde,

D: densidade em kg/m;

M: massa em g;

V: volume em mm³.

- **Tratamento de dados:** Os resultados individuais foram anotados em uma planilha, o que tornou possível o cálculo da densidade média do material analisado e sua classificação de acordo com a normatização.

3.7 Caracterização das propriedades térmicas

- **Objetivo:** Determinar a condutividade térmica e o calor específico da placa em estudo de acordo com a metodologia da caixa quente.
- **Norma aplicada:** Para determinação da condutividade térmica foi utilizada a NBR 6.488 (ABNT, 1980) e para a determinação do calor específico, as prescrições da ASTM C – 351 – 922b (ASTM, 1999).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Propriedades Térmicas, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 01 corpo de prova nas dimensões 230 x 115 X 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Foram instalados os termopares na superfície da caixa, nas placas cerâmicas e na placa polimérica;

Figura 3.17 – Instalação dos termopares na superfície da caixa e na placa cerâmica inferior

Figura 3.18 – Instalação dos termopares na placa polimérica

- A caixa térmica foi vedada com fibra de vidro;
- O ensaio foi realizado durante 15 horas, sendo 7 horas para calibração do equipamento e 8 horas com aferição dos resultados de condutividade térmica e calor específico a cada minuto;
- Foi calculada a média simples de cada parâmetro analisado, o que determinou a condutividade térmica e o calor específico do material analisado.
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos através dos ensaios, foram anotados em uma planilha, o que tornou possível a

comparação e a análise dos dados com relação a dados da literatura.

3.8 Segurança contra o incêndio (ensaio de flamabilidade)

- **Objetivo:** Determinar as características de queima, ou seja, mensurar a velocidade da combustão na placa em estudo e determinar suas características (inflamável ou auto extingüível).
- **Norma aplicada:** UL – 94 V: *Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Applications (Vertikal Burning)*, 2001.
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Geossintéticos, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 1 corpo de prova com dimensões de 200 x 100 X 9 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Neste ensaio o corpo de prova fica posicionado verticalmente em relação à chama;

Figura 3.19 – Preparação do corpo de prova para ensaio de flamabilidade

- Em uma de suas extremidades, foi aplicada a chama por 10 segundos, sendo observado comportamento do corpo de prova;

Figura 3.20 – Aplicação da chama no corpo de prova da placa polimérica

- O tempo entre a retirada da chama e a auto-extinção do fogo no corpo de prova (t_1) foi registrado;

- Após a extinção da chama, foi aplicado novamente a chama por mais 10 segundos e registrado o tempo entre a retirada da chama e a autoextinção do fogo no corpo de prova (t_2);
 - Foi anotado também o tempo que o corpo de prova permaneceu incandescente após a segunda aplicação (t_3).
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos através dos ensaios, foram anotados em uma planilha, com o objetivo de classificar o material analisado conforme a normatização.

3.9 Caracterização quanto à durabilidade

3.9.1 Resistividade elétrica

- **Objetivo:** Determinar a capacidade de resistência elétrica do material de estudo.
- **Norma aplicada para a realização do ensaio:** ASTM D 257 (*Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Eletricidade, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova circulares com diâmetro de 100 mm.
- **Procedimentos experimentais:**
 - As amostras foram inseridas, individualmente na célula de resistividade;

Figura 3.21 – Célula de resistividade e fonte de resistência elétrica

- Foram emitidas, durante um minuto, tensões de saída de 500 V e corrente limite de 500 *miles*.
- **Tratamento de dados:** Os resultados obtidos através dos ensaios, foram anotados em uma planilha, o que tornou possível o cálculo da média simples e a comparação com dados com obtidos da literatura.

3.9.2 Resistência à abrasão superficial

- **Objetivo:** Determinar a resistência à abrasão superficial da placa polimérica e classificá-la de acordo com a normatização brasileira.
- **Norma aplicada:** NBR 13.818 – Anexo D (ABNT, 1997a).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (CCDM/UFSCar).
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 10 corpos de prova, com dimensões de 100 x 100 X 9(mm).
- **Procedimentos experimentais:**

- No abrasímetro, foram inseridos o disco, o óxido de alumínio em pó e as 12 esferas de aço;
- Individualmente, cada corpo de prova foi inserido no abrasímetro;
- O disco abrasivo foi ligado a uma velocidade constante de 100 rotações por minutos, determinando assim, um estágio de abrasão;
- Para cada ciclo, devem ser testados dois corpos de prova, a fim de verificar o desgaste sofrido;
- **Tratamento de dados:** A partir da norma NBR 13.818 – Anexo D (ABNT, 1997a), foi possível determinar a classificação do material relacionando o desgaste sofrido em cada estágio de abrasão.

3.9.3 Resistência ao ataque químico

- **Objetivo:** Determinar a resistência ao ataque químico da placa polimérica em estudo quando aplicados substâncias químicas presentes em produtos domésticos e de piscina e ácidos e bases de alta e baixa concentração. A importância deste ensaio está relacionada com a sua resistência ao ataque químico contra soluções de pH ácido e pH básico e naquelas presentes em produtos domésticos e de piscina.
- **Norma aplicada ao ensaio:** NBR 13818 – Anexo H (ABNT, 1997b).
- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.
- **Preparação dos corpos de prova:**
 - 40 corpos de prova nas dimensões 60 x 60 (mm).
- **Procedimentos experimentais:**
 - Os corpos de prova permaneceram em estufa com temperatura de $\pm 110^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. Após este

- período, os corpos de prova foram retirados da estufa e ficaram em repouso a temperatura ambiente;
- Individualmente, os corpos de prova foram mergulhados em cada solução química analisada, permanecendo totalmente imersos em recipiente de vidro, durante 12 dias, de acordo com o sugerido por norma;
 - Na sequência, os corpos de prova foram imersos em água destilada por 5 dias;
 - As amostras foram fervidas durante 30 minutos e mantidas totalmente submersas em água;
 - Por fim, os corpos de prova permaneceram em estufa durante 24 horas a temperatura de 110°C.
- **Tratamento de dados:** Após os procedimentos experimentais, as placas passaram por análise visual e classificadas de acordo com os parâmetros da NBR 13818 – Anexo H (ABNT, 1997b).

3.9.4 Resistência à exposição ultravioleta e às intempéries

- **Objetivo:** Analisar as propriedades mecânicas e físicas da placa polimérica em estudo quando submetida à exposição do ultravioleta, em que, intempéries (luz, calor e umidade) são controlados de maneira que simulem o ambiente natural.
- **Norma aplicada:** Quanto aos ensaios de resistência à exposição ultravioleta e às intempéries, a metodologia utilizada seguiu os parâmetros descritos por Nascimento (2003) com base na norma ASTM G 154 (2008), a partir da utilização de ciclos de 8 horas de exposição à radiação UV e temperatura de $(60 \pm 3) ^\circ\text{C}$ intercalados a 4 horas de condensação de umidade e temperatura de $(50 \pm 3) ^\circ\text{C}$, durante 500, 1.000 e 1.500 horas,

simulando respectivamente 1, 2 e 3 anos de exposição ao ultravioleta.

- **Laboratório onde foi realizado o ensaio:** Laboratório de Geossintéticos, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos.
- **Corpos de prova utilizados para a realização deste ensaio:**
 - 9 corpos de prova, com dimensões de 200 x 200 X 9 (mm), sendo utilizados 3 corpos de prova para cada idade analisada (1, 2 e 3 anos).
- **Procedimentos experimentais:**
 - As placas foram inseridas no suporte metálico que por sua vez foi inserido na câmara de envelhecimento acelerado.

Figura 3.22 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de resistência à exposição ultravioleta e às intempéries

- Na sequência, a câmara foi programada para ciclos de exposição de exposição UV, sendo 8 horas a 60°C e 4 horas de condensação de umidade a 50°C, conforme recomendado por norma;
- O tempo total de exposição foi de 1500 horas (simulação de aproximadamente 3 anos), com retirada a cada 500 horas (1 ano) para avaliação;

Figura 3.23 – Da esq. para dir.: placa com 1 ano, 2 anos e 3 anos de exposição

- Para cada idade analisada, foram realizados os ensaios de tração, flexão, punção, absorção de água, inchamento e densidade.
- **Tratamento de dados:** Com o intuito de avaliar a perda da resistência mecânica e das propriedades físicas, das placas analisadas durante o período simulado de 500 horas (1 ano), 1.000 horas (2 anos) e 1.500 horas (3 anos), os resultados obtidos com os ensaios de caracterização mecânica e de propriedades físicas foram comparados com os resultados obtidos com os mesmo ensaios realizados com as placas sem exposição ao ultravioleta e às intempéries.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Classificação e caracterização do agregado reciclado

4.1.1 Conhecendo a fonte geradora do resíduo industrial de poliuretana

O resíduo sólido industrial utilizado nesta pesquisa é a poliuretana termofixa residual do corte das peças produzidas pela INPOL – Indústria de Poliuretana. Esta indústria fica localizada no município de Novo Hamburgo/RS, que dista aproximadamente 40 km da capital do estado, Porto Alegre/RS, e está inserida na região do Vale dos Sinos, que é um importante pólo industrial gaúcho.

Durante as visitas, verificou-se que a produção das peças de poliuretana está dividida em quatro fases:

I. Produção ou mistura das matérias primas que compõem a poliuretana (figura 4.1);

Figura 4.1 – A poliuretana como mistura de suas matérias primas

ii. Moldagem das peças a partir de dois tipos: em forma de placas (figura 4.2) e de rolos;

Figura 4.2 – Conjunto de formas utilizadas na moldagem da poliuretana em forma de placas

iii. Cura ou secagem;

iv. Corte peças de poliuretana (figuras 4.3 e 4.4).

Figuras 4.3 e 4.4 – Corte das peças de PU e a geração do resíduo de poliuretana

Após o corte das peças, verificou-se que os resíduos gerados pela INPOL são apresentados em forma de grandes tiras (figura 4.5), que por sua vez, ficam acondicionadas em caçambas (figura 4.6) que são encaminhadas para o Aterro de Resíduos Industriais do município de Novo Hamburgo/RS.

Figura 4.5 – Resíduo de poliuretana das peças produzidas pela INPOL

Figura 4.6 – Descarte de material utilizado na fabricação das peças de PU

4.1.2 Processo de moagem do resíduo industrial de poliuretana

A partir do processo de moagem, foram gerados dois tipos de agregados, a princípio denominados como AG 05 e AG 10 (figura 4.7). Esta denominação está relacionada com as especificações das peneiras disponibilizadas pela MARCONI Equipamentos para Laboratórios.

Figura 4.7 – Da esquerda para direita, AG 05 e AG 10

A seguir, são apresentados com detalhes a caracterização e a classificação do agregado utilizado nesta pesquisa.

4.1.3 Granulometria

As tabelas e os gráficos que apresentam a distribuição granulométrica dos agregados descritos como AG 05 e AG 10, produtos da moagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa podem ser observados nos Anexos deste trabalho.

A partir das determinações do módulo de finura e do diâmetro máximo característico, é possível caracterizar o material quanto à sua granulometria.

O módulo de finura é determinado a partir dos dados da análise granulométrica pela soma das porcentagens retidas acumuladas e seu resultado dividido por 100.

NEVILLE (1982) afirma que o valor do módulo de finura é proporcional ao tamanho dos grãos do agregado, ou seja, quanto maior o módulo de finura, mais grosso é o agregado.

O diâmetro máximo característico corresponde à abertura nominal da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa (HELENE e TERZIAN, 1992).

A Tabela 4.1, apresenta os módulo de finura e o diâmetro máximo característico dos agregados reciclados:

Tabela 4.1 – Determinação do módulo de finura e do diâmetro máximo característico dos agregados reciclados

Granulometria	Módulo de finura (mm)	Diâmetro máximo característico
AG 05	3,80	2,36 mm
AG 10	2,98	2,36 mm

Os resultados mostraram que ambos os agregados tem o mesmo diâmetro máximo característico, ou seja, ficam retidos na mesma peneira.

Com relação à classificação do material quanto ao módulo de finura, a NBR 7.211 (ABNT, 1983) tem as seguintes determinações:

Tabela 4.2 – Classificação dos tipos de um material quanto ao seu módulo de finura

Classificação	Módulo de finura
Areia grossa	Entre 3,35 e 4,05
Areia média	Entre 2,40 e 3,35 mm
Areia fina	Entre 1,97 e 2,40 mm
Areia muito fina	Menor que 1,97

Analisando as determinações dos ensaios de granulometria, pode-se dizer que o agregado AG 05 tem características de areia grossa e o agregado AG 10 tem características de areia média.

4.1.4 Lixiviação e solubilização

O ensaio de lixiviação, realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 10.005 (ABNT, 2004), teve como objetivo, analisar a presença dos elementos chumbo, cádmio,

cromo, prata, bário e selênio, no agregado reciclado de poliuretana termofixa.

Esses elementos foram analisados com base nas pesquisas de Pablos (2008) e Nogueira (2011) que analisaram o potencial de contaminação destes elementos em agregados reciclados.

A tabela 4.3, apresenta o limite máximo permitido por normatização para o extrato lixiviado e os resultados obtidos:

Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de lixiviação do agregado reciclado de poliuretana

Parâmetros analisados	Limite máximo	
	permitido para extrato lixiviado	Resultados obtidos
Chumbo	1,0	0,62
Cádmio	0,5	0,040
Cromo	5,0	0,368
Prata	5,0	0,013
Bário	70,0	<0,005
Selênio	1,0	ND

ND: não detectado.

Ao analisar o resultado do ensaio de lixiviação do agregado reciclado de poliuretana termofixa, pode-se apontar que todos os elementos identificados ficaram dentro dos limites exigidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) (Concentração - limites máximos nos extratos obtidos no ensaio de lixiviação), conforme seu anexo F. Com isso, é possível afirmar que o resíduo é classificado como Classe II, não perigoso.

Na sequência, os agregados foram submetidos ao ensaio de solubilização, de acordo com a NBR 10.006 (ABNT, 2004), em que, as substancias analisadas foram zinco, chumbo, cádmio, cobre, cromo, prata, bário e selênio.

A Tabela 4.4, apresenta os resultados do ensaio de solubilização:

Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de solubilização do agregado reciclado de poliuretana

Parâmetros analisados	Limite máximo	
	permitido para extrato solubilizado	Resultados obtidos
Zinco	5,0	0,052
Chumbo	0,01	0,65
Cádmio	0,005	<0,0006
Cobre	2,0	<0,003
Cromo	0,05	0,322
Prata	0,05	0,005
Bário	0,7	<0,005
Selênio	0,01	ND

ND: não detectado.

Ao verificar os resultados do ensaio de solubilização, foi possível detectar que os elementos chumbo e cromo ultrapassaram os limites permitidos pelo anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização) da NBR 10.004 (ABNT, 2004), conforme mostra a tabela 4.4. Por esse motivo o agregado é classificado como Classe II – A, não perigoso e não inerte.

Os limites excedidos de chumbo e cromo, podem ser explicados pela utilização da granalha, material abrasivo aplicado no desforme das peças de poliuretana pela INPOL ou no momento da moagem do resíduo em agregado, tendo em vista que as facas do moinho são compostas por ligas metálicas que podem contaminar o agregado reciclado.

Por isso, cabe desenvolver uma pesquisa para detectar o momento em que o resíduo passa a apresentar potencial de contaminação e ser classificado como não inerte.

Como os resultados do ensaio de solubilização apresentaram valores maiores do que aqueles permitidos por normatização, ou seja,

pode ser que este agregado solubilize-se e com isso, ofereça algum risco ao homem ou ao meio, sugeriu-se que, após a composição do agregado reciclado de poliuretana termofixa com a resina vegetal de mamona, ou seja, na composição da placa, fosse realizada a destruição e a moagem de uma das placas determinadas para a caracterização nesta pesquisa, com o objetivo de analisar seu extrato solubilizado.

A Tabela 4.5, mostra resultado do ensaio de solubilização do agregado reciclado oriundo da moagem da placa polimérica:

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de solubilização do agregado reciclado de poliuretana oriundo da placa polimérica

Parâmetros analisados	Limite máximo	
	permitido para extrato solubilizado	Resultados obtidos
Zinco	5,0	0,035
Chumbo	0,01	0,01
Cádmio	0,005	<0,0006
Cobre	2,0	<0,003
Cromo	0,05	0,04
Prata	0,05	0,005
Bário	0,7	<0,005
Selênio	0,01	ND

ND: não detectado.

Ao repetir o ensaio de solubilização, agora com o extrato solubilizado do agregado reciclado oriundo da placa polimérica, foi possível verificar que todos os elementos analisados neste ensaio estão dentro dos limites permitidos pelo anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização) da NBR 10.004 (ABNT, 2004), conforme mostra a tabela 4.5.

Isso pode ser explicado pelo fato do óleo da mamona possuir elevada estabilidade física e química, que promove o encapsulamento da carga, não permitindo que esta sofra deterioração, seja lixiviada ou se solubilizada.

Portanto, o agregado reciclado de poliuretana termofixa, ao ser adicionado à resina vegetal de mamona, pode ser classificado como Classe II – B, inerte.

4.2 Confeção das placas

No total, foram confeccionadas para esta pesquisa, sete tipologias de placas poliméricas, a partir da utilização dos tipos de agregados reciclados gerados, de dosagens de resina vegetal de poliuretana e da incorporação de nenhuma, uma e duas mantas fibras de vidro e com variação de tempo de prensagem e de temperatura. Neste caso, a temperatura serviu para acelerar o tempo de cura da placa confeccionada. Também, foram geradas placas com espessuras de 5 mm e 9 mm. Em todos os casos, foram mantidas as dimensões de 250 x 200 (mm) e força de prensagem de 5 toneladas.

Cabe ressaltar que as placas poliméricas foram confeccionadas por dados a base do empirismo, ou seja, os tempos de prensagem e de temperatura foram tomados por observação no desenvolvimento da pesquisa. Já os traços adotados para a utilização dos agregados reciclados e da resina vegetal de mamona, estão baseados na pesquisa desenvolvida por RODRIGUES (2008).

Inicialmente, foram desenvolvidas as tipologias 1, 2 e 3, de acordo com as respectivas determinações contidas na tabela 3.1. A seguir, as três tipologias, foram caracterizadas de acordo com os ensaios mecânicos de tração, flexão, punção.

Por meio da observação dos resultados obtidos com as tipologias 1,2,3, foi acrescida uma fibra de vidro ao processo. No primeiro momento, com o traço estabelecido para as três primeiras tipologias, não foi suficiente para a composição da tipologia 4, fazendo com que o traço fosse readequado. A readequação do traço ocasionou no aumento da quantidade de agregado e de resina utilizados na composição da placa de tipologia 4, aumentando assim, a espessura da placa produzida.

Para efeito de comparação, como houve o aumento da espessura, foi confeccionada a tipologia 05, com a mesma quantidade de agregado e de resina da tipologia 4, espessura de 9 mm, entretanto, sem adição da fibra de vidro. Novamente, as tipologias 4 e 5 foram submetidas aos ensaios de caracterização mecânica descritos no item 3.4 e seus resultados comparados entre si e com as tipologias 1,2 e 3.

Após observar os resultados obtidos com a caracterização mecânica das tipologias 4 e 5, foram acrescidas duas mantas de fibras de vidro, a fim de aumentar a resistência das placas.

Como forma de adequar o processo de produção das placas poliméricas, otimizar o tempo de produção e verificando de forma empírica que a resina pode ter seu processo de cura realizado no período de 15 minutos, foi proposto confeccionar a tipologia 7 fixando a temperatura aos 50°C e 15 minutos de prensagem.

Como a variação dos resultados obtidos com os ensaios de caracterização mecânica entre as tipologias 6 e 7 não foram grandes e tendo em vista a otimização do tempo para produção e a eficiência energética do processo, tomou-se a tipologia 7, como produto final desta pesquisa, que foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas e térmica e com relação à sua durabilidade.

A Tabela 4.6 a seguir, apresenta as tipologias de placas poliméricas confeccionadas e suas características:

Tabela 4.6 – Tipologia das placas poliméricas produzidas e suas características

Tipologia	Espessura	Tempo		Temperatura
		de prensa		
01	5 mm	60 min.	50 a 100°C	
02	5 mm	60 min.	50 a 100°C	
03	5 mm	60 min.	50 a 100°C	
04	9 mm	60 min.	50 a 100°C	
05	9 mm	60 min.	50 a 100°C	
06	9 mm	60 min.	50 a 100°C	
07	9 mm	15 min.	50°C	

4.3 Resultados dos ensaios de caracterização mecânica

Como forma de estudar a melhor placa polimérica dentre as sete tipologias confeccionadas, foi proposto caracterizá-las de acordo com os ensaios mecânicos de tração, flexão e punção.

A seguir, são apresentados de forma didática, as médias dos ensaios de caracterização mecânica realizados com cada uma das tipologias de placas confeccionadas.

Para cada tipologia de placa confeccionada, foram analisados dez corpos de prova por ensaio.

Nos anexos deste trabalho são apresentados os resultados individuais de cada corpo de prova submetido aos ensaios de caracterização mecânica.

As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, apresentam as médias dos resultados obtidos com os ensaios de caracterização mecânica das tipologias 01, 02 e 03.

Tabela 4.7 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 01

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	674,50	299,50	452,50
60°C	702,50	304,50	499,50
70°C	705,50	319,50	513,50
80°C	728,50	322,50	552,50
90°C	733,50	335,50	601,50
100°C	745,40	342,50	603,40

Tabela 4.8 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 02

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	348,50	321,20	452,50
60°C	362,40	327,50	499,50
70°C	401,50	354,50	513,50
80°C	413,40	387,50	535,80
90°C	422,50	401,50	552,40
100°C	433,40	403,50	581,50

Tabela 4.9 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 03

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	704,50	368,50	534,50
60°C	753,30	378,50	541,50
70°C	790,50	387,50	548,50
80°C	792,50	395,50	552,50
90°C	795,50	409,50	559,50
100°C	781,50	420,50	567,50

Como proposto na Metodologia deste trabalho, a tipologia 4 foi confeccionada com a incorporação de uma manta de fibra de vidro. Isso, aumentou a espessura da placa para 9 mm. Cabe lembrar que as placas das tipologias 1, 2 e 3 tem espessura de 5 mm.

A tipologia 5 foi confeccionada a partir do acréscimo de material (agregado reciclado e resina vegetal de mamona) sem a adição da fibra de vidro, que permitiu que sua espessura fosse aumentada para 9 mm, permitindo a comparação das placas confeccionadas nesta tipologia com aquelas confeccionadas com a tipologia 4.

As Tabelas 4.10 e 4.11, apresentam os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica das tipologias 4 e 5.

Tabela 4.10 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 04

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	759,50	515,00	674,50
60°C	789,40	528,50	683,50
70°C	809,50	553,50	688,50
80°C	816,50	568,40	690,50
90°C	861,50	575,50	693,40
100°C	899,50	588,50	694,70

Tabela 4.11 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 05

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	733,50	408,50	555,50
60°C	765,40	413,50	561,50
70°C	772,40	420,50	566,50
80°C	780,50	427,50	576,50
90°C	783,40	429,50	579,50
100°C	785,50	429,70	583,50

A tipologia 6 foi confeccionada a partir das mesmas características da tipologia 5, entretanto, com a incorporação de duas fibras de vidro ao processo.

Tabela 4.12 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 06

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	996,50	798,50	808,50
60°C	1.012,50	822,50	818,00
70°C	1.016,00	837,50	830,50
80°C	1.022,00	852,50	844,50
90°C	1.028,50	915,50	853,50
100°C	1.031,50	937,50	870,50

Como forma de otimizar o processo de produção das placas poliméricas, e tendo em visto que a cura da resina de mamona ocorre após cerca de 15 minutos em temperatura média de 50°C, optou-se em confeccionar a tipologia 7 de placas, seguindo a mesma metodologia de confecção da tipologia 6, prensada durante 15 minutos a 50°C.

A Tabela 4.13, apresenta os resultados de caracterização mecânica da tipologia 7.

Tabela 4.13 – Médias dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas da tipologia 07

TEMP.	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
50°C	990,80	792,60	803,60
60°C	-	-	-
70°C	-	-	-
80°C	-	-	-
90°C	-	-	-
100°C	-	-	-

Avaliados os resultados dos ensaios mecânicos, verificou-se que a tipologia 7 pode ser indicada para caracterização. Por isso, nesta pesquisa, optou-se pela caracterização da placa da tipologia 7, que foi analisada quanto às suas propriedades físicas e térmica e à análise de sua durabilidade.

Cabe destacar, que a caracterização mecânica está levando em consideração somente os resultados para definir a tipologia de placa que será desenvolvida.

4.4 Análises das propriedades físicas

4.4.1 Absorção em água

Os valores, quanto à absorção em água, podem ser observado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de absorção em água

Corpos de prova	Massa inicial (g)	Massa 2 horas (g)	Massa 24 horas (g)	Absorção 2 horas (%)	Absorção 24 horas (%)
1	35,1	35,45	35,81	1,0	2,0
2	35,3	35,55	35,87	0,7	1,6
3	35,3	35,59	35,98	0,8	1,9
4	35,0	35,50	35,81	1,4	2,3
5	35,4	35,83	36,19	1,2	2,2
6	35,3	35,62	36,01	0,8	2,0
7	35,6	35,88	36,25	0,8	1,8
8	35,2	35,61	35,91	1,1	2,0
9	35,0	35,40	35,78	1,1	2,2
10	35,1	35,39	35,74	0,8	1,8
MÉDIA	35,23	35,58	35,94	1,0	2,0

Como o material é um polímero, não há norma específica para a análise de absorção de água e de inchamento para este tipo de material. Por isso, utilizou-se como referência a pesquisa de Nascimento (2003), que apresentou valores médios para chapas industrializadas de Pinus e Eucalipto para absorção em 2 horas de 12% e 16% e para absorção em 24 horas de 27% e 50%, respectivamente.

Em relação aos dados apresentados a partir da análise de absorção de água, a placa polimérica apresentou absorção de 1% em 2 horas e de 2% em 24 horas.

Comparando o resultado das placas com os materiais analisados por NASCIMENTO (2003), o desempenho superior das placas pode ser explicado pelo fato da poliuretana e da resina absorverem baixas quantidades de água.

4.4.2 Inchamento

A Tabela 4.15 apresenta os valores obtidos para o inchamento em espessura.

Tabela 4.15 – Resultado do ensaio de inchamento

Corpos de prova	Espessura inicial (mm)	Espessura 2 horas (mm)	Espessura 24 horas (mm)	Inchamento 2 horas (%)	Inchamento 24 horas (%)
1	9,30	9,35	9,38	0,50	0,80
2	9,00	9,10	9,08	0,70	0,90
3	9,20	9,24	9,28	0,40	0,80
4	9,40	9,46	9,48	0,60	0,80
5	9,50	9,59	9,58	0,90	0,80
6	8,90	8,98	8,97	0,80	0,70
7	9,10	9,12	9,18	0,30	0,90
8	9,30	9,35	9,37	0,50	0,80
9	9,00	9,05	9,07	0,60	0,80
10	9,00	9,06	9,06	0,70	0,70
MÉDIA	9,17	9,22	9,24	0,60	0,80

Como não há normatização específica para este tipo de ensaio referente a um material de base polimérica, foi utilizada a norma “NBR 14.810 – 2 (ABNT, 2006a). Segundo esta norma, as tolerâncias máximas dimensionais para chapas de madeira aglomerada são apenas mencionadas quanto ao inchamento em 2h e o padrão é de até 8%.

Para os valores obtidos de inchamento em espessura, após 2 horas, a placa apresentou inchamento de 0,6%.

Após 24 horas, entretanto, não há como analisá-los de maneira homogênea, pois não há parâmetros de comparações.

4.4.3 Determinação da densidade

Os valores encontrados para densidade de todos os corpos de prova podem ser observados na Tabela 4.15

Quanto à normatização, as chapas brasileiras são classificadas em média densidade com valores que variam de 551 kg/m³ a 750 kg/m³ (ABNT, 2006b).

Analisando os resultados, as placas apresentam valor médio de densidade de 1.135,55 kg/m³, o que lhe confere ser classificada como um material de alta densidade.

Como a placa é prensada com alta pressão e por temperatura, ela fica bem compactada, o que explica sua alta densidade.

Tabela 4.16 – Resultado do ensaio de densidade

Corpos de prova	Massa inicial (g)	Volume (mm³)	Densidade (kg/m³)
1	25,5	22.500	1.133,33
2	25,7	22.500	1.142,22
3	25,4	22.500	1.128,89
4	25,3	22.500	1.124,44
5	25,5	22.500	1.133,33
6	25,9	22.500	1.151,11
7	25,6	22.500	1.137,78
8	25,5	22.500	1.133,33
9	25,5	22.500	1.133,33
10	25,6	22.500	1.137,78
MÉDIA			1.135,55

De modo geral, as placas comportaram-se adequadamente em todos os parâmetros avaliados, justificando a escolha da tipologia analisada.

4.5 Análise das propriedades térmicas

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de propriedades térmicas da placa polimérica em estudo e de alguns materiais utilizados na construção civil.

Tabela 4.17 – Resultados obtidos com os ensaios de propriedades térmicas

Material	Densidade (kg/m³)	Condutividade térmica (W/m^oK)	Calor Específico (J/kg^oK)
Placa de poliuretano	1.135,55	0,17	980

Tabela 4.18 – Valores de condutividade térmica de materiais utilizados na construção civil
Fonte: RODRIGUES (2008)

Material	Densidade (kg/m³)	Condutividade térmica (W/m^oK)	Calor Específico (J/kg^oK)
Argamassa comum	1.200 a 2.100	1,15	1.000
Tijolos e telhas de barro	1.000 a 1.300	0,70	920
Concreto normal	2.200 a 2.400	1,75	1.000
Placa de gesso, e gesso acartonado	750 a 1.000	0,35	840

Com relação às propriedades térmicas, os valores de condutividade térmica e de calor específico da placa polimérica, que correspondem respectivamente à 0,17 W/m^oK e 980 W/m^oK,

encontram-se bem posicionados com relação aos materiais comumente aplicados na construção civil, o que torna possível sua indicação como um material para aplicação neste setor.

4.6 Segurança contra o incêndio

4.6.1 Flamabilidade

Os resultados obtidos no ensaio de flamabilidade estão apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultados do ensaio de flamabilidade

CP	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	Atingiu suporte	Algodão
1	-	-	-	Não	Sim
2	4	4	-	Não	Sim
3	3	7	-	Não	Sim
4	-	5	-	Não	Sim
5	11	4	-	Não	Sim

A Norma UL – 94 V (2001) apresenta os critérios para a avaliação do ensaio de flamabilidade, conforme mostra a Tabela 4.20:

Tabela 4.20 – Critérios de avaliação do ensaio de flamabilidade

Fonte: UL 94 – V (2001)

Critérios analisados	V-0	V-1	V-2
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova [s]	≤ 10 s.	≤ 30 s.	≤ 30 s.
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova [s]	≤ 50 s.	≤ 250 s.	≤ 250 s.
Tempo de queima mais tempo de incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama [s]	≤ 30 s.	≤ 60 s.	≤ 60 s.
Queima do algodão por gotejamento	Não	Não	Sim

A Tabela 4.21 apresenta as análises do ensaio de flamabilidade de acordo com os critérios de avaliação da UL – 94 V (2001):

Tabela 4.21 – Avaliação dos critérios para classificação da placa polimérica quanto à sua flamabilidade

Critérios analisados	Resultados
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova [s]	11
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova ($t_1 + t_2$) [s]	38
Tempo máximo de queima + incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama ou incandescência [s]	7
Queima do algodão por gotejamento	Não

De acordo com os resultados do ensaio de flamabilidade, pode-se afirmar que a placa polimérica classifica-se como auto extingüível, ou seja, assim que a chama foi afastada, o corpo de prova apagou-se imediatamente.

Também cabe destacar que o fato do gotejamento não ter incendiado o algodão classifica a placa polimérica como não propagador de fogo, pois o gotejamento não causou incêndio.

A figura 4.8 apresenta o corpo de prova após a realização do ensaio de flamabilidade:

Figura 4.8 – Corpo de prova após a realização do ensaio de flamabilidade

4.7 Desempenho com relação à durabilidade

4.7.1 Resistividade elétrica

A rigidez dielétrica corresponde a um campo elétrico máximo que o material suporta quando submetido a uma determinada tensão (ASSAGRA, 2011).

Na Tabela 4.22 estão representados os valores de rigidez dielétrica de diferentes materiais e na Tabela 4.23 o resultado encontrado para a placa polimérica em estudo.

Tabela 4.22 – Valores de rigidez dielétrica de diferentes materiais

Fonte: adaptado de RODRIGUES (2008)

Material	Rigidez dielétrica
Ar	3.000
Óleo	10.000
Papel	20.000
Borracha	25.000
Teflon	60.000

Tabela 4.23 – Valores de rigidez dielétrica da placa polimérica

Material	Rigidez dielétrica
Placa de poliuretana	50.000

De acordo com Assagra (2011), um bom isolante elétrico apresenta elevados valores de rigidez dielétrica.

Portanto, como pode ser observado, a placa polimérica em comparação com os materiais apresentados na Tabela 4.22 e de acordo com dados da literatura, apresenta-se como um bom isolante elétrico.

4.7.2 Resistência à abrasão superficial

A Norma NBR 13.818 – Anexo D (ABNT, 2007a), classifica os estágios e a classe de abrasão para os revestimentos cerâmicos conforme descrito na Tabela 4.24:

Tabela 4.24 – Estágios e classe de abrasão

Fonte: NBR 13.818 – Anexo D (ABNT, 2007a)

Estágio de abrasão / Número de ciclos para visualização	Classe de abrasão
100	0
150	1
600	2
750 a 1.500	3
2.100 a 12.000	4
Mais que 12.000	5

A Tabela 4.25, apresenta os resultados obtidos com o ensaio de abrasão superficial da placa polimérica estudada:

Tabela 4.25 – Resultado do ensaio de abrasão superficial da placa polimérica

NOME	NOME
Classe de abrasão (PEI)	3
Estágio de abrasão (Ciclos)	1.500

A partir da análise dos dados relativos à Tabela 4.20, pode-se verificar que a placa polimérica estudada apresenta classe de abrasão PEI – 3.

Sichieri et.al. (2008), elaborou a Tabela 4.26, que apresenta os grupos de classificação de revestimentos cerâmicos com relação à sua abrasão superficial:

Tabela 4.26 – Classificação dos revestimentos cerâmicos com relação à sua abrasão superficial

Grupo	Resistência à abrasão superficial
Grupo 0	Baixíssima
Grupo 1 / PEI - 1	Baixa
Grupo 2 / PEI - 2	Média
Grupo 3 / PEI - 3	Média Alta
Grupo 4 / PEI - 4	Alta
Grupo 5 / PEI - 5	Altíssima e sem manchas

De acordo com a Tabela 4.26, a resistência à abrasão superficial da placa polimérica quando comparada com a resistência à abrasão superficial de um revestimento cerâmico, é classificada como média alta, o que indica material com baixo desgaste ao longo do tempo.

4.7.3 Ataque químico

De acordo com a norma NBR 13.818 – Anexo H (ABNT, 1997b), durante a realização do ensaio de ataque químico, devem ser utilizados os seguintes códigos:

- De acordo com o tipo de material ensaiado:
 - U (*unglazed*) – não esmaltado;
 - G (*glazed*) – esmaltado;
- De acordo com a concentração dos reagentes:
 - H (*high concentration*) – alta concentração;
 - L (*low concentration*) – baixa concentração;

- De acordo com a resistência química
 - A: mais resistente;
 - B: resistência média;
 - C: menos resistente.

Ainda, a NBR 13.818 – Anexo H (ABNT, 1997b), estabelece a seguinte classificação:

- Para produtos domésticos e para limpeza de piscinas:
 - Classe UA: efeitos não visíveis;
 - Classe UB: efeitos pouco visíveis;
 - classe UC: efeitos visíveis.
- Para ácidos e bases de baixa concentração:
 - classe ULA: efeitos não visíveis;
 - classe ULB: efeitos pouco visíveis;
 - classe ULC: efeitos visíveis.
- Para ácidos e bases de alta concentração:
 - classe UHA: efeitos não visíveis;
 - classe UHB: efeitos pouco visíveis;
 - classe UHC: efeitos visíveis.

A placa polimérica analisada não é esmaltada, por isso, tem sua classificação definida como *U* (*unglazed*).

A Tabela 4.27 apresenta os resultados dos ensaios de resistência ao ataque químico da placa polimérica quando em contato com produtos domésticos e de limpeza de piscina e de ácidos e bases, de altas e baixas concentrações.

Tabela 4.27 – Resultados do ensaio de resistência ao ataque químico

	Ácido/Base	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05
Produtos domésticos e de piscina	Cloreto de amônia (100 g/L)	UA	UA	UA	UA	UA
	Hipoclorito de sódio (20mg/L)	UA	UA	UA	UA	UA
Ácidos e bases de baixa concentração	Ácido clorídrico (3%)	ULA	ULA	ULA	ULA	ULA
	Ácido cítrico (100 g/L)	ULA	ULA	ULA	ULA	ULA
	Hidróxido de potássio (30 g/L)	ULA	ULA	ULA	ULA	ULA
Ácidos e bases de alta concentração	Hidróxido de potássio (100 g/L)	UHA	UHA	UHA	UHA	UHA
	Ácido clorídrico (18%)	UHA	UHA	UHA	UHA	UHA
	Ácido láctico (5%)	UHA	UHA	UHA	UHA	UHA

Os resultados mostraram-se satisfatórios, tendo em vista, que os efeitos dos ataques químicos analisados foram classificados como “não visíveis”, ou seja, a placa polimérica analisada não reagiu com os elementos químicos dos produtos domésticos de piscina e de limpeza e com os ácidos e bases de baixa e alta concentração.

Isso pode ser explicado pelo fato da resina vegetal de mamona apresentar alta resistência ao ataque químico de soluções presentes em produtos domésticos e de limpeza de piscina e de ácidos e bases de alta e baixa concentrações.

4.7.4 Resistência à exposição ao ultravioleta e às intempéries

4.7.4.1 Caracterização mecânica

A seguir, as tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam os ensaios de caracterização mecânica das placas submetidas à exposição ultravioleta e ao intemperismo durante 500, 1000 e 1500 horas.

Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
01	986,90	789,00	798,80
02	986,70	789,10	798,70
03	986,80	789,30	798,70
04	986,80	789,30	798,80
05	986,60	789,20	798,60
06	986,70	789,40	798,50
07	986,90	789,40	798,60
08	986,80	789,50	798,80
09	986,80	789,40	798,70
10	986,90	789,30	798,70
MÉDIA	987,00	789,50	799,00

Tabela 4.29 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo

CP	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
01	984,50	783,80	789,60
02	984,50	784,00	789,40
03	984,60	783,90	789,50
04	984,40	783,80	789,50
05	984,50	783,80	789,40
06	984,50	783,90	789,40
07	984,60	783,70	789,60
08	984,60	783,70	789,70
09	984,40	783,80	789,70
10	984,50	783,80	789,60
MÉDIA	984,50	784,00	789,50

Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
01	981,70	778,70	785,90
02	981,90	778,60	785,90
03	981,90	778,70	785,70
04	981,70	778,60	785,80
05	981,80	778,40	785,90
06	981,80	778,60	785,70
07	981,70	778,60	785,70
08	981,60	778,70	785,60
09	981,70	778,80	785,80
10	981,80	778,70	785,80
MÉDIA	982,00	778,50	786,00

Comparando os resultados, pode-se perceber que variação entre as médias obtidas entre a placa sem exposição ao UV e aos intemperismos com as placas que sofreram a exposição foi em média de 1% em todos os casos.

Tabela 4.31 – Comparação entre os resultados de caracterização mecânica entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos

	TRAÇÃO (N)	FLEXÃO (N)	PUNÇÃO (N)
Padrão	990,80	792,60	803,60
500 horas	987,00	789,50	799,00
1.000 horas	984,50	784,00	789,50
1.500 horas	982,00	778,50	786,00

Com relação ao desempenho mecânico, comparando o padrão, que é o material analisado sem a exposição ao ultravioleta e aos intemperismos com aqueles que sofreram a exposição, pode-se verificar que não houve uma variação considerável entre os resultados de caracterização mecânica.

4.7.4.2 Absorção em água

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água das placas expostas ao UV e aos intemperismos.

Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Massa 2 horas (g)	Massa 24 horas (g)	Absorção 2 horas (%)	Absorção 24 horas (%)
01	35,00	35,35	35,84	1,00	2,40
02	35,10	35,52	35,98	1,20	2,50
03	35,10	35,42	36,05	0,90	2,70
04	34,80	35,18	35,67	1,10	2,50
05	35,20	35,66	36,04	1,30	2,40
06	35,10	35,80	35,94	1,00	2,40
07	35,40	34,45	36,29	1,10	2,50
08	35,00	35,42	35,91	1,20	2,60
09	34,80	35,25	35,67	1,30	2,50
10	34,90	35,25	35,84	1,00	2,70
			MÉDIA	1,11	2,52

Tabela 4.33 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Massa 2 horas (g)	Massa 24 horas (g)	Absorção 2 horas (%)	Absorção 24 horas (%)
01	35,20	35,73	36,15	1,50	2,70
02	35,20	35,84	36,22	1,80	2,90
03	35,20	35,62	36,26	1,20	3,00
04	35,20	35,59	36,19	1,40	2,80
05	35,10	35,66	36,01	1,60	2,60
06	35,70	36,23	36,66	1,50	2,70
07	35,20	35,76	36,15	1,60	2,70
08	35,30	35,94	36,29	1,80	2,80
09	35,25	35,85	36,45	1,70	2,40
10	35,20	35,87	36,52	1,90	2,30
			MÉDIA	1,60	2,70

Tabela 4.34 – Resultados dos ensaios de absorção em água das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Massa 2 horas (g)	Massa 24 horas (g)	Absorção 2 horas (%)	Absorção 24 horas (%)
01	35,15	35,71	36,20	1,60	3,00
02	35,20	35,90	36,26	2,00	2,00
03	35,22	35,71	36,24	1,40	2,90
04	35,30	35,79	36,29	1,40	2,80
05	35,20	35,80	36,15	1,70	2,70
06	35,10	35,62	36,05	1,50	2,70
07	35,30	35,83	36,25	1,50	2,70
08	35,15	35,82	36,13	1,90	2,80
09	35,10	35,73	36,01	1,80	2,60
10	35,20	35,87	36,08	1,90	2,50
MÉDIA				1,70	2,70

Tabela 4.35 – Comparação entre os resultados de absorção em água entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos

	Absorção média 2 horas (%)	Absorção média 24 horas (%)
Padrão	1,00	2,00
500 horas	1,11	2,52
1.000 horas	1,60	2,70
1.500 horas	1,70	2,70

Com relação aos resultados de absorção em água, nota-se que tanto no período de 2 horas quanto no período de 24 horas, em todas as situações analisadas, a variação de absorção de água foi de 1%. Isto comprova que mesmo quando a placa é submetida à exposição

ultravioleta e aos intemperismos, o teor de absorção de água é muito baixo.

4.7.4.3 Inchamento

Tabela 4.36 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Espessura	Espessura	Espessura	Inchamento	Inchamento
	inicial	2 horas	24 horas	2 horas	24 horas
	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
01	9,2	9,27	9,28	0,80	0,90
02	9,0	9,08	9,08	0,90	0,90
03	9,1	9,16	9,18	0,70	0,90
04	9,2	9,26	9,28	0,60	0,90
05	9,3	9,38	9,38	0,90	0,90
06	9,3	9,37	9,38	0,80	0,90
07	9,2	9,26	9,27	0,70	0,80
08	9,4	9,46	9,48	0,60	0,90
09	9,0	9,08	9,07	0,90	0,80
10	9,1	9,17	9,17	0,80	0,80
			MÉDIA	0,80	0,90

Tabela 4.37 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Espessura	Espessura	Espessura	Inchamento	Inchamento
	inicial	2 horas	24 horas	2 horas	24 horas
	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
01	9,0	9,08	9,08	0,90	0,80
02	9,1	9,17	9,17	0,80	0,80
03	9,0	9,06	9,07	0,70	0,80
04	9,2	9,28	9,28	0,90	0,90
05	9,3	9,36	9,38	0,60	0,90
06	9,1	9,17	9,18	0,80	0,80
07	9,1	9,16	9,17	0,70	0,80
08	9,2	9,28	9,28	0,90	0,90
09	9,2	9,26	9,27	0,60	0,80
10	9,0	9,07	9,09	0,80	0,90
MÉDIA				0,80	0,80

Tabela 4.38 – Resultados dos ensaios de inchamento das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Espessura	Espessura	Espessura	Inchamento	Inchamento
	inicial (g)	2 horas (g)	24 horas (g)	2 horas (%)	24 horas (%)
01	9,0	9,06	9,08	0,70	0,90
02	9,1	9,18	9,19	0,90	0,95
03	9,3	9,37	9,39	0,80	0,95
04	9,2	9,27	9,28	0,80	0,90
05	9,2	9,28	9,29	0,80	0,90
06	9,0	9,08	9,09	0,90	0,95
07	9,2	9,28	9,29	0,90	0,95
08	9,1	9,18	9,18	0,90	0,90
09	9,1	9,18	9,18	0,90	0,90
10	9,2	9,28	9,28	0,90	0,90
MÉDIA				0,90	0,90

Tabela 4.39 – Comparação entre os resultados de inchamento entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos

Análise	Inchamento médio	Inchamento médio
	2 horas (%)	24 horas (%)
Padrão	0,60	0,80
500 horas	0,80	0,90
1.000 horas	0,80	0,80
1.500 horas	0,90	0,90

Com relação ao inchamento, tendo em vista os resultados apresentados, pode-se dizer que para o período de 2 horas, a variação do inchamento foi de 1% a cada placa analisada (500, 1.000 e 1.500 horas), comprovando que o aumento de espessura da placa

é muito baixo mesmo quando submetido à exposição ultravioleta e aos intemperismos. Após 24 horas, entretanto, não há como analisá-lo, pois não há parâmetros de comparações.

4.7.4.4 Densidade

As Tabelas 4.40, 4.41 e 4.42, apresentam os resultados da densidade das placas simuladas a 1, 2 e 3 anos de exposição aos raios ultravioletas e aos intemperismos (calor e umidade).

Tabela 4.40 – Resultados dos ensaios de densidade das placas expostas à 500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Volume (mm ³)	Densidade (kg/m ³)
01	25,4	22.500	1.128,89
02	25,5	22.500	1.133,33
03	25,3	22.500	1.124,44
04	25,4	22.500	1.128,89
05	25,3	22.500	1.124,44
06	25,6	22.500	1.137,78
07	25,3	22.500	1.124,44
08	25,4	22.500	1.128,89
09	25,7	22.500	1.142,22
10	25,3	22.500	1.124,44
MÉDIA			1.129,78

Tabela 4.41 – Resultados dos ensaios de densidade das placas expostas à 1.000 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Volume (mm ³)	Densidade (kg/m ³)
01	25,0	22.500	1.111,11
02	25,2	22.500	1.120,00
03	24,9	22.500	1.106,67
04	24,8	22.500	1.102,22
05	25,1	22.500	1.115,56
06	25,4	22.500	1.128,89
07	25,1	22.500	1.115,56
08	25,0	22.500	1.111,11
09	25,2	22.500	1.120,00
10	25,1	22.500	1.115,56
MÉDIA			1.114,67

Tabela 4.42 – Resultados dos ensaios de densidade das placas expostas à 1.500 horas ao UV e ao intemperismo

CP	Massa inicial (g)	Volume (mm ³)	Densidade (kg/m ³)
01	24,6	22.500	1.093,33
02	24,8	22.500	1.102,22
03	24,4	22.500	1.084,44
04	24,5	22.500	1.088,89
05	24,6	22.500	1.093,33
06	24,8	22.500	1.102,22
07	24,5	22.500	1.088,89
08	24,8	22.500	1.102,22
09	24,8	22.500	1.102,22
10	24,6	22.500	1.093,33
MÉDIA			1.095,11

Os resultados dos ensaios de densidade das placas que foram expostas ao UV e aos intemperismos em relação às aquelas que não sofreram degradação mostram que o percentual da densidade variou em média 1% para cada ano, conforme pode ser observado na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Comparação entre os resultados de densidade entre a placa sem exposição em relação aquelas expostas ao ultravioleta e aos intemperismos

	Padrão	500 horas	1.000 horas	1.500 horas
Densidade média	1.135,55	1.129,78	1.114,67	1.095,11

Ainda, é possível afirmar que, de acordo com a NBR 14.810 – 2 (ABNT, 2006a), a densidade de todas as placas degradadas ainda pode ser classificada como alta densidade, por apresentar valores superiores a 750 kg/m³.

Em geral, pode-se dizer que os efeitos da exposição ultravioleta e aos intemperismos nas placas avaliadas não causaram influência, uma vez que as alterações causadas são por muitas vezes, superficiais.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises e discussões dos resultados apresentados nesta Dissertação de Mestrado, foi possível delinear as seguintes conclusões para os objetivos propostos:

5.1 Objetivo específico 01

- Desenvolver o procedimento adequado para reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa e classificar o material obtido de acordo com sua granulometria.

Conclusão: Após a realização da revisão bibliográfica e estudos preliminares, pôde-se concluir que a melhor forma de promover a reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa foi através de sua moagem. A partir da moagem, foram obtidos dois tipos de agregados, denominados neste trabalho como AG 05 (módulo de finura = 2,98 mm) e AG 10 (módulo de finura = 3,80 mm). Com relação ao ensaio de granulometria, os resultados apontaram que o material gerado a partir da moagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa pode ser aplicado como um agregado reciclado.

5.2 Objetivo específico 02

- Classificar o resíduo reciclado quanto ao seu potencial de contaminação (lixiviação e solubilização).

Conclusão: Quanto ao potencial de contaminação, o resíduo reciclado não apresentou potencial de contaminação por lixiviação.

Já com relação às análises do potencial de contaminação por solubilização, os resultados da análises de chumbo e de cromo apresentaram-se acima dos limites estabelecidos pela normatização brasileira. Portanto, sua classificação inicial foi classe II – A, sendo não perigoso e não inerte. Assim, concluiu-se preliminarmente, que o agregado oferecia potencial de contaminação futura, por apresentar-se não inerte, apesar de não perigoso. Entretanto, após a adição do agregado à resina vegetal de mamona, e repetidos os ensaios de solubilização, os valores encontrados apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos por normatização. Pode-se concluir que a resina vegetal de mamona encapsulou e estabilizou o agregado reciclado de poliuretana, possibilitando a sua aplicação na composição das placas poliméricas, fazendo com que, neste caso específico, o agregado reciclado possa ser classificado como classe II B – inerte.

5.3 Objetivo específico 03

- Confeccionar placas poliméricas a partir da utilização do agregado reciclado de poliuretana, da resina vegetal de mamona e das fibras de vidro, em diferentes tipologias, com o propósito de qualificar o compósito desenvolvido.

Conclusão: Com o objetivo de promover a sustentabilidade ambiental, inserindo o agregado reciclado no desenvolvimento de um material, após a revisão bibliográfica acerca do tema, foi possível desenvolver tal compósito junto da sua adição à resina vegetal de mamona e das fibras de vidro, em sete diferentes tipologias de placas poliméricas.

5.4 Objetivo específico 04

- Avaliar o comportamento mecânico (ensaios de tração, flexão e punção) de cada tipologia placa polimérica confeccionada, a fim de determinar a melhor tipologia confeccionada.

Conclusão: Após os ensaios de tração, flexão e punção, a tipologia sete, produzida a partir da mistura dos agregados AG 10 e AG 05 e das duas fibras de vidro, a partir da moldagem à compressão de 5 toneladas a 50°C durante 15 minutos, por apresentar bons resultados de caracterização mecânica e pelo fato de, ser produzido com pouco tempo de prensagem, foi escolhida para caracterização. Com isso, foram confeccionadas placas poliméricas com considerável resistência mecânica e com baixo consumo de energia elétrica para sua produção.

5.5 Objetivo específico 05

- Analisar as propriedades físicas (absorção em água, inchamento e densidade) e térmica (condutividade térmica), segurança contra o incêndio (flamabilidade) e a durabilidade (resistividade elétrica, abrasão superficial, ataque químico e resistência à exposição ultravioleta e ao intemperismo) da melhor tipologia de placa desenvolvida, comparando os resultados obtidos com a normatização brasileira e com dados da literatura.

Conclusão: A placa analisada apresentou valores de absorção de água e de inchamento abaixo dos recomendados por norma e por outros dados da literatura, fazendo com que, o material não adquira sobrecarga e tenha ampla aplicação. Sua densidade de 1.135,55 kg/m³, classificou-o como material de alta densidade. Ainda, esta placa quando comparada com materiais comumente aplicados à

construção civil, apresenta-se bem posicionada quanto à sua condutividade e calor específico. Além de apresentar alta resistência a ácidos e bases encontrados em altas e baixas concentrações e nos produtos de limpeza, pode ser considerado como um bom isolante elétrico. Quando submetido ao ensaio de abrasão, apresentou características de PEI – 3. Com relação à sua flamabilidade, o material apresentou-se como auto extingüível, e não liberou fumaça durante a realização dos ensaios. Quando submetido ao ensaio de exposição aos raios ultravioleta e às intempéries, durante ciclos que simularam 500, 1.000 e 1.500 horas que corresponde respectivamente a um, dois e três anos de exposição, os resultados de propriedades físicas, dureza e impacto não foram muito inferiores em comparação àquelas placas que não foram submetidas ao ensaio de exposição aos raios ultravioleta e às intempéries, o que comprova a sua aplicação em ambientes internos e externos sem a perda de suas características.

5.6 Objetivo geral 01

- Promover a reciclagem do resíduo industrial de poliuretana, a fim de transformá-lo em agregado reciclado.

Conclusão: Cabe destacar, que o resíduo em questão, é tratado pela empresa geradora como um rejeito, tendo em vista, que seu destino final é o aterro de resíduos industriais de Novo Hamburgo, quando na verdade, trata-se de um material com grande potencialidade de reciclagem. Como o resíduo industrial estudado apresenta em sua composição a poliuretana termofixa, ou seja, não pode ser derretido ou novamente fundido para compor um novo material, verificou-se por meio desta pesquisa que a melhor solução para promover a reciclagem do resíduo industrial de poliuretana estudado era por meio da sua moagem. Afim de apontar uma

aplicação para o agregado, foi necessário realizar os ensaios de granulometria, lixiviação e solubilização. Isso permitiu indicar a utilização do agregado reciclado no desenvolvimento do compósito polimérico, assim como foi proposto na segunda etapa da presente pesquisa.

5.7 Objetivo geral 02

- Desenvolver, a partir do agregado reciclado de poliuretana, um compósito polimérico e caracterizá-lo quanto às suas propriedades físicas e térmicas, segurança contra o incêndio e à sua durabilidade.

Conclusão: A partir da comparação dos dados obtidos com a realização dos ensaios propostos nesta pesquisa, pôde-se concluir que a placa em estudo pode ter sua aplicação sugerida para diversos setores, como por exemplo, na construção civil.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta Dissertação atendeu aos objetivos que foram propostos, e, em consequência destes estudos, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Analisar as propriedades térmicas e de durabilidade das placas poliméricas das tipologias 3 e 5, desenvolvidas nesta pesquisa, com o objetivo de indicar uma possível aplicação;
- Analisar a absorção acústica das diversas tipologias de placas poliméricas desenvolvidas nesta pesquisa, visando a aplicação na construção civil;
- Analisar as propriedades térmicas, a absorção acústica e a durabilidade das placas poliméricas analisadas neste estudo, após sua exposição aos raios ultravioleta e às intempéries;
- Testar a tipologia de cada placa polimérica caracterizada nesta pesquisa de Mestrado, como elemento construtivo (telhas e pisos) e sistema de vedação, realizando os devidos estudos e ensaios de acordo com as exigências da normatização brasileira;
- Verificar o potencial da aplicação do agregado reciclado de poliuretana oriundo das placas poliméricas confeccionadas na presente pesquisa de Mestrado na produção de novas placas poliméricas, desenvolvendo assim, a logística reversa do produto;
- A partir da metodologia desenvolvida nesta pesquisa, confeccionar, caracterizar e apontar possíveis aplicações para placas poliméricas desenvolvidas a partir de outros tipos de resíduos (como por exemplo, o PET, o polipropileno e o poliestireno expandido), outros tipos de resinas (resinas sintética de

poliuretana, epóxi e acrílica) e outros tipos de reforços, como as fibras naturais;

- Propor a aplicação das placas poliméricas desenvolvidas nesta pesquisa em setores como as indústrias moveleira e de brinquedos.

REFERÊNCIAS

AGNELLI, J.A. **Introdução a Materiais Poliméricos e Materiais na Produção Industrial 2**. Publicação do Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1996.

ALMEIDA, J.E. **Painéis de madeira aglomerada produzidos com serragem e poliestireno expandido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2011.

ANDRADE, J.J.O. **Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia de materiais**. Capítulo 38. In: IBRACON, São Paulo, 2007.

ARAÚJO, L.C.R. (1998). **Contribuição ao estudo dos poliuretanos flexíveis derivados de óleo da mamona determinando suas propriedades físicas e químicas**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ASSAGRA Y.A.O. **Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas com manta geossintética e impregnadas com resina poliuretana**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

“ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6.488**: Componentes de construção – Determinação da condutância e transmitância térmica – Método da caixa quente protegida. 1980.

_____ **NBR 7.211**: Agregados para concreto – Especificação. 2005.

_____ **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – “Classificação”. 2004.

_____ **NBR 10.005:** "Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos". 2004.

_____ **NBR 10.006:** "Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos". 2004.

_____ **NBR 10.007:** "Amostragem de Resíduos Sólidos". 2004.

_____ **NBR 12.824:** Geotêxteis: "Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de tração de faixa larga". 1993.

_____ **NBR 13.359:** "Geotêxteis: Determinação da resistência ao puncionamento estático". 1995.

_____ **NBR 13.818:** "Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios – Anexo D". 1997a.

_____ **NBR 13.818:** "Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios – Anexo H". 1997b.

_____ **NBR 14.810 – 2:** "Chapas de madeira glomerada – Parte 2: Requisitos". 2006a.

_____ **NBR 14.810 – 3:** "Chapas de madeira glomerada – Parte 3: Métodos de ensaio". 2006b.

_____ **NM 248:** "Agregado: determinação da composição granulométrica". 2003.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 351 – 922 b:** Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation, 1999.

_____ **D – 257:** Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.

_____ **G – 154:** Operating Light and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV- Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic

Materials.

BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C.; SELKE, A. E.; **Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster.** Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, 2009.

BORGES, J. C. S. **Compósito de poliuretano da mamona e vermiculita para isolamento térmica.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

BRASIL. Decreto no. 7.404/2010, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei no. 12.305, de 2 de agosto de 2.010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.** Brasília, 2010.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5ª edição. 2002.

CANEVAROLO JR., S.V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** Artliber, São Paulo, 2002.

CANGEMI, J.M. **Biodegradação de Poliuretano derivado do Óleo de Mamona.** Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CANGEMI, J.M.; SANTOS, A.M.; CLARO NETO, S. **Study of the Biodegradation of a polymer derived from castor oil by scanning electron microscopy, thermogravimetry and infrared spectroscopy.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, n. 2, 2006.

CHAVES, A.L.O. (1998). **Polímeros: subsídio para utilização na construção civil.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CHIERICE, G. O. e CLARO NETO, S. **Aplicação industrial do óleo.** In: AZEVEDO, D. M. P. e LIMA, E. F. (orgs.). O agronegócio da mamona no Brasil. Brasília: Embrapa, 2001. p. 89-120.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos.** Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

CÓRDOBA, R.E. **Estudo da influência de lixiviados de aterros de resíduos da construção civil na qualidade de recursos hídricos.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

ESSWEIN JR., J.A.L. **Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

GUIMARÃES, G.P. **Uma formulação de elementos finitos axissimétricos para análise de tubos laminados em materiais compósitos.** 120 p. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

HELENE, P. R. L; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Ed. Pini, 1992.

IGNÁCIO, H; MAZZER, N; BARBIERI, C.H. e CHIERICE, G.O. **Estudo sobre a aplicabilidade médica da poliuretana derivada da mamona.** Resenha Ortopédica, n. 6, 1996.

KEMERICH, P.D.C.; PIOVESAN, M.; BERTOLETTI, L.L.; ALTMAYER, S.; VORPAGEL, T.H. **Fibras de vidro: caracterização, disposição e impactos ambientais gerados.** In: Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v.10, n.10, p. 2112-2121, 2013.

MARINELLI, A.L.; MONTEIRO, M.R.; AMBRÓSIO, J.D. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica.** In: Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, n. 2, p.92-99, 2008.

MARQUES NETO, J.C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil.** São Carlos, SP: Editora RiMa, 2005, 162 p.

MASSUKADO, L.M. **Sistema de apoio à decisão: avaliação de cenários de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos domiciliares.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MATHEUS, M.A. **Fiberglass – compósito a base de fibra de vidro.** São Paulo, 2002.

MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, FELIPE P.D.; CARVALHO, E.A.; ALMEIDA, J.R.D. **Comportamento mecânico e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas de Curauá.** In: Revista Matéria, v.11, n.3, pp. 197-203, 2006.

NASCIMENTO, M. F. **CPH – Chapas de partículas homogêneas – madeiras do Nordeste do Brasil.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

NETO, T.A. **Estudo de compósitos poliméricos biodegradáveis de poli-hidroxibutirato (PHB), poli-caprolactona (PCL) e pó de madeira.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2011.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. São Paulo: Pini, 1982.

NOGUEIRA, J. R. **Reciclando cinzas: estudo da viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

NÚCLEO DE ESTUDO E PESQUISA EM RESÍDUOS SÓLIDOS – NEPER. In: CASTRO, M.A.S.; CORDOBA, R.E.; SCHALCH, V. Org.. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (Apostila)**, São Carlos, SP: SHS/EESC/USP, 2014. 120p.

OTA, W. N.; **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, PR, 2004.

PABLOS, J.M. **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

PETROVIC, Z.S. **Thermosetting resins from vegetable oils**. In: Annual Technical Conference, 57., 1999, New York.

PINTO, K. N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências na área de Tecnologia de Materiais Nucleares. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

ROCHA, S. **A Casa do Plástico**. Revista Técnica, São Paulo, Editora Pini,

Janeiro de 1997. p.20.

RODRIGUES, M. R. P. **Caracterização e utilização do resíduo de borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicados na construção civil**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

ROSA, D.S.; GUEDES, C.G.F. **Desenvolvimento de processos de reciclagem de resíduos industriais de poliuretana e caracterização dos produtos obtidos**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, n.1, p. 64-71, 2003.

SALADO, G.C. **Painel de vedação vertical de tubos de papelão: estudo, proposta e análise de desempenho**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SICHERI, E.P. **Plásticos na Construção Civil**. Publicação para a disciplina de Materiais de Construção Civil. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1996.

SICHERI, E.P.; PABLOS, J.M.; FERREIRA, O.P.; ROSSIGNOLO, J.A.; CARAM, R. **O sistema revestimento cerâmico**. [Apostila]. São Carlos: Serviço gráfico: EESC – USP, 2008. 84p.

SILVA, A.C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2002.

SILVA, R.V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOARES, R. R. (et al.) **Influência do tipo de fibra nas propriedades de**

compósitos processados por moldagem por transferência de resina.

Departamento de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, RS, Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007.

SOUTO, G.D.B.; POVINELLI, J. **Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013. Cap. 22, p. 565-588.

SOUZA, P.G. **Estudo da incorporação do óleo de mamona no PVC flexível em substituição ao DOP**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Centro Paula Souza, Centro Tecnológico da Zona Leste, São Paulo, 2009.

TWE, M. M. e Liao, K. **Durability of bamboo-glass fiber reingorced polymer matrix hybrid composites**, *Composites Science and technology*. Vol. 63, p. 375-387, 2003.

UL – 94 V: 2001. **Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances Underwriters Laboratories Inc (UL)**. 2001.

WOODS, G. **Flexible polyurethane foams**. London: **Applied Science Publishers**. 1982. 352 p.

ANEXOS

Tabela A.1 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo – resíduo polimérico #5

Determinação da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo - Resíduo polimérico peneira #5										
Série Normal e Série Intermediária - NBR NM 248/2001							Valores da Norma			
Peneira # (mm)	M1 = 300 g		M2 = 300 g		Médias		Zona utilizável		Zona ótima	
	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.	Limites Inferiores	Limites Superiores	Limites Inferiores	Limites Superiores
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	10%	0%	5%
2.36	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	25%	10%	20%
1.18	49,4	16,5%	49,3	16,5%	17%	17%	5%	50%	20%	30%
0.6	204,6	68,5%	206,4	69,1%	69%	85%	15%	70%	35%	55%
0.3	34,4	11,5%	33,9	11,3%	11%	97%	50%	95%	65%	85%
0.15	7,1	2,4%	6,1	2,0%	2%	99%	85%	100%	90%	95%
Fundo	3,2	1,1%	3,0	1,0%	1%	100%				
Soma	298,7	100,0%	298,7	100,0%	100%	398%				
Diâmetro máximo característico:					2.36 mm				Série Normal	
Módulo de finura:					2,98				Série Intermediária

São Carlos, 22 de Outubro 2012.

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

Tabela A.2 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo – resíduo polimérico #10

Determinação da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo - Resíduo polimérico peneira #10										
Série Normal e Série Intermediária - NBR NM 248/2001							Valores da Norma			
Peneira # (mm)	M1 = 300 g		M2 = 300 g		Médias		Zona utilizável		Zona ótima	
	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.	Limites Inferiores	Limites Superiores	Limites Inferiores	Limites Superiores
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%
4.75	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%	0%	10%	0%	5%
2.36	1,6	0,5%	1,9	0,6%	1%	1%	0%	25%	10%	20%
1.18	246,9	82,6%	246,7	82,7%	83%	83%	5%	50%	20%	30%
0.6	43,2	14,4%	42,2	14,1%	14%	98%	15%	70%	35%	55%
0.3	5,5	1,8%	5,8	1,9%	2%	99%	50%	95%	65%	85%
0.15	1,2	0,4%	1,2	0,4%	0%	100%	85%	100%	90%	95%
Fundo	0,6	0,2%	0,6	0,2%	0%	100%				
Soma	299,0	100,0%	298,4	100,0%	100%	480%				
Diâmetro máximo característico:					2.36 mm					
Módulo de finura:					3.80					
									Série Normal	
									Série Intermediária

São Carlos, 22 de Outubro 2012.

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

Tabela A.3 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 01

TIPOLOGIA 01	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	674,40	702,20	705,30	728,50	733,50	745,60	299,30	304,70	319,30	322,90	335,80	342,00	452,80	499,70	513,30	552,50	581,90	603,70
	02	674,50	702,30	705,40	728,30	733,60	745,80	299,10	304,90	319,40	322,20	335,70	342,50	452,10	499,20	513,40	552,30	381,50	603,60
	03	674,20	702,50	705,60	728,40	733,10	745,50	299,20	304,30	319,50	322,60	335,90	342,70	452,90	499,80	513,70	552,60	381,40	603,30
	04	673,90	702,10	705,70	728,20	733,30	745,90	299,60	304,50	319,20	322,10	335,00	342,40	452,20	499,30	513,50	552,70	381,60	603,10
	05	674,50	702,40	705,10	728,60	733,20	745,00	299,00	304,10	319,60	322,30	335,20	342,90	452,70	499,00	513,10	552,20	381,30	603,80
	06	675,00	702,60	705,20	728,10	733,40	745,50	299,40	304,00	319,10	322,50	335,30	342,20	452,00	499,10	513,20	552,40	381,00	603,50
	07	674,40	702,00	705,50	728,70	733,80	745,10	299,90	304,20	319,70	322,80	335,10	342,30	452,30	499,40	513,60	552,10	381,20	603,40
	08	674,70	702,80	705,90	728,00	733,90	745,20	299,50	304,40	319,00	322,60	335,50	342,10	452,40	499,50	513,00	552,90	381,70	603,00
	09	674,60	702,90	705,00	728,80	733,70	745,30	299,70	304,60	319,80	322,00	335,40	342,80	452,50	499,90	513,80	552,00	381,10	603,20
	10	674,50	702,70	705,80	728,90	733,00	745,40	299,80	304,80	319,90	322,40	335,60	342,60	452,60	499,60	513,90	552,80	381,80	603,50
	MÉDIA	674,50	702,50	705,50	728,50	733,50	745,40	299,50	304,50	319,50	322,50	335,50	342,40	452,50	499,50	513,50	552,50	601,50	603,40

Tabela A.4 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 02

TIPOLOGIA 02	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	348,70	362,90	401,80	413,40	422,30	433,80	321,80	327,30	354,40	387,40	401,20	403,50	452,80	499,70	513,30	534,50	552,50	581,90
	02	348,10	362,80	401,30	413,90	422,80	433,00	321,10	327,20	354,30	387,30	401,50	403,60	452,00	499,10	513,20	534,30	552,40	581,00
	03	348,20	362,60	401,10	413,80	422,50	433,30	321,20	327,10	354,50	387,20	401,60	403,70	452,90	499,20	513,10	535,40	552,90	581,10
	04	348,80	362,00	401,20	413,10	422,90	433,50	321,30	327,40	354,60	387,50	401,70	403,80	452,80	499,30	513,40	534,90	552,60	581,20
	05	348,30	362,10	401,00	413,70	422,20	433,40	321,40	327,50	354,70	387,60	401,80	403,40	452,70	499,40	513,50	534,10	552,70	581,30
	06	348,40	362,00	401,50	413,20	422,10	433,60	321,00	327,60	354,80	387,70	401,90	403,10	452,60	499,50	513,60	534,70	552,20	581,40
	07	348,00	362,50	401,70	413,10	422,40	433,90	321,30	327,70	354,90	387,80	401,00	403,20	452,50	499,60	513,70	537,80	552,00	581,50
	08	348,50	362,20	401,90	413,00	422,70	433,10	321,20	327,00	354,00	387,90	401,10	403,30	452,20	499,00	513,90	537,20	552,10	581,60
	09	348,90	362,30	401,40	413,30	422,00	433,20	321,10	327,90	354,10	387,00	401,30	403,00	452,10	499,80	513,00	537,60	552,80	581,70
	10	348,60	362,40	401,60	413,50	422,60	433,30	321,00	327,80	354,20	387,10	401,40	403,90	452,30	499,90	513,80	537,00	552,20	581,80
	MÉDIA	348,50	362,40	401,50	413,40	422,50	433,40	321,20	327,50	354,50	387,50	401,40	403,50	452,50	499,50	513,50	535,80	552,40	581,50

Tabela A.5 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 03

TIPOLOGIA 03	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	704,50	756,70	790,80	792,40	795,60	799,90	368,90	378,70	387,20	395,80	409,30	420,40	534,50	541,30	548,80	552,80	559,60	567,60
	02	704,10	756,20	790,30	792,20	795,70	779,00	368,00	378,50	387,90	395,70	409,60	420,10	534,20	541,70	548,00	552,30	559,70	567,00
	03	704,20	752,30	790,40	792,50	795,80	779,10	368,80	378,60	387,80	395,60	409,50	420,00	534,10	541,20	548,10	552,50	559,30	567,90
	04	704,30	752,40	790,50	792,60	795,90	779,20	368,70	378,80	387,00	395,50	409,70	420,20	534,00	541,10	548,20	552,40	559,00	567,80
	05	704,40	752,50	790,60	792,70	795,00	779,30	368,60	378,10	387,30	395,90	409,80	420,30	534,70	541,00	548,30	552,90	559,20	567,30
	06	704,60	752,80	790,70	792,90	795,10	779,40	368,50	378,20	387,10	395,00	409,90	420,50	534,60	541,40	548,40	552,70	559,40	567,10
	07	704,70	752,90	790,00	792,10	795,20	779,50	368,10	378,30	387,40	395,10	409,00	420,60	534,90	541,60	548,50	552,10	559,10	567,20
	08	704,80	752,00	790,10	792,20	795,30	779,60	368,30	378,40	387,50	395,20	409,10	420,90	534,30	541,90	548,90	552,80	559,50	567,50
	09	704,00	752,10	790,20	792,30	795,40	779,70	368,20	378,90	387,60	395,30	409,20	420,70	534,80	541,50	548,60	552,20	559,80	567,40
	10	704,90	752,60	790,90	792,80	795,50	779,80	368,40	378,00	387,70	395,40	409,40	420,80	534,40	541,80	548,70	552,60	559,90	567,70
	MÉDIA	704,50	753,30	790,50	792,50	795,50	781,50	368,50	378,50	387,50	395,50	409,50	420,50	534,50	541,50	548,50	552,50	559,50	567,50

Tabela A.6 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 04

TIPOLOGIA 04	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	759,10	789,00	809,80	816,60	861,60	899,70	517,30	528,10	553,10	568,70	575,30	588,90	674,10	683,20	688,70	690,20	693,80	696,80
	02	759,20	789,90	809,50	816,30	861,50	899,80	517,40	528,80	553,00	568,30	575,00	588,50	674,20	683,00	688,10	690,10	693,30	696,70
	03	759,30	789,30	809,60	816,20	861,10	899,90	514,90	528,40	553,90	568,90	575,20	588,40	674,30	683,10	688,20	690,00	693,90	696,30
	04	759,40	789,20	809,00	816,10	861,30	899,60	514,80	528,50	553,20	568,70	575,80	588,20	674,40	683,30	688,30	690,90	693,20	696,20
	05	759,50	789,60	809,30	816,00	861,20	899,00	514,70	528,20	553,30	568,20	575,90	588,80	674,50	683,40	688,40	690,30	693,70	693,40
	06	759,90	789,40	809,10	816,40	861,70	899,10	514,60	528,60	553,40	568,10	575,10	588,10	674,60	683,50	688,50	690,40	693,00	693,90
	07	759,80	789,10	809,20	816,50	861,80	899,50	514,50	528,70	553,50	568,00	575,40	588,60	674,70	683,70	688,60	690,60	693,40	693,00
	08	759,70	789,00	809,90	816,70	861,00	899,20	514,20	528,30	553,60	568,50	575,60	588,30	674,80	683,80	688,80	690,50	693,50	693,10
	09	759,60	789,70	809,40	816,80	861,90	899,40	514,00	528,90	553,70	568,40	575,50	588,70	674,00	683,90	688,90	690,70	693,00	693,60
	10	759,00	789,50	809,70	816,90	861,40	899,30	514,10	528,00	553,80	568,50	575,70	588,00	674,90	683,60	688,00	690,80	693,10	693,50
	MÉDIA	759,50	789,40	809,50	816,50	861,50	899,50	515,00	528,50	553,50	568,40	575,50	588,50	674,50	683,50	688,50	690,50	693,40	694,70

Tabela A.7 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 05

TIPOLOGIA 05	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	733,40	765,80	772,30	780,90	783,40	785,60	408,60	413,40	420,70	427,50	429,90	431,90	555,80	561,70	566,90	576,10	579,70	583,60
	02	733,60	765,60	772,70	780,00	783,00	785,50	408,70	413,70	420,80	427,70	429,00	429,50	555,30	561,50	566,00	576,50	579,80	583,70
	03	733,90	765,30	772,00	780,10	783,20	785,00	408,40	413,30	420,10	427,80	429,30	429,70	555,20	561,40	566,10	576,40	579,90	583,80
	04	733,80	765,90	772,40	780,20	783,10	785,40	408,50	413,90	420,20	427,20	429,60	429,00	555,90	561,70	566,30	576,20	579,00	583,90
	05	733,50	765,00	772,90	780,30	783,60	785,10	408,10	413,80	420,60	427,10	429,10	429,20	555,00	561,90	566,40	576,60	579,10	583,50
	06	733,10	765,10	772,50	780,80	783,50	785,80	408,30	413,20	420,80	427,00	429,20	429,40	555,40	561,80	566,20	576,70	579,20	583,40
	07	733,00	765,20	772,20	780,40	783,30	785,70	408,00	413,50	420,90	427,60	429,70	429,80	555,10	561,20	566,80	576,00	579,30	583,30
	08	733,20	765,00	772,10	780,50	783,90	785,20	408,90	413,60	420,00	427,40	429,40	429,10	555,50	561,30	566,70	576,90	579,40	583,20
	09	733,70	765,40	772,60	780,60	783,80	785,30	408,20	413,10	420,30	427,30	429,80	429,60	555,70	561,10	566,50	576,30	579,50	583,10
	10	733,30	765,50	772,00	780,70	783,00	785,90	408,80	413,00	420,40	427,90	429,50	429,30	555,60	561,00	566,60	576,80	579,60	583,00
	MÉDIA	733,50	765,40	772,40	780,50	783,40	785,50	409,50	413,50	420,50	427,50	429,50	429,70	555,50	561,50	566,50	576,50	579,50	583,50

Tabela A.8 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 06

TIPOLOGIA 06	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	996,30	1.012,30	1.015,40	1.022,30	1.028,50	1.031,80	798,80	822,50	837,10	852,20	915,30	937,60	808,70	818,30	830,90	844,20	853,90	870,30
	02	996,00	1.012,20	1.015,90	1.022,40	1.028,50	1.031,60	798,00	822,60	837,80	852,90	915,10	937,50	808,10	818,20	830,00	844,60	853,00	870,90
	03	996,20	1.012,90	1.015,80	1.022,20	1.028,50	1.031,50	798,90	822,70	837,50	852,80	915,20	937,70	808,30	818,50	830,20	844,70	853,20	870,70
	04	996,50	1.012,60	1.015,70	1.022,50	1.028,60	1.031,50	798,20	822,80	837,30	852,70	915,90	937,80	808,40	818,40	830,30	844,90	853,30	870,60
	05	996,40	1.012,50	1.015,80	1.022,50	1.028,80	1.031,60	798,10	822,90	837,70	852,60	915,80	937,90	808,20	818,90	830,10	844,80	853,40	870,80
	06	996,10	1.012,40	1.015,80	1.022,40	1.028,60	1.031,70	798,30	822,00	837,60	852,50	915,00	937,10	808,90	818,50	830,40	844,40	853,10	870,50
	07	996,60	1.012,70	1.015,80	1.022,60	1.028,40	1.031,80	798,40	822,10	837,90	852,40	915,70	937,20	808,80	818,60	830,70	844,50	853,70	870,30
	08	996,00	1.012,80	1.015,90	1.022,70	1.028,50	1.031,80	798,50	822,20	837,40	852,30	915,50	937,30	808,00	818,80	830,60	844,30	853,60	870,00
	09	996,80	1.012,10	1.015,70	1.022,60	1.028,50	1.031,60	798,60	822,30	837,20	852,00	915,60	937,40	808,50	818,10	830,50	844,10	853,50	870,20
	10	996,90	1.012,00	1.015,90	1.022,60	1.028,50	1.031,70	798,70	822,40	837,00	852,10	915,40	937,00	808,60	818,00	830,80	844,00	853,80	870,10
	MÉDIA	996,50	1.012,50	1.016,00	1.022,00	1.028,50	1.031,50	798,50	822,50	837,50	852,50	915,50	937,50	808,50	818,00	830,50	844,50	853,50	870,50

Tabela A.9 – Resultados individuais dos ensaios mecânicos das placas da tipologia 07

TIPOLOGIA 07	CP	TRAÇÃO (valores em N)						FLEXÃO (valores em N)						PUNÇÃO (valores em N)					
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
	01	990,80	-	-	-	-	-	792,30	-	-	-	-	-	803.40	-	-	-	-	-
	02	990,80	-	-	-	-	-	792,50	-	-	-	-	-	803.50	-	-	-	-	-
	03	990,60	-	-	-	-	-	792,50	-	-	-	-	-	803.50	-	-	-	-	-
	04	990,70	-	-	-	-	-	792,40	-	-	-	-	-	803.70	-	-	-	-	-
	05	990,80	-	-	-	-	-	792,60	-	-	-	-	-	803.60	-	-	-	-	-
	06	990,50	-	-	-	-	-	792,70	-	-	-	-	-	803.70	-	-	-	-	-
	07	990,70	-	-	-	-	-	792,70	-	-	-	-	-	803.70	-	-	-	-	-
	08	990,80	-	-	-	-	-	792,60	-	-	-	-	-	803.80	-	-	-	-	-
	09	990,90	-	-	-	-	-	792,60	-	-	-	-	-	803.60	-	-	-	-	-
	10	990,80	-	-	-	-	-	792,60	-	-	-	-	-	803.60	-	-	-	-	-
	MÉDIA	990,80	-	-	-	-	-	792,60	-	-	-	-	-	803,60	-	-	-	-	-