



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA



**COMPÓSITO À BASE DE POLIPROPILENO RECICLADO PARA UTILIZAÇÃO
NAS CONSTRUÇÕES RURAL E CIVIL**

Luana Varela Miranda

Campina Grande – PB

Março, 2020

**COMPÓSITO À BASE DE POLIPROPILENO RECICLADO PARA UTILIZAÇÃO
NAS CONSTRUÇÕES RURAL E CIVIL**

Luana Varela Miranda

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Campina Grande – PB

Março, 2020

Luana Varela Miranda

**COMPÓSITO À BASE DE POLIPROPILENO RECICLADO PARA UTILIZAÇÃO
NAS CONSTRUÇÕES RURAL E CIVIL**

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Orientador – UFCG/UEAg

Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Examinador Interno – UFCG/UEAg

Profa. Dra.
Examinador Interno – UFCG/CTRN/PPGEAg

AGRADECIMENTOS

Vivo agora mais um momento de etapa vencida em minha vida em muitos aspectos, pois me vejo agora mestre! Mestre em uma engenharia que nunca imaginei, mas que me acolheu e que aprendi a amar, que é a engenharia agrícola. Se tivesse que voltar, faria tudo da mesma forma: as amizades, as trocas de experiências, os experimentos compartilhados, as buscas por melhores resultados e as contribuições de todos os professores do laboratório que me acolheu.

Nesse momento ímpar, só tenho a agradecer a Deus, à minha mãe e minha avó que estiveram comigo em todas as minhas decisões e em especial ao meu marido, pois essa dissertação também é dele, e gostaria que ele estivesse recebendo também o título de mestre, pois tem muito dele aqui nessas palavras, seja na parte prática, sejam nas ideias ou na tranquilidade e confiança que ele me passou para poder escrever e “dar à luz” a essa dissertação tão sonhada.

Ao professor Wallace, minha eterna gratidão pelo acolhimento e por embarcar na aventura de uma ideia diferente em uma área que não é a sua preferida, e que me fez crescer tanto como pesquisadora.

Por fim e não menos importante, agradeço aos amigos que colaboraram no laboratório LACRA fazendo aquela forcinha quando necessário: Bruno, Ronaldo, Gypson, Patrício, Luís, Airton, Noelly, Rafael, Jackson, Sílvia, Vicente, Thiago, Danielle, Nágela, Fabiana, Cácio, Calixto, Hygor, Joselito, entre outros que de alguma forma contribuíram para eu chegar até aqui. O meu muito obrigada pelo incentivo e pela amizade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 O cimento e suas problemáticas	14
3.2 O que é o compósito chamado de concreto polimérico	14
3.3 Os polímeros em uso no concreto polimérico	15
3.4 O Polipropileno	17
3.5 A reciclagem do resíduo do polipropileno	18
3.6 Estudos e Aplicações de resíduo de polipropileno em compósitos	19
3.7 A areia como agregado	20
3.8 O pó de pedra como agregado	21
3.9 A metodologia de moldagem dos corpos de prova	21
3.10 Impactos Ambientais	22
3.11 Aplicações	23
3.12 Propriedades do concreto polimérico	24
3.12.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	24
3.12.2 Absorção de água por capilaridade e imersão	25
3.12.3 Índice de vazios	25
3.12.4 Resistência à compressão	25
3.12.5 Resistência à tração por compressão diametral	26
3.12.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) Erro! Indicador não definido.
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Metodologia Experimental	28
4.2 Materiais	29
4.2.1 Coleta do resíduo de Polipropileno e dos agregados	29
4.2.2 Moagem do polímero	30
4.2.3 Caracterização dos materiais para produção dos compósitos	31
4.3 Procedimento Experimental	34
4.4 Produção dos Corpos de Prova	35
4.5 Propriedades do Compósito	39
4.5.1 Absorção de água por capilaridade	39

4.5.2	Absorção de água por imersão.....	40
4.5.3	Resistência à compressão	42
4.5.4	Resistência à tração por compressão diametral	43
4.5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Erro! Indicador não definido.
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Propriedades dos componentes do compósito	46
5.1.1	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do Polipropileno.....	46
5.1.2	Análise Granulométrica.....	46
5.1.3	Massa unitária dos agregados	48
5.1.4	Absorção de água dos agregados.....	48
5.2	Propriedades do compósito	49
5.2.1	Absorção de água por capilaridade.....	49
5.2.2	Absorção de água por imersão.....	52
5.2.3	Resistência à compressão	56
5.2.4	Resistência à tração por compressão diametral	58
5.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Erro! Indicador não definido.
6.	CONCLUSÃO.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma das etapas do projeto.....	28
Figura 2. Polímero, areia e pó de pedra utilizados na pesquisa, respectivamente.....	30
Figura 3. Moinho de facas utilizado para moagem do polímero.....	30
Figura 4. Conjunto de peneiras e mesa vibratória utilizadas na análise granulométrica.....	32
Figura 5. Ensaio de massa unitária dos agregados.....	33
Figura 6. Ensaio de absorção dos agregados.....	33
Figura 7. Corpos de prova elaborados na pesquisa.....	36
Figura 8. Equipamento elaborado para moldagem dos corpos de prova.....	37
Figura 9. Prensa CBR utilizada para compactação dos corpos de prova.....	38
Figura 10. Prensa hidráulica utilizada para extração do corpo de prova do molde.....	39
Figura 11. Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	40
Figura 12. Ensaio de absorção de água por imersão.....	41
Figura 13. Ensaio de Resistência à compressão simples.....	43
Figura 14. Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral.....	44
Figura 15. Rompimento de corpo de prova à tração por compressão diametral.....	44
Figura 16. Curva DSC do polipropileno.....	46
Figura 17. Curva Granulométrica do polipropileno, areia e pó de pedra.....	47
Figura 18. Resultados para os ensaios de absorção de água por capilaridade de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	49
Figura 19. Superfície de tendência para a absorção de água por capilaridade, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para o agregado pó de pedra.....	51
Figura 20. Superfície de resposta para a absorção de água por capilaridade, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para o agregado areia.....	51
Figura 21. Resultados para os ensaios de absorção de água por imersão de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	52
Figura 22. Superfícies de resposta para a absorção de água por imersão, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra.....	54
Figura 23. Resultados para a determinação do índice de vazios de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	55
Figura 24. Resultados para a determinação da massa específica da amostra seca de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	55
Figura 25. Resultados para a determinação da massa específica da amostra saturada de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	56
Figura 26. Resultados para os ensaios de resistência à compressão de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	57
Figura 27. Superfícies de resposta para a resistência à compressão, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra.....	58
Figura 28. Resultados para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra.....	59
Figura 29. Superfícies de resposta para a resistência à tração por compressão diametral, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores reais e codificados das variáveis independentes	29
Tabela 2. Matriz delineamento do planejamento experimental estatístico fatorial	29
Tabela 3. Nomenclatura adotada para as amostras na pesquisa	34
Tabela 4. Distribuição das partículas dos grãos e determinação de dimensão máxima característica e módulo de finura	47
Tabela 5. Massa unitária da areia natural e pó de pedra.....	48
Tabela 6. Absorção de água da areia e pó de pedra.....	49
Tabela 7. Análise de variância para avaliação da absorção de água por capilaridade no compósito	50
Tabela 8. Análise de variância para avaliação da absorção de água por imersão no compósito	53
Tabela 9. Análise de variância para avaliação da resistência à compressão no compósito.....	57
Tabela 10. Análise de variância para avaliação da resistência à tração por compressão diametral no compósito	60

COMPÓSITO À BASE DE POLIPROPILENO RECICLADO PARA UTILIZAÇÃO NAS CONSTRUÇÕES RURAL E CIVIL

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise sobre as propriedades físicas e mecânicas de blocos compostos de areia ou pó de pedra aglutinados por polipropileno reciclado através de tratamento térmico visando a implantação para alvenarias e/ou pavimentos na construção civil ou rural. Com o objetivo principal de substituir a água e o cimento na mistura e promover estudos no compósito utilizando tal polímero como forma otimizada para futuras aplicações em prol de alta resistência, a pesquisa foi desenvolvida a partir de metodologia própria envolvendo os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade no qual diferentes composições de polímeros reciclados e cargas de compactação para modificação do compósito foram testadas para melhor caracterização do mesmo. Comparando-se e observando-se melhorias nas propriedades da mistura, constatou-se que o aumento da adição de polipropileno na mistura acarretou em maiores resistências e menores absorções no compósito, viabilizando sua utilização na construção civil e rural.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto. Polímero. Resistência.

COMPOSITE BASED ON RECYCLED POLYPROPYLENE FOR USE IN RURAL AND CIVIL CONSTRUCTIONS

ABSTRACT: The present study aims to carry out an analysis on the physical and mechanical properties of blocks composed of sand or stone powder agglutinated by recycled polypropylene through thermal treatment aiming the implantation for masonry and/or pavements in the civil and rural construction. With the main objective of replacing water and cement in the mixture and promoting studies on the composite using such polymer as an optimizer for future applications in favor of high resistance, the research was developed based on its own methodology involving the tests of resistance to axial compression, tensile strength by diametrical compression (brazilian test), water absorption by immersion and water absorption by capillarity in which different compositions of recycled polymers and compaction loads for modification of the composite were tested for better characterization. Comparing and observing improvements in the properties of the mixture, it was found that the increase in the addition of polypropylene in the mixture resulted in greater strengths and lower absorptions in the composite, enabling its use in civil and rural construction.

KEYWORDS: Concrete. Polymer. Resistance.

1. INTRODUÇÃO

Diante do atual crescimento populacional e da escassez de recursos naturais, a busca por materiais alternativos para a construção em geral com a finalidade de reduzir custos tem aumentado. Por isso, nos últimos anos, as construções têm sido alvo da incorporação dos mais diversos tipos de materiais com a finalidade de melhorar sua produtividade e economia na construção ao mesmo tempo que beneficia suas particularidades. Além do mais, a utilização de resíduos como material alternativo tem se mostrado uma alternativa viável na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria prima e pela redução das áreas de disposição, considerando o crescente volume de resíduos descartados a cada ano em todo o mundo. No contexto dos resíduos com alto percentual de descarte está o polipropileno, amplamente aplicado na indústria de embalagens.

Existe uma grande diversidade de aplicações dos polímeros na construção civil como na perfuração de poços, no reforço de matrizes cimentícias ou na substituição dos agregados em argamassas. Quanto ao contexto agrário, são aplicados na estabilização dos solos ou na elaboração de elementos construtivos que promovam conforto e durabilidade. No entanto, na proposição da criação de produtos que incorporem elementos poliméricos deve-se levar em consideração as vantagens e desvantagens da fabricação e utilização, além da viabilidade econômica.

A produção de cimento Portland é uma das maiores causadoras de gasto energético e de emissão de materiais poluentes como o gás carbônico (CO₂), a principal causa do aquecimento global. É nesse sentido que tal substituição pelo material polimérico pode ser positiva na composição do concreto, uma vez que para sua produção são reutilizados plásticos que já foram úteis uma vez e o serão novamente como uma cadeia cíclica.

Nesse sentido, a incorporação de elementos poliméricos ao concreto, atuando como ligantes e sem adição de água, pode induzir a uma melhora nas propriedades reológicas dos blocos a serem produzidos, e ainda, diminuir a sua susceptibilidade à expansão, gerando uma maior resistência mecânica, o que é essencial para a vida útil de elementos como pisos, alvenarias de fechamento, entre outros produtos que poderão ser gerados a partir de tal mistura.

A resistência à absorção de tal mistura, uma vez que ambos os componentes são inertes e não incorporam água em sua estrutura, pode ser uma de suas propriedades mais marcantes, viabilizando sua utilização em diversos setores na construção civil que não se deseje a presença de água infiltrada. Outra propriedade que deve ser usada a favor desse novo material é o seu

isolamento termo-acústico com alta resistência térmica, permitindo aplicações contínuas com temperaturas acima dos 100 °C.

Assim, o desenvolvimento de um concreto que incorpore pó de pedra ou areia e polímero pode tornar-se uma opção de produto com características térmicas e de resistência satisfatórias que poderá ser empregado na elaboração de blocos pré-moldados para alvenaria ou pisos.

Considerada a problemática do estresse térmico animal, a necessidade do aproveitamento de resíduos e a redução do consumo energético na elaboração de produtos da construção civil, a idealização de um bloco de brita aglutinado por polímeros através de tratamento térmico à baixa temperatura pode ser um fator relevante no que diz respeito à preservação dos recursos naturais e na qualidade ambiental no meio rural. A substituição do cimento por um polímero reciclado, que viria a ser um rejeito, pode ser uma medida de redução da exploração do ambiente e gasto energético para produção do cimento, uma vez que a indústria da construção civil, em termos de potencial de devastação ambiental, só perde para a indústria de exploração de petróleo. Ou seja, trata-se de um novo material com menor devastação ambiental e menor gasto energético na produção de um compósito com propriedades e resistência compatíveis para substituição do concreto convencional em determinadas estruturas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver compósito à base de polipropileno com características físicas e mecânicas satisfatórias às construções rural e civil.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Desenvolvimento do processo de moldagem e desmolde dos corpos de prova;
- ✓ Definição do traço com areia/polímero e brita/polímero;
- ✓ Determinar energia ótima de compactação aplicada;
- ✓ Caracterização físico-mecânica do compósito polimérico.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O cimento e suas problemáticas

A resistência, durabilidade e fácil trabalhabilidade são as principais características que fazem do cimento um componente importante e tão utilizado na construção como um todo. Sua resistência à compressão, excelente módulo de elasticidade e disponibilidade por baixo custo são suas principais vantagens. No entanto, o uso do cimento Portland pode ser limitado quando sua aplicação exige alta resistência à tração, boa força de ligação ou excelente resistência em certas condições extremas de exposição.

O concreto convencional apresenta melhor resistência na compressão do que na tensão. Ductilidade limitada, baixa resistência a impacto e abrasão e pouca resistência a rachaduras. Um bom concreto deve ter alta resistência e baixa permeabilidade (FERDOUS et al., 2020). Por isso, materiais compósitos alternativos estão cada vez mais ganhando popularidade por sua boa ductilidade e encruamento – capacidade de deformar-se plasticamente abaixo da temperatura de recristalização, causando o aumento de discordâncias na estrutura e consequentemente o aumento de resistência.

Em decorrência do avanço tecnológico e desenvolvimento econômico dos últimos séculos, o crescente uso de recursos, aumento na geração de resíduos e de gases nocivos à saúde humana são algumas das consequências enfrentadas, dentre outras razões, devido ao aumento populacional. O concreto apresenta-se como um dos recursos mais utilizados na indústria da construção nos dias de hoje. Em sua composição, é utilizado um dos principais materiais associados à grande emissão do dióxido de carbono (CO₂): o cimento.

Estudos já afirmam que cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO₂ são derivadas da produção do cimento (WBCSD, 2016). Diante disto, é necessário estudar outras formas de redução das emissões além das que estão sob controle do setor cimenteiro. Uma opção seria a pesquisa de materiais alternativos que em um futuro próximo venham a substituir parcial ou totalmente a emissão de gases que colaboram com o efeito estufa e mudanças climáticas no planeta.

3.2 O que é o compósito chamado de concreto polimérico

O concreto polimérico tem sido estudado como um preparo entre a mistura de uma resina polimérica e agregados. As vantagens desse novo material quando comparado ao concreto convencional de matriz cimentícia, são sua alta resistência à compressão, flexão e tração, rápida cura, baixa permeabilidade, aumento de proteção contra a corrosão das armaduras

e alto amortecimento de vibrações (BEDI et al., 2014). No entanto, o concreto polimérico também tem suas limitações, como a falta de familiaridade com empreiteiros e o alto custo quando comparado ao concreto cimentício. Ainda assim, o concreto polimérico pode ser utilizado como um material interessante para o reparo de infraestruturas de concreto, como fundações, pontes, barragens e superfícies de pavimentos devido às suas excepcionais propriedades (BEDI et al., 2014).

Os setores da construção estão aceitando cada vez mais os materiais alternativos além da abordagem tradicionalmente conhecida. O concreto polimérico consiste em agregados ligados por uma resina no lugar do cimento. As resinas mais utilizadas para esta função são as epóxi, poliéster e éster vinílico, mas apesar do éster vinílico e poliéster serem mais em conta, as resinas epóxi são preferidas por suas excelentes características mecânicas e térmicas, maior resistência à umidade, baixa retração e alto alongamento que produzem matrizes de polímero durável e flexível (LOOS, 2014).

A principal aplicação dessa modalidade do concreto polimérico em que são manipuladas resinas para substituição do agregado, é no armazenamento de produtos químicos, porém as aplicações têm sido ampliadas incluindo pontes, reparos em rachaduras de concreto, sobreposição de pavimentos, painéis decorativos de construção e outras estruturas em ambientes de condições agressivas.

Enquanto o concreto polimérico oferece uma performance mecânica superior ao concreto de cimento Portland, seu principal desafio é o custo. O concreto polimérico é aproximadamente 5 a 10 vezes mais caro do que o concreto convencional, por isso, sua aplicação está limitada a estruturas que um desempenho mais aprimorado justifique o custo mais alto. Apesar de seu uso já em muitas aplicações na construção civil, ainda não se tem um procedimento de projeto para concreto polimérico estabelecido. A atual abordagem de seleção de proporções de mistura é aleatória ou baseada na experiência atual de concreto comum de cimento Portland (FERDOUS et al., 2020).

3.3 Os polímeros em uso no concreto polimérico

O polímero em geral foi introduzido na construção civil em usos de reparos e reabilitação de estruturas (JUNG et al., 2014). Os polímeros começaram a ser empregados com a finalidade de aumentar a resistência e a durabilidade, ser útil no acabamento de trabalhos para manutenção e reparos e desenvolver materiais de infraestrutura para a construção, como uma forma de suprir as necessidades dos usuários do concreto convencional e promover o uso de um concreto que oferece particularidades vantajosas. Para ter-se ideia da importância dos

polímeros na construção civil, estes materiais detêm seu segundo maior mercado neste setor, perdendo apenas para o de embalagens, quanto à utilização como matéria-prima (HIPOLITO et al., 2013).

O uso de resíduos de polímero como PET, policarbonato e borracha de pneus substituindo parcialmente os agregados é uma combinação gradativamente mais utilizada. López et al. (2018) fez adições de 1, 2 e 3% por peso desses polímeros reciclados e mostrou que a adição do PET provocou até 20% de melhoria na resistência mecânica da argamassa e justificou que tal melhoria se deve ao grau de cristalinidade, já que as partículas de PET demonstram maior cristalinidade do que o policarbonato e a borracha de pneus.

Enquanto que outros estudos comparam resíduos de agregados de demolição e materiais de construção de baixo custo usados na substituição de agregados ao concreto cimentício. Neste estudo, resina de poliéster não-saturada foi usada como substituição de cimento com uma porcentagem de 20, 25 e 30% para produzir esse concreto polimérico. Os resultados mostraram que todas as propriedades mecânicas melhoraram com o aumento na porcentagem de polímero adicionado na mistura enquanto a densidade foi reduzida (HAMEED; HAMZA, 2019).

Moodi et al. (2018) investigou a performance de um concreto polimérico contendo resina poliéster e resina epóxi em proporções de 10 e 20% de poliéster e 10% de resina epóxi por peso dos agregados. Os resultados mostraram que selecionando os tipos apropriados em porcentagens ótimas de materiais poliméricos, maiores resistências à compressão, tensão e flexão resultarão quando comparados ao concreto convencional. Sua resistência ao congelamento e descongelamento e à abrasão também foi aprimorada, e tanto a retração quanto a permeabilidade foram reduzidas pela adição de materiais poliméricos apropriados em porcentagens ótimas.

Assim como diversos estudiosos, Sosoi et al. (2018) também analisou a ação de uma resina epóxi unindo as partículas em um concreto polimérico utilizando agregados como cinza volante, garrafas PET (polietileno tereftalato) picadas e serragem de madeira. Densidade e resistência à compressão foram experimentalmente determinadas e os resultados mostraram que os resíduos utilizados como substituição nos agregados, diminuiram a densidade do concreto polimérico, indicando um concreto mais leve em todas as misturas. Enquanto que os valores da resistência à compressão foram perto dos valores da mistura de controle. Em contrapartida, Zanvettor et al. (2019) em estudo similar, observou que os valores de resistência à flexão foram maiores para o concreto polimérico com a serragem de madeira do que para o PET picado; e

para ambos os casos, os resultados da resistência à tração foram maiores do que para a mistura de controle.

A produção de compósitos poliméricos constituídos por materiais de baixa densidade e ultra-leves além de baixa condutividade térmica vem sendo estudada e avaliada como possíveis substituintes de materiais como blocos de fechamento em construções, uma vez que tais materiais podem diminuir a perda de energia dentro dos edifícios, não liberariam fumaça tóxica quando em condições de incêndio, e ainda são um recurso totalmente renovável e sustentável, considerando serem utilizados materiais como a cortiça expandida, o que seria um compósito polimérico inorgânico (NOVAIS et al., 2019). Neste tipo de substituição, observa-se que materiais alternativos e que propõem uma tecnologia com a vertente ecologicamente correta, estão cada vez mais ganhando espaço no mercado e contribuindo para atingir as metas de desenvolvimento em relação à energia e às mudanças climáticas. Assim também o é quando se fala em substituição do cimento Portland como ligante nas estruturas de concreto por ligantes poliméricos termoplásticos reciclados.

3.4 O Polipropileno

Os polímeros em geral são especificados mecanicamente através de muitos dos mesmos parâmetros usados para os metais: o módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração e as resistências ao impacto e à fadiga. O módulo de elasticidade dos polímeros varia de 48 a 410 GPa, o limite de resistência à tração é cerca de 4,1 GPa e alongamento de 1000% (HIPOLITO et al., 2013).

Já dentre as propriedades químicas mais importantes estão a resistência à oxidação, ao calor, às radiações ultra-violeta, à água, a ácidos e bases, a solventes e reagentes (MANO, 2000).

Além das propriedades térmicas que caracterizam os polímeros como termoplásticos ou termofixos e das transições térmicas dos polímeros, pontos importantíssimos na escolha dos materiais adequados para a aplicação como materiais de engenharia, destacam-se a baixa condutividade térmica e altos coeficientes de dilatação térmica linear quando comparados a materiais não poliméricos, quatro a cinco vezes maiores (MANO, 2000).

O polipropileno, mais especificamente, é um polímero de baixa densidade com um ponto de amolecimento relativamente elevado, resistente quimicamente, de fácil moldagem e coloração, resistente ao impacto, de boa estabilidade térmica, atóxico, resistente à flexão e baixa absorção de umidade.

Diante de tais vantagens, diversas aplicações do polipropileno reciclado na construção já vêm sendo praticadas, dentre elas as telhas de polipropileno (PP), que fazem parte de uma nova tecnologia que está sendo produzida em coberturas a partir de polímeros, e que consiste num sistema de módulos com encaixes, formadas por agrupamentos de até seis telhas de PP, reproduzidas com o mesmo design de telhas tradicionais (HIPOLITO et al., 2013).

O polipropileno já vem sendo adicionado ao concreto por muito tempo, porém na forma de fibra reforçando o concreto como substituinte de parte do agregado na mistura. A fibra de polipropileno reduz a permeabilidade de água, a retração e a profundidade de carbonatação; eleva a resistência à compressão, à tração e flexão do concreto, além do aumento no módulo de elasticidade, quando comparado ao concreto convencional (MADHAVI et al., 2014). Por esse motivo, acredita-se que além de utilizado como agregado, o polipropileno tem eficiência e competência para atuar também como ligante na mistura do concreto, no lugar do cimento agindo como o elemento aglutinador entre as partículas.

3.5 A reciclagem do resíduo do polipropileno

Atualmente está sendo dada muita ênfase à preservação e conservação do meio ambiente como forma de garantir um desenvolvimento sustentável. Entre os diversos danos causados ao meio ambiente, um está relacionado com os resíduos plásticos. Esses resíduos em geral, levam muito tempo para sofrerem degradação espontânea e, quando queimados, produzem gases tóxicos. Os polímeros correspondem a 8% em massa do resíduo sólido urbano e 20% em volume deste mesmo universo segundo Agnelli e Gallo (1998).

O desenvolvimento sustentável é uma grande preocupação global para o meio ambiente em muitos países e tem recebido atenção considerável na última década. É urgente desenvolver uma estratégia de eliminação adequada para vários tipos de resíduos como plásticos, pneus, borracha e vidro. Perante isso e visando reduzir o descarte dos polímeros reciclados é conveniente que estes sejam utilizados em aplicações de longa vida útil, como pavimentação, madeira plástica, construção civil, plasticultura, indústria automobilística e eletroeletrônica, etc.

O polipropileno (PP) é um polímero de características termoplásticas, ou seja, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecido a temperaturas adequadas, esse plástico amolece, funde e pode ser novamente moldado. Atualmente, esse resíduo é amplamente utilizado em embalagens, que com o tempo se tornam lixo. Por isso, esse produto tem se tornado o centro das atenções na reciclagem, uma vez que respeita os três pilares da sustentabilidade e se transforma em um recurso de extensa

utilidade, tanto em novas embalagens, como funcionando como aditivos em materiais de construção conferindo melhorias nas propriedades dos mesmos e tornando mais viável economicamente o seu uso. Além de ser um polímero com características bastante atrativas ao mercado da construção civil, uma vez que possui elevada resistência química e a solventes, é de fácil moldagem e fácil coloração, possui alta resistência à fratura por flexão ou fadiga, boa resistência ao impacto e boa estabilidade térmica.

Embora apresentadas diversas vantagens para utilização do polímero na construção civil, em relação à sustentabilidade do ambiente construtivo, uma preocupação deve ser a origem dos polímeros, que em sua grande maioria está no petróleo, uma fonte de matéria-prima não renovável. Esta preocupação aumenta à medida que o petróleo se torna cada vez mais escasso no mercado, as reservas mundiais diminuem, e o consumo aumenta. Entretanto, o petróleo continuará sendo a principal fonte de matéria-prima para geração de polímeros por muitos anos (HIPOLITO et al., 2013). Ainda assim, tal material pode ser amplamente aproveitado quando reutilizado. Seu destino final pode ser modificado. Ao invés de ser descartado ao meio ambiente e deixado por anos degradando e poluindo, pode ser reutilizado para as mais diversas utilidades. Portanto, fala-se agora não apenas de um concreto polimérico, mas também de um concreto utilizando o polímero reciclado.

Além do mais, está cada vez mais em alta estudos utilizando diferentes materiais resíduos que viriam a ser lixo, favorecendo um destino final mais nobre para tais materiais. É o caso de estudos como o de Bulut e Sahin (2017), que analisou as propriedades mecânicas do concreto polimérico contendo lixo plástico eletrônico. O estudo mostrou que o aumento na proporção de resina aumentou a resistência à compressão, porém não afetou de forma significativa a resistência à tração e flexão. Eles concluíram que a proporção ideal de resina na mistura e plástico eletrônico é de 15% e 5%, respectivamente.

3.6 Estudos e Aplicações de resíduo de polipropileno em compósitos

As fibras de polipropileno têm sido usadas como reforço secundário no concreto. Na maioria dos casos, as frações de volume das fibras de polipropileno para esta aplicação variaram de 0,1% a 0,5%. Esta substituição foi considerada benéfica na redução de trincas por contração e na melhoria da resistência ao impacto do concreto (TOUTANJI et al., 1998).

Neste estudo, a incorporação de fibras de polipropileno aumentou a permeabilidade do concreto simples. Isso é atribuído ao fato de que as fibras de polipropileno aumentam o teor de vazios no concreto liso devido à falta de coesão da matriz de cimento e à baixa dispersão das

fibras. Com o aumento do comprimento da fibra de 12,5 mm para 19 mm, as amostras exibiram um aumento na permeabilidade.

Em um estudo de qual seria a máxima melhoria nas propriedades mecânicas do concreto utilizando uma porcentagem ótima de fibras de polipropileno substituindo na quantidade por volume de cimento da mistura, Sohaib et al. (2018) encontrou que 1,5% seria a proporção ideal no que se refere às propriedades de resistência à compressão e tração. O “cimento polimérico” utilizado pelo autor com a adição das fibras de polipropileno é empregado como um complemento de ligante no trabalho da aglutinação. Tal indício aponta o polipropileno como um material com características adequadas para agir como ligante na mistura desses tipos de compósitos, ainda que esteja agindo apenas como uma fibra juntamente com a ação do cimento, obtido sem a necessidade do aquecimento da mistura.

Hossain et al. (2019) inferiu que a resistência à compressão, a resistência à tração de ruptura e a resistência à flexão diminuem à medida que o conteúdo de borracha aumenta, mas aumentam com o acréscimo do conteúdo de fibra de polipropileno. No que diz respeito à dureza e ductilidade, o efeito da fibra de polipropileno é maior quando comparado aos outros testados: agregado reciclado de concreto e a borracha granulada. Observa-se também que as vigas com fibra apresentaram falha de maneira mais gradual, o que se torna positivo em uma construção de concreto.

No entanto, muitos estudos acerca do concreto polimérico utilizando as mais diversas resinas na substituição dos agregados foram desenvolvidos. Mas poucos estudaram a interação entre o agregado e o polímero reciclado, como substituição do cimento na matriz. A utilização de um resíduo que poderia estar sendo descartado no meio ambiente pode ser uma alternativa viável para a confecção de um novo concreto polimérico com uma visão mais sustentável e mantendo suas propriedades físicas e mecânicas satisfatórias à aplicação na construção civil, como também em outras finalidades mais nobres.

3.7 A areia como agregado

Os agregados para a composição de um concreto convencional são materiais minerais sólidos e inertes que gerarão produtos artificiais mais resistentes, não interferindo no endurecimento e hidratação do cimento e também na proteção contra a corrosão da armadura. A porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e resistência à compressão são algumas das características relevantes do agregado para a composição do concreto.

No concreto batizado de polimérico não seria diferente. Agregados que componham a mistura de forma a unir os componentes e estruturar uma massa resistente e uniforme é o

objetivo do constituinte. Por isso, a areia de origem natural tem suas vantagens, como a transmissão de tensões aplicadas ao concreto através dos grãos e a redução de efeitos de variações volumétricas ocasionadas pela retração.

3.8 O pó de pedra como agregado

Quando se fala em concreto pensa-se na utilização de brita como agregado graúdo e areia e filler para agregado miúdo. Porém, o pó de pedra é um rejeito da exploração de pedreiras e seu diâmetro máximo é inferior a 4,8 mm. Em função de sua curva granulométrica, pode-se caracterizá-lo como sendo uma areia média. Atualmente, o pó de pedra não possui valor comercial de mercado, que não possui uma destinação definida, permanecendo estocado nos pátios das pedreiras, formando enormes pilhas que provocam vários impactos ambientais.

Diante de tais evidências, a necessidade de adoção de materiais alternativos que supram a carência na resistência à tração na construção, assim como materiais que não sofram tanto o efeito das variações térmicas e do contato com a água, além da utilização de um agregado que terá um destino final adequado, se tornam incontestáveis e chamam a atenção para o desenvolvimento de novas tecnologias em torno da construção como um todo.

Pesquisas mostram que a distribuição dos agregados deve permitir um volume vazio mínimo na mistura, o que resultará em um denso empacotamento. O denso empacotamento de agregados na matriz de concreto polimérico resulta em melhores propriedades. Para conseguir isso, o conteúdo vazio da mistura pode ser minimizado, enquanto o aglutinante, por conseguinte será em menor proporção; ou usar uma mistura de agregados fracamente compactada com uma quantidade maior de ligante. Como exemplo, tem-se o estudo de Jafari et al. (2018) que verificou que aumentando o tamanho dos agregados graúdos e a proporção de polímeros, a porosidade dos corpos de prova foi reduzida. Isto é atribuído à área superficial reduzida em relação ao volume com o aumento do tamanho das partículas, o que permitiu ao polímero revestir completamente a superfície dos agregados.

3.9 A metodologia de moldagem dos corpos de prova

Em geral, a moldagem dos corpos de prova nesse tipo de estudo se dá pela utilização do misturador de concreto, em que todos os componentes são adicionados e misturados simultaneamente ao passo que no final, a massa de concreto esteja homogênea (SONG et al., 2005; HSIE et al., 2008). Outros estudiosos realizaram parte de sua mistura manualmente para depois incluir todos os componentes no misturador mecânico e finalizar a moldagem dos corpos

de prova para a pesquisa (HOSSAIN et al, 2019). Enquanto outros fizeram de forma totalmente manual (MOHEBI et al., 2019).

Wang et al. (2019) fez sua mistura de forma separada utilizando ferramentas elétricas simples de misturador por tempo controlado estabelecido, em que todos os componentes foram pesados antes da mistura e devidamente separados de acordo com as proporções previamente determinadas. Os elementos que agem como ligantes na misturam foram adicionados primeiro enquanto os agregados foram colocados por último, e finalmente homogeneizados para compor os corpos de prova do estudo.

Outros projetos utilizaram metodologias de confecção dos corpos de prova envolvendo temperaturas elevadas para a fusão do ligante polimérico. O polímero derrete em meniscos localizados nos contatos das partículas, e solidifica após o resfriamento, tornando o solo cimentado (ROMERO et al., 2018; MIRANDA et al., 2017).

Compactação na moldagem também pode ser um recurso utilizado para aperfeiçoamento na acomodação das partículas, proporcionando um compósito mais homogêneo e uniforme, viabilizando a melhoria nas suas propriedades físicas e mecânicas.

A compactação estática ou por pressão baseia-se em aplicar uma pressão sobre o solo de forma uniformemente distribuída, sendo mais empregado para reproduzir em laboratório as características dos solos granulares compactados em campo, em particular rolo liso (BALMACEDA, 1991). Este método consiste em compactar cada camada com uma prensa, aplicando uma pressão determinada durante um certo tempo.

Diversas metodologias de misturas dos componentes e moldagem dos corpos de prova existem e podem ser adaptadas de acordo com a necessidade do estudo, desde a manual até a mais sofisticada. Além do mais, um estudo mostrou que misturas feitas à mão para concreto polimérico não requer vibração para sua fabricação para obter-se boa compactação e propriedades consistentes (FERDOUS et al., 2020).

3.10 Impactos Ambientais

A produção do cimento ainda é a 7ª atividade industrial que mais consome energia. Seus impactos ambientais iniciam-se já com a mineração da rocha calcária e a queima de combustíveis fósseis, liberando gases de carbono, já mostrando as primeiras agressões ao meio ambiente. Sem falar nas etapas de industrialização, embalagem, transporte e consumo do cimento, que envolvem ainda mais gasto de recursos naturais, energia elétrica, gerando efluentes, resíduos sólidos e gases causadores do efeito estufa. Tais indícios justificam a

crescente busca por novos materiais que venham a substituir o cimento parcial ou completamente na elaboração do concreto e novos materiais de construção sustentáveis.

As novas propostas de materiais para a composição do concreto ‘são mais verdes do que cinza’, segundo estudiosos da área da revista Forbes, em que destacaram três novas tecnologias possíveis de concreto. A primeira seria o chamado cemfree, ou seja, livre de cimento, em que o concreto seria substituído por resíduos de forno de alta temperatura, diminuindo drasticamente a produção do dióxido de carbono. Constatou-se que se o edifício Empire State tivesse sido produzido com o cemfree, teria sido prevenida a produção de mais de 13 mil toneladas de CO₂.

Outra inovação na área dos materiais de construção é o Taktl, que produz menos CO₂, pois utiliza menos água e é mais resistente, o que significa que é necessário menos deste material para alcançar a mesma resistência do concreto tradicional.

Por fim, o concreto bioreceptivo seria uma tecnologia que ainda requer um núcleo estrutural de concreto, porém sobre ele existe uma série de camadas que propiciam o crescimento de musgos e líquen, se mostrando como uma alternativa viável à substituição do concreto em determinadas aplicações onde a estética seja priorizada. Similar ao concreto bioreceptivo, estudos apresentam o bio-blocks (JAVADI et al., 2018; BERNARDI et al., 2014), onde o processo de cimentação envolve a introdução de bactérias e nutrientes na areia e, através de processos bacterianos, a precipitação de calcita une as partículas, criando um material de arenito, que pode ser comparável em termos de tensão e rigidez aos tijolos preparados com os aditivos de cimento e cal hidráulicos mais convencionais.

3.11 Aplicações

O concreto polimérico também tem sido amplamente utilizado em reparos rápidos no pavimento rígido e em estruturas. Jafari e Toufigh (2017) analisaram o comportamento mecânico de um concreto polimérico emborrachado com borracha fracionada e lascada substituindo agregado fino e gráudo no compósito, respectivamente. Os resultados indicaram que o concreto polimérico emborrachado reduziu a trabalhabilidade, mas ampliou a porosidade na mistura, reduzindo o custo e a densidade, e aumentando a ductilidade do compósito.

Outras vertentes de concretos poliméricos têm sido propostas e amplamente pesquisadas, como é o caso de um novo tipo de bloco de concreto polimérico inteligente adicionando escória de grafite e aço no concreto de resina epóxi para testar as características sensíveis à pressão sob compressão uniaxial. Os resultados mostraram que a resistência do

concreto com grafite complexo e escória de aço aumenta com a elevação da deformação sob compressão uniaxial (DING et al., 2019).

Concretos baseados em resinas epóxi tem sido amplamente utilizados em reparo de concreto ou camadas de revestimento para pavimentos devido às suas propriedades mecânicas e de durabilidade (XIAO et al., 2009). Wang et al. (2019) estudou a adição de borracha de pneus no concreto baseado em resina polimérica, onde o cimento portland convencional é totalmente substituído pela resina para estabelecer a estrutura com o agregado. Diversos tipos diferentes de ligantes poliméricos são amplamente usados para a mistura no concreto polimérico, como o poliéster-estireno, acrílicos e epóxi. O polipropileno é, portanto, novidade nessa utilização, com a vantagem de ser um termoplástico, que utiliza o calor para sua modelagem e remodelagem, podendo ser reciclado várias vezes. Já as resinas poliésteres, fenólicas e epóxi, são solidificadas com aplicação de calor e não amolecem mais, pois o aumento da temperatura promove a decomposição desses materiais antes de sua fusão, tornando-se não recicláveis mecanicamente.

Do mesmo modo, outros estudiosos escolheram adicionar o polímero ao cimento na mistura formando uma meta-estrutura de concreto com a finalidade de melhorar o desempenho de amortecimento promovendo a redução do ruído de rolamento no pavimento (AHN et al., 2019). Os efeitos sobre a melhoria do desempenho de amortecimento devido à estrutura do polímero foram investigados e constatou-se que a radiação do ruído rolante foi reduzida efetivamente.

3.12 Propriedades do concreto polimérico

As propriedades do concreto polimérico, tanto físicas como mecânicas, diferem muito dependendo das condições de preparo. Para determinado tipo de concreto polimérico, as propriedades dependem da porcentagem e tipo de polímero utilizado, da distribuição granulométrica dos agregados, da técnica utilizada para realização da mistura, dentre outras variáveis.

3.12.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é a técnica termoanalítica que acompanha as mudanças do calor na amostra, durante o aquecimento ou resfriamento, em relação a um material de referência inerte. Medindo-se o calor liberado ou absorvido, várias propriedades podem ser determinadas e utilizadas para caracterizar uma determinada amostra. Entre essas propriedades importantes utilizadas para caracterizar polímeros, a transição vítrea,

picos de cristalização e de fusão podem ser determinadas a partir de curvas DSC (BANNACH et al., 2011).

3.12.2 Absorção de água por capilaridade e imersão

Um bom concreto deve possuir alta resistência e baixa permeabilidade. Nos estudos recentes nota-se uma busca por materiais que atendam a essas especificidades, em especial a busca por baixa absorção de água, seja por capilaridade ou por imersão.

Centofante e Dagostini (2014) em sua pesquisa sobre adição de fibras de polipropileno na produção de argamassas, constatou que a adição da fibra ajuda a diminuir os valores de absorção de água. O autor explica que este comportamento está relacionado a diminuição da porosidade, o que torna a argamassa menos permeável.

Wang et al. (2019) estudando o comportamento de concreto polimérico com a adição de resina epóxi e borracha triturada, obteve uma absorção por imersão máxima de apenas 0,232%, corroborando com a ideia de que o concreto quando modificado com elementos poliméricos, pode melhorar ainda mais suas propriedades físicas e mecânicas, como será visto mais na frente.

Küçük et al. (2019) também obteve o resultado de menor porcentagem de absorção de água quando a quantidade de polímero polietileno dopado com carbonato de cálcio ou polipropileno dopado com fibra de vidro aumentou no concreto.

3.12.3 Índice de vazios

O índice de vazios é definido como a razão do volume de poros pelo volume ocupado pelos sólidos no corpo. Portanto, a absorção de água está diretamente ligada ao índice de vazios nos corpos de prova de concreto modificados por polímero, indicando que igualmente o concreto polimérico também apresentará um baixo índice de vazios, uma vez que o polímero fará esse papel de ocupar os vazios existentes, assim como no trabalho de Küçük et al. (2019), em que não foram encontrados vazios nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, o que ele justifica como sendo a razão do resultado da alta resistência à compressão no compósito.

3.12.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante do concreto, pois é uma medida qualitativa do mesmo. A falha do concreto sob compressão é uma mistura de falha de esmagamento e cisalhamento. A resistência à compressão de um compósito varia

em função do ligante e das fibras, pois quanto maior a relação de aglutinante, maior será a resistência à compressão proporcionada.

No estudo de Wang et al. (2019) em que o concreto polimérico é modificado com resina epóxi e partículas de borracha, a resistência à compressão aumentou 9,1% comparada aos corpos de prova de controle. Já Küçük et al. (2019) obteve uma melhoria de 147,99% na resistência à compressão quando comparado com o concreto de referência utilizando 30% de polipropileno no lugar de cimento convencional.

Os resultados de Hameed e Hamza (2018) mostram também o aumento na resistência à compressão com o aumento da porcentagem de resina polimérica, pois utilizando 30% de resina de poliéster e 70% de agregado vindo de resíduos cerâmicos a resistência ultrapassou 130 MPa, valor bem acima quando comparado aos corpos de prova preparados de cimento Portland convencional.

Análises com fibras de polipropileno em concretos poliméricos de cinzas volantes e agregados graúdos mostraram que a resistência à compressão aumentou gradualmente de acordo com a adição da fibra de polipropileno de 0,15% a 0,3% (MURAHARI; RAO, 2013). Ao passo que Anbuvelan et al. (2007) verificou um aumento de 4% a 17% na resistência à compressão dos compósitos quando adicionados de fibras de polipropileno, enquanto que Patel et al. (2012) determinou que a proporção ideal de fibra de polipropileno no concreto deveria ser de 1,5% para melhorar a resistência à compressão, tração e flexão do mesmo.

3.12.5 Resistência à tração por compressão diametral

A tração indireta, como assim é conhecida, determina o valor que o compósito suporta sem se romper através de compressão aplicada diametralmente. Em pesquisas como a de Wang et al. (2019), as amostras modificadas com resina epóxi e adicionadas de 5% de borracha mostraram 8% de aumento na resistência à tração comparando-se com os corpos de prova de controle. Ferdous et al. (2020) concluiu que as propriedades mecânicas do concreto polimérico são diretamente influenciadas pela razão matriz-agregado, pois as propriedades de tração, flexão e ductilidade são dependentes do teor de resina no concreto. Ferdous et al. (2020) culminou que a resistência à tração do concreto polimérico é mais de 2 vezes maior que o concreto convencional de cimento Portland devido às melhores características de ligação entre a matriz e agregados.

Hameed e Hamza (2018) mostraram o aumento dos valores da resistência à tração de ruptura com o aumento da porcentagem de resina de polímero adicionada a todos os tipos de agregados testados. Percebe-se que o valor máximo da resistência à tração de ruptura em se deu

em 30% do poliéster e o valor mínimo em 20%. Isto significa que o aumento da proporção adicionada do polímero leva a aumentar o valor da resistência à tração, além de serem valores maiores que os valores para concretos convencionais de cimento Portland.

Gencil et al. (2011) estudando a resistência à tração de compósitos com fibras de polipropileno verificou que a resistência aumentou com o aumento do teor de fibras na mistura, pois as fibras tendem a diminuir as microfissuras e dificultam a sua propagação. Quando o estresse elástico é transferido para as fibras, as microfissuras são retidas e, assim, melhoram a resistência à tração do concreto.

Sohaib et al. (2018) observou que ao se adicionar fibras de polipropileno substituindo o cimento ligante na mistura, houve um aumento de até 17% na resistência à tração desses compósitos, por isso a porcentagem ótima de fibra de polipropileno obtida foi de 1,5% do teor de cimento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este tópico apresenta a descrição do programa experimental empregado para a avaliação do desempenho de compósitos à base de polipropileno reciclado.

4.1 Metodologia Experimental

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA) localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – PB. Para tanto, o programa experimental figura-se em coletar e caracterizar o material, a interação entre os materiais, a produção dos compósitos e caracterização das propriedades. Foram produzidos compósitos nas proporções de 10%, 20% e 30% de polímero na mistura e pressões de compactação de 250 kPa, 500 kPa e 750 kPa. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas do projeto.

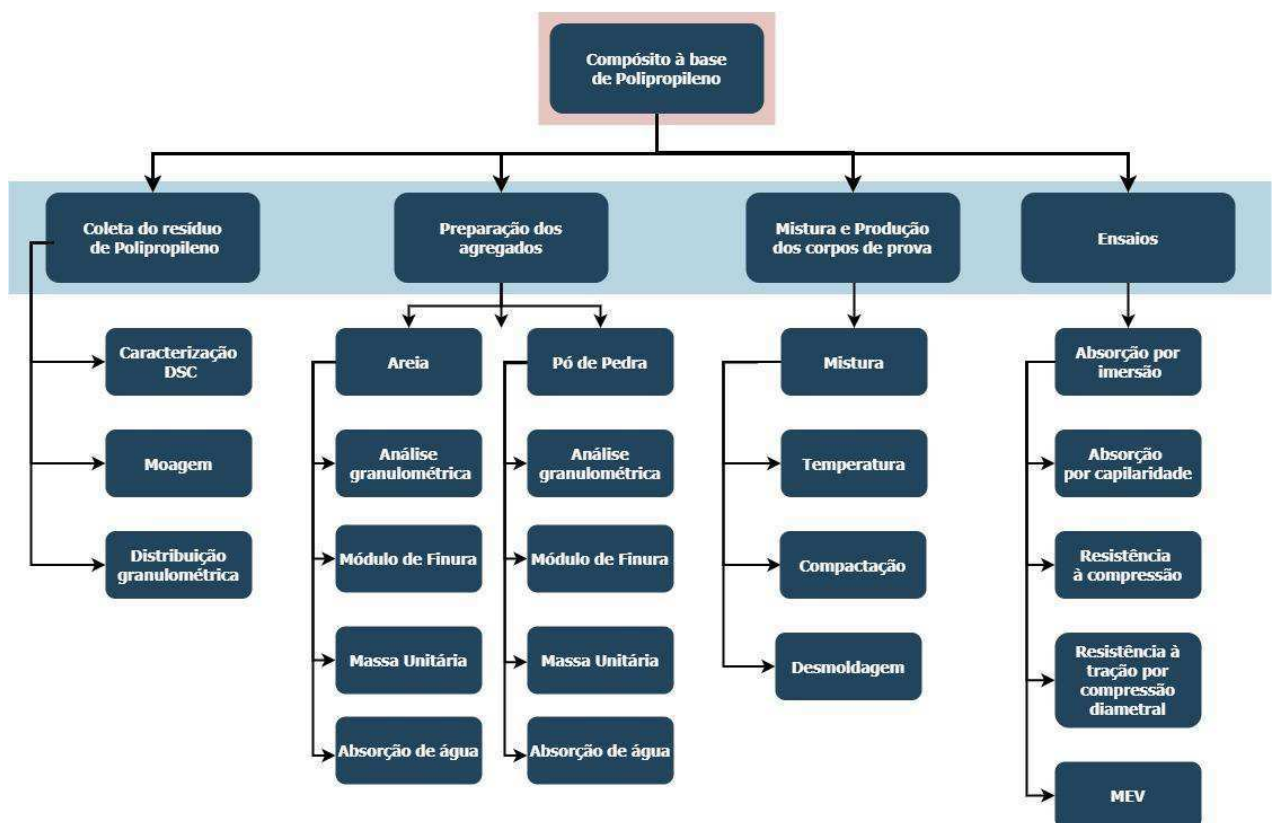


Figura 1. Fluxograma das etapas do projeto

Foi utilizado o planejamento experimental estatístico fatorial 2^2 , totalizando 4 experimentos mais 3 no ponto central. O planejamento experimental foi executado com três repetições e analisado estatisticamente utilizando-se o programa Statistica 5.0, da StatSoft, em

um nível de confiança de 95%. O planejamento fatorial e os valores reais e codificados das variáveis independentes estudadas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores reais e codificados das variáveis independentes

Variáveis independentes	Níveis		
	-1	0	+1
Teor de polímero - PP (%)	10	20	30
Carga de compactação - CC (kPa)	250	500	750

Na Tabela 2 está apresentada a matriz que descreve os experimentos.

Tabela 2. Matriz delineamento do planejamento experimental estatístico fatorial

Ensaio	Nomenclatura	X ₁	X ₂	Valores codificados	
				PP (%)	CC (kPa)
1	10_250	-1	-1	10	250
2	30_250	+1	-1	30	250
3	10_750	-1	+1	10	750
4	30_750	+1	+1	30	750
5	20_500_1	0	0	20	500
6	20_500_2	0	0	20	500
7	20_500_3	0	0	20	500

4.2 Materiais

4.2.1 Coleta do resíduo de Polipropileno e dos agregados

Foi realizada a coleta do resíduo de polipropileno na empresa PLASVAN situada no distrito industrial em Campina Grande – PB. Foram doados cerca de 20 kg do material no formato “macarrão cortado”. Proveniente do derretimento de materiais plásticos de embalagens, tampas e rótulos, o polímero é reaproveitado pela empresa para a fabricação de baldes para armazenamento de manteigas, tintas, entre outras utilidades.

O pó de pedra foi obtido do Mutirão e a areia média natural do leito do rio Taperoá.

A Figura 2 a seguir apresenta os materiais utilizados na pesquisa para a composição da mistura para a elaboração do concreto polimérico/ compósito.



Figura 2. Polímero, areia e pó de pedra utilizados na pesquisa, respectivamente

4.2.2 Moagem do polímero

O polímero foi disponibilizado pela empresa em formato granular, de tamanho desproporcional em relação aos agregados utilizados. Por isso, foi necessária sua moagem em um moinho de facas (Figura 3), cedido pelo Laboratório de Armazenamento na Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Campina Grande – PB. Após ser triturado, o polímero ficou em formato lamelar, sendo possível a homogeneidade da mistura e melhor manipulação do mesmo.



Figura 3. Moinho de facas utilizado para moagem do polímero

4.2.3 Caracterização dos materiais para produção dos compósitos

Para a caracterização do polímero em uso no trabalho, optou-se por utilizar a calorimetria exploratória diferencial (DSC) para determinação da temperatura de fusão do material e posterior definição de qual polímero se trata especificamente e a que temperatura deve-se manipulá-lo para melhor trabalhabilidade no experimento desejado. Além de sua caracterização termoanalítica, também foi possível observar sua distribuição granulométrica em uso no compósito.

Quanto aos agregados utilizados, optou-se por utilizar a distribuição granulométrica, a massa unitária e absorção dos agregados para melhor escolha e análise dos agregados.

4.2.3.1 DSC

As propriedades térmicas do material foram determinadas usando-se calorimetria exploratória diferencial (DSC-PT10, LINSEIS GmbH, Selb, Alemanha). Para tal, 10 mg de material foram colocados em um cadinho de alumínio, e um varrimento entre 25°C a 220°C. Foi realizado a uma taxa de 10°C/min, com nitrogênio como gás de arraste. Os termogramas foram analisados com o software do equipamento tendo-se determinado a temperatura de transição vítrea, a temperatura de fusão cristalina e a entalpia de fusão. A análise termoanalítica foi realizada no Laboratório da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

4.2.3.2 Distribuição Granulométrica

A caracterização granulométrica da areia, do pó de pedra e do resíduo de polipropileno em estudo foi realizada com base nas normas NBR 7211 (2009) e NBR NM 248 (2003), realizada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente. Determinou-se o diâmetro máximo da partícula e o módulo de finura, em que a amostra foi submetida à secagem por estufa com temperatura aproximada de 105°C.

O conjunto de peneiras utilizadas correspondem às malhas da série normal de 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, com fundo coletor e tampa, de acordo com NBR já citada (Figura 4). Foi calculada a porcentagem dos materiais retidos e acumulados em cada peneira.



Figura 4. Conjunto de peneiras e mesa vibratória utilizadas na análise granulométrica

O módulo de finura foi calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de cada material estudado, nas peneiras da série normal, dividida por 100, com aproximação de 0,01.

As dimensões máximas características correspondem à abertura nominal, em mm, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual cada material apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

4.2.3.3 Massa Unitária

A massa unitária dos agregados utilizados foi obtida através de métodos descritos na NBR NM 45 (2006), onde a mesma foi determinada através da razão da massa do agregado contida em um recipiente de acordo com a norma e o volume desse recipiente, conforme Figura 5 e Equação 1.



Figura 5. Ensaio de massa unitária dos agregados

$$\text{Massa unitária} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Onde:

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r = massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V = volume do recipiente, em metros cúbicos.

4.2.3.4 Absorção de água

A absorção é o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, expressa em porcentagem de sua massa seca e foi determinada pela norma NBR NM 30 (2001), conforme Figura 6 e Equação 2 a seguir.



Figura 6. Ensaio de absorção dos agregados

$$\text{Absorção de água dos agregados} = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca, em gramas;

m = massa da amostra seca em estufa, em gramas.

4.3 Procedimento Experimental

Inicialmente foram definidas as proporções de polímero para compor os “traços” do compósito, sendo 10%, 20% e 30% em massa de polímero no agregado apresentando-se como o mais favorável levando em consideração a trabalhabilidade e melhor homogeneidade da mistura em sua composição. Essa substituição só foi possível após obter os dados do teste de granulometria, que apresentou em qual peneira houve a maior concentração de material, viabilizando a melhor combinação do polímero em meio ao agregado.

A partir do ensaio de DSC, conhecendo-se a temperatura de pico da fusão do polipropileno em estudo e o tempo que leva até essa fusão acontecer, foi estipulada a temperatura ideal de cozimento do corpo de prova e o tempo necessário para que o polímero derreta e preencha os vazios ao mesmo tempo em que envolve todos os grãos de areia ou pó de pedra da amostra.

Posteriormente foi estabelecida a energia de compactação desejada tomando como base os valores na literatura. Portanto, a carga de compactação por pressão foi determinada com valores de 250 kPa, 500 kPa e 750 kPa.

A Tabela 3 mostra o tipo de agregado, a quantidade de polímero, as cargas de compactação e as nomenclaturas adotadas dos corpos de prova na pesquisa, lembrando que tal metodologia seguiu o planejamento experimental fatorial $2^2 + 3$ pc.

Tabela 3. Nomenclatura adotada para as amostras na pesquisa

Tipo de Agregado	% Polímero	Carga de compactação	Nomenclatura
Areia	10%	250 kPa	Areia_10_250
Areia	30%	250 kPa	Areia_30_250
Areia	10%	750 kPa	Areia_10_750
Areia	30%	750 kPa	Areia_30_750
Areia	20%	500 kPa	Areia_20_500_1
Areia	20%	500 kPa	Areia_20_500_2

Areia	20%	500 kPa	Areia_20_500_3
Pó de Pedra	10%	250 kPa	Pó de Pedra_10_250
Pó de Pedra	30%	250 kPa	Pó de Pedra_30_250
Pó de Pedra	10%	750 kPa	Pó de Pedra_10_750
Pó de Pedra	30%	750 kPa	Pó de Pedra_30_750
Pó de Pedra	20%	500 kPa	Pó de Pedra_20_500_1
Pó de Pedra	20%	500 kPa	Pó de Pedra_20_500_2
Pó de Pedra	20%	500 kPa	Pó de Pedra_20_500_3

A nomenclatura adotada para os compósitos foi de ‘Areia’ quando composto pelo agregado areia e ‘Pó de Pedra’ quando composto pelo agregado pó de pedra. Após a primeira palavra que indica qual agregado é utilizado para compor o compósito em questão, é colocado o número que representa o teor de polipropileno em porcentagem. Em seguida, é acrescentado o número que indica a carga de compactação utilizada para moldar aquele corpo de prova. Como todo o planejamento experimental foi executado com três repetições, o último número sempre será destinado a apontar de qual repetição se trata. Por exemplo: Areia_30_750_3 representa um corpo de prova com o agregado Areia, 30% de polipropileno na mistura, 750 kPa de carga de compactação e faz parte da terceira repetição. Já o código Pó de Pedra_20_500_2_1 representa um corpo de prova feito com o agregado pó de pedra com 20% de polipropileno, 500 kPa de carga de compactação em sua moldagem, e é o segundo ponto central da primeira repetição, e assim sucessivamente.

4.4 Produção dos Corpos de Prova

Após elaboração dos testes com diferentes proporções de materiais, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Figura 7). Dado que o produto visado neste trabalho ainda não foi difundido e trata-se de um projeto inovador, até então não existe uma normatização para a moldagem dos corpos de prova de concreto polimérico em que não há cimento e o elemento aglutinador é o próprio polímero. Por isso, uma metodologia própria foi elaborada nessa etapa do trabalho.



Figura 7. Corpos de prova elaborados na pesquisa

Uma vez determinada as proporções, cargas de compactação, temperatura de fundição do polímero e quantos corpos de prova seriam produzidos de acordo com o planejamento experimental, uma metodologia inovadora seria necessária para misturar os componentes, de forma que derretesse o polipropileno, envolvendo todas as partículas dos agregados, seja areia ou pó de pedra, de maneira que ao endurecer em temperatura ambiente e com a presença de uma pressão que compactasse a mistura, o corpo de prova pudesse ser desmoldado sem a presença de segregação de algum componente, vazios, marcas superficiais ou quebradiço. Para isso, um equipamento (Figura 8) foi arquitetado e construído para melhor aquecimento do polímero, mistura e constituição do produto final: o concreto polimérico sem a utilização de cimento ou água.

A moldagem e compactação dos corpos de prova foi feita através de prensagem e aquecimento em maquinário próprio desenvolvido pelos pesquisadores do Laboratório de Construções Rurais e Ambientais (LaCRA). O maquinário apresenta a configuração de uma injetora manual onde, simultaneamente, a temperatura e a ação da gravidade fazem com que o polipropileno funda e aglutine as partículas de agregado, dando forma ao corpo de prova para

os ensaios descritos posteriormente nesta metodologia. A força de compressão foi controlada para todas as amostras confeccionadas, como já especificado.

O maquinário elaborado é constituído por um controlador de temperatura, um sensor de temperatura, uma chave de acionamento do controlador (em arduino) e uma resistência elétrica do tipo coleira. Fisicamente, o maquinário é composto por um cilindro com uma rosca infinita que é responsável por levar o material até a saída, onde o molde estará em baixo para receber o material, uma manivela que fará essa rosca girar transportando a mistura, e um funil que receberá a mistura fria antes de tudo.



Figura 8. Equipamento elaborado para moldagem dos corpos de prova

Após a pesagem dos dois componentes, a mistura entre o polipropileno e o agregado foi feita de forma manual e colocada no funil do equipamento. Assim, com a ajuda da manivela, o material é levado para dentro do cilindro onde a rosca infinita levará até a saída o material já quente, visto que a resistência está posicionada acima do cilindro.

A temperatura de aquecimento foi ajustada para 170°C e o tempo de 15 minutos já foi suficiente para a adequada aglutinação das partículas e derretimento do polipropileno dentro do canhão de ferro do maquinário.

A compactação de cada corpo de prova foi feita logo após o derramamento do material quente no molde. Foi estabelecido para todas as amostras o tempo de 5 minutos permanecendo com a carga aplicada, tempo suficiente para o polímero esfriar e a amostra endurecer. A pressão foi mantida no corpo de prova através do pistão da prensa CBR, utilizada de forma manual para

controle da pressão desejada a cada corpo de prova mediante o relógio dinamométrico. A Figura 9 mostra a máquina utilizada para a compactação dos corpos de prova.

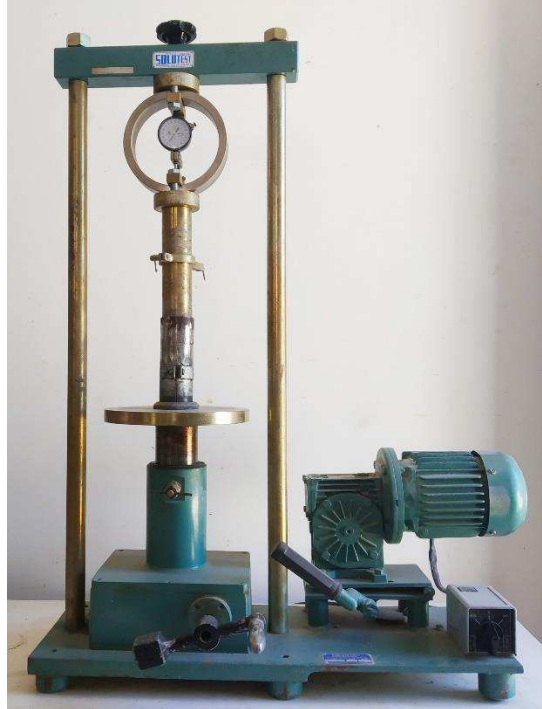


Figura 9. Prensa CBR utilizada para compactação dos corpos de prova

Tendo em vista que a cura é um fenômeno que visa à hidratação do concreto para diminuir os efeitos da evaporação prematura da água na estrutura concretada e sabendo-se que o polímero é um material inerte, como também os agregados, a mistura dos dois gera um compósito que não necessita da etapa de cura para ser ensaiado, o que minimiza o tempo de produção deste compósito.

Por fim, a desmoldagem é a etapa de retirada do corpo de prova do molde metálico. Para esta etapa outra prensa do laboratório foi adaptada para a remoção da amostra, pois o polímero depois de endurecido, necessita de maior força para sair do molde, porque pode ter aderido às paredes do mesmo. A Figura 10 mostra a prensa hidráulica com capacidade de 30 toneladas, da marca Somar e sua adaptação com outras peças para que o corpo de prova após extrudado, saísse ileso do molde, sem marcas, nem quebras.



Figura 10. Prensa hidráulica utilizada para extração do corpo de prova do molde

4.5 Propriedades do Compósito

4.5.1 Absorção de água por capilaridade

A obtenção da absorção de água por capilaridade seguiu as determinações da NBR 9779 (2012) (Figura 11). Os corpos-de-prova foram secos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e determinada a massa de cada um. Posteriormente, os corpos de prova foram parcialmente imersos em um recipiente à temperatura constante, de modo que o nível d'água permanecesse constante a 5 ± 1 mm acima da sua face inferior, sem que esta tocasse o fundo do recipiente.



Figura 11. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Durante o ensaio, determinou-se a massa dos corpos de prova com 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contadas a partir da colocação destes em contato com a água. Completada cada etapa, os corpos de prova retornaram imediatamente ao recipiente do ensaio.

A absorção de água por capilaridade deve ser expressa em g/cm^2 e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, de acordo com a Equação 3 da NBR 9779 (2012).

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (3)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm^2 ;

A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2) °C, em g;

S = área da seção transversal, em cm^2 .

4.5.2 Absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado com 3 repetições de cada planejamento experimental (7 experimentos) para cada tipo de agregado, totalizando 42 corpos de prova (Figura 12).



Figura 12. Ensaio de absorção de água por imersão

Inicialmente foi determinada a massa da amostra ao ar e, em seguida, os corpos de provas foram levados a estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Completada a secagem em estufa e determinada a massa, procedeu-se à imersão da amostra em água à temperatura ambiente, durante 72 horas.

A amostra foi mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 horas e 2/3 nas 4 horas subsequentes, sendo completamente imersa nas 64 horas restantes, sendo determinadas as massas, decorridas 24, 48 e 72 horas de imersão total em água. Com as massas determinadas ao longo do procedimento, e conforme a norma adotada (ABNT NBR 9778, 2005), a absorção de água por imersão, o índice de vazios, a massa específica da amostra seca e da amostra saturada foram determinadas através das Equações 4 a 7 a seguir:

$$\text{Absorção de água por imersão} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Índice de vazios} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Massa específica da amostra seca} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (6)$$

$$\text{Massa específica da amostra saturada} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (7)$$

Onde:

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado (g);

M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa (g);

M_i = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água (g).

4.5.3 Resistência à compressão

As avaliações de resistência à compressão uniaxial simples (Figura 13) foram realizadas segundo as recomendações da NBR 7215 (1996), sendo utilizadas 3 repetições de cada planejamento experimental, totalizando 42 corpos de prova entre areia e pó de pedra como agregados. Os ensaios foram realizados em máquina Autograph da Shimadzu AG – IS, de capacidade de 100 kN. Antes de serem rompidas, as amostras foram pesadas, registrado o seu peso e as medidas de diâmetro e altura para cálculo da densidade de cada corpo de prova, o que já é um indício da qualidade da compactação e como irá se comportar na resistência à compressão.

No ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram posicionados diretamente sobre o prato inferior do equipamento, de maneira que ficassem rigorosamente centralizados em relação ao eixo de carregamento e recebessem as cargas a uma velocidade de carregamento da máquina de ensaio de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, que eram convertidas em megapascals, dividindo a carga de ruptura máxima pela área da seção transversal de cada corpo de prova.



Figura 13. Ensaio de Resistência à compressão simples

4.5.4 Resistência à tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu-se as recomendações da norma NBR 7222 (2011), sendo utilizadas 3 repetições de cada planejamento experimental, totalizando 42 corpos de prova entre areia e pó de pedra como agregados. Os ensaios foram realizados em máquina tipo prensa para ensaios de compressão semiautomática com capacidade de 24000 Kgf da marca Pavitest (Figura 14).



Figura 14. Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

Antes de serem rompidas, as amostras foram medidas, registrando seus valores de diâmetro e altura para posterior cálculo da resistência.

Tiras de chapa dura de fibra de madeira, isentas de defeitos, de comprimento igual ou maior ao da geratriz do corpo de prova foram obtidas para colocar entre os pratos da máquina e o corpo de prova, fazendo com que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas, coincida com o eixo de aplicação da carga, como ilustrado na Figura 15 a seguir.



Figura 15. Rompimento de corpo de prova à tração por compressão diametral

A carga foi aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela Equação 8:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 F}{\pi d l} \quad (8)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = força máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = comprimento do corpo de prova (mm).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades dos componentes do compósito

5.1.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do Polipropileno

No ensaio de DSC foi possível confirmar que o polímero em questão na pesquisa era realmente o polipropileno e apontar a temperatura e tempo necessários para que o mesmo fundisse e fosse possível a confecção dos corpos de prova como desejados. De acordo com a literatura, o polipropileno funde-se à cerca de 160°C. Observando o gráfico abaixo, pode-se apontar que a reação começou a 158,7°C aos 14 minutos, atingindo seu pico máximo e completando sua fusão aos 171,7°C aos 16 minutos (Figura 16). É importante apontar que à cerca de 130°C acontece a transição vítrea do material, em que o mesmo fica com o aspecto borrachoso.

Portanto, justifica-se a escolha da temperatura utilizada na resistência da máquina elaborada para 170°C por 15 minutos de aquecimento.

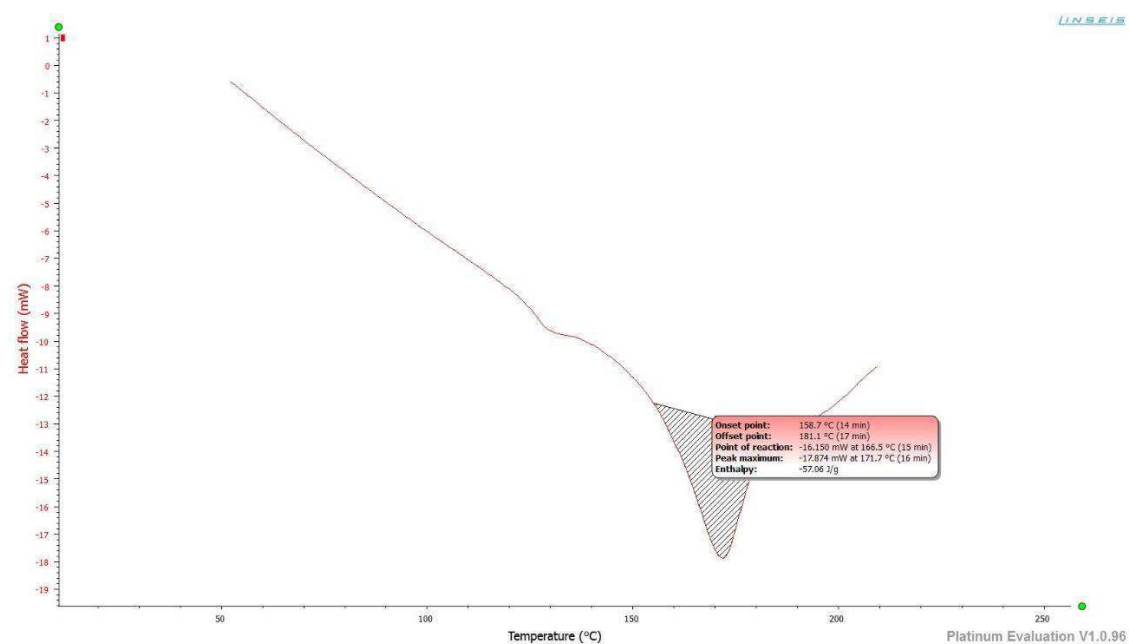


Figura 16. Curva DSC do polipropileno

5.1.2 Análise Granulométrica

A curva de granulometria representa a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos, e a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência. Por meio da análise granulométrica é possível obter conhecimento sobre cada componente isoladamente, para compor a mistura ideal para o

compósito de concreto polimérico. Observa-se que a curva do polipropileno possui característica de graduação uniforme, com grande maioria dos agregados apresentando mesma faixa de tamanho dos grãos. O pó de pedra apresenta graduação semelhante, porém com maior diversificação do tamanho das partículas. Enquanto a areia possui graduação aberta, entre partículas graúdas ou miúdas. A Figura 17 e Tabela 4 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos.

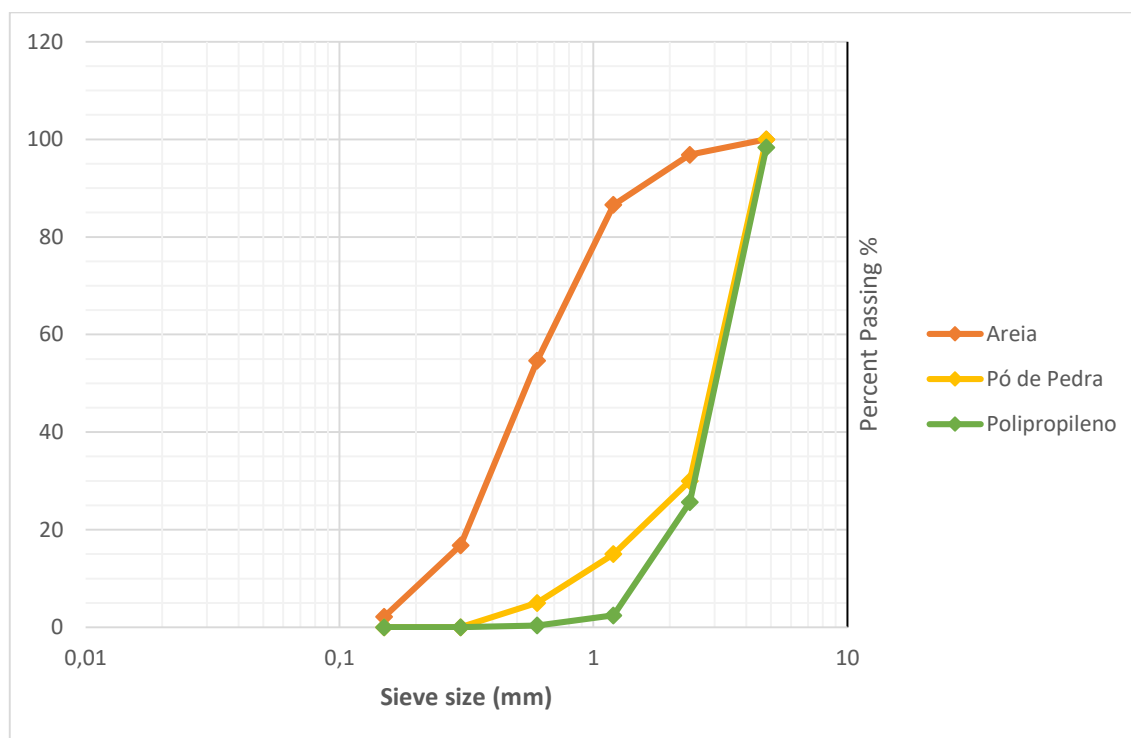


Figura 17. Curva Granulométrica do polipropileno, areia e pó de pedra

Tabela 4. Distribuição das partículas dos grãos e determinação de dimensão máxima característica e módulo de finura

Diâmetro (mm)	% Passa		
	Areia	Pó de Pedra	Polipropileno
4,8	100	100	98,33
2,4	96,83	30	25,62
1,2	86,56	15	2,42
0,6	54,64	5	0,36
0,3	16,82	0	0,03
0,15	2,18	0	0
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	2,4	4,8
Módulo de finura	2,43	4,5	4,73

Para a areia, o valor de 2,43 para o módulo de finura o configura como uma areia média de dimensão máxima característica de 2,4 mm. Enquanto que o pó de pedra exibe um módulo de finura de 4,5 e dimensão máxima característica também de 2,4 mm, o que o torna um agregado de classificação muito grossa.

É importante frisar que a granulometria do agregado pó de pedra não foi meramente calculada, e sim previamente montada e estabelecida de acordo com testes feitos anteriormente com diferentes quantidades de cada tamanho passante, a fim de se ter agregados mais graúdos do que miúdos, diferentemente da areia, que conta com uma mistura mais homogênea quando se fala no diâmetro dos grãos.

Adicionalmente, é relevante lembrar que o polipropileno passou pela determinação da granulometria pelo método do peneiramento após ter sido moído e ele será posteriormente derretido, então essa granulometria não se torna essencial para o estudo, porém a título de informação, achou-se adequada sua determinação.

5.1.3 Massa unitária dos agregados

A massa unitária da areia natural e do pó de pedra utilizados nesta pesquisa consta na Tabela U a seguir.

Tabela 5. Massa unitária da areia natural e pó de pedra

Material	Massa unitária (Kg/m³)
Areia natural	1545,36
Pó de Pedra	1482,29

A areia apresentou uma maior massa unitária que o agregado Pó de Pedra. Tal fato se justifica, possivelmente, pela maior quantidade de poros que a areia apresenta, acarretando em uma menor massa específica, como pode ser observado no comparativo dos dois agregados em estudo.

5.1.4 Absorção de água dos agregados

A absorção de água para os agregados areia e pó de pedra encontra-se na Tabela 6 a seguir. Na qual pode-se concluir que a absorção da areia apresentou maiores valores, uma vez que apresenta uma maior quantidade de poros, armazenando mais água quando submerso e após secagem superficial.

Tabela 6. Absorção de água da areia e pó de pedra

Material	Absorção (%)
Areia natural	0,2063
Pó de Pedra	0,0030

5.2 Propriedades do compósito

5.2.1 Absorção de água por capilaridade

A Figura 18 apresenta as médias dos valores do parâmetro de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova após 72 horas de ensaio comparando o uso com os dois agregados: areia e pó de pedra.

Observando-se a Figura 18, pode-se constatar que nos corpos de prova compostos de areia como agregado, a absorção por capilaridade foi maior que com o pó de pedra, chegando a até 200% de diferença. Os ensaios correspondentes a 10% de polipropileno, seja com areia, seja com o pó de pedra, mostraram maior absorção por capilaridade, o que faz sentido, uma vez que o polímero contribui para uma menor permeabilidade do compósito. Ao mesmo tempo que os corpos de prova moldados com uma carga de compactação de 250 kPa, mostraram maior absorção de água por capilaridade do que os moldados com 750 kPa para o agregado areia, enquanto que o contrário aconteceu no agregado pó de pedra. Tal diferença pode ser explicada por suas diferentes granulometrias.

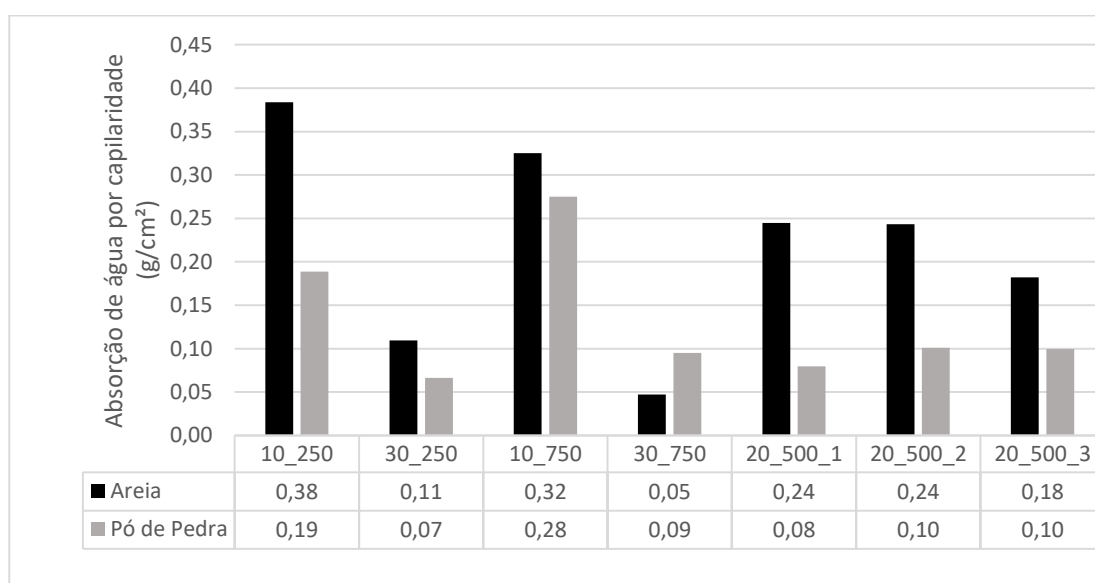


Figura 18. Resultados para os ensaios de absorção de água por capilaridade de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

As equações de regressão estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, para a variável absorção de água por capilaridade (AAC) com os coeficientes estatisticamente significativos para o agregado areia, é a seguinte:

$$\text{AAC (Areia)} = 0,2193 - 0,1381\text{PP} \quad (9)$$

Onde:

PP = Polipropileno.

Na Tabela 7 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 7. Análise de variância para avaliação da absorção de água por capilaridade no compósito

Absorção de água por capilaridade		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Areia	Regressão	0,99	1	0,2399	40,66	4,38	0,68204
	Resíduo	0,1118	19	0,0059			
	Total	0,3517	20				

Observando-se os coeficientes da Equação 9, pode-se concluir que o único coeficiente do modelo que apresenta relevância para a absorção de água por capilaridade é a porcentagem de Polipropileno. Pode-se concluir também observando os dados da Tabela 7 que, apesar do coeficiente de determinação (R^2) da areia apresentar baixo valor, o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo, em razão de que os valores calculados para F foram acima de 6 vezes o valor do F tabelado (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

No entanto, para o agregado pó de pedra, a superfície de resposta se comportou como uma curva, porém o modelo utilizado é limitado a uma reta. Sabendo-se que o R^2 não foi utilizado de forma preditiva, e sim para analisar as duas variáveis e que o planejamento experimental foi proposto apenas a fim de haver uma redução de tempo e custo, a superfície de tendência para o agregado pó de pedra no ensaio de absorção de água por capilaridade, portanto se mostra como a seguinte:

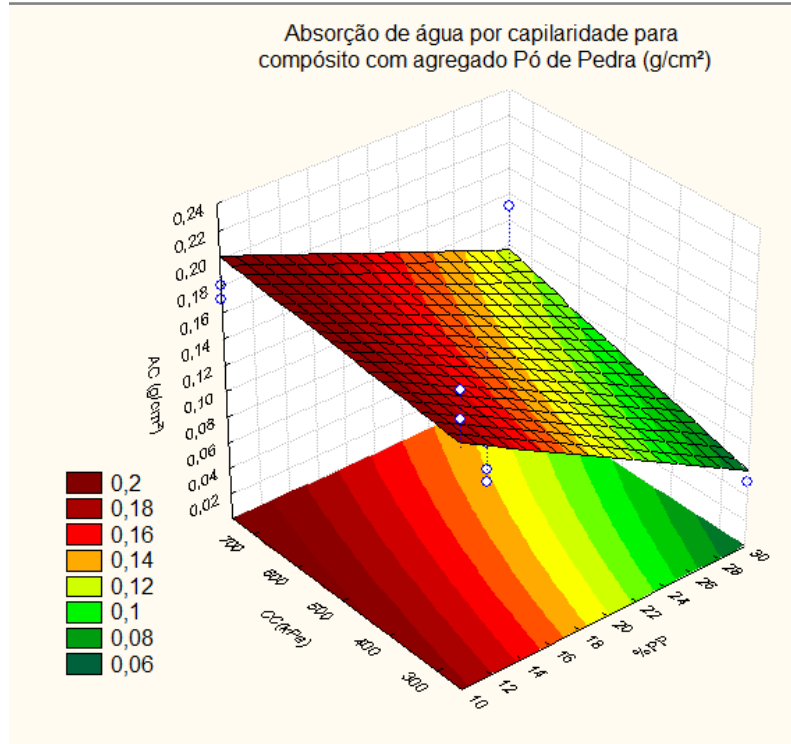


Figura 19. Superfície de tendência para a absorção de água por capilaridade, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para o agregado pó de pedra

A superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de absorção de água por capilaridade em função do teor de polipropileno e a carga de compactação, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, estão apresentadas na Figura 20.

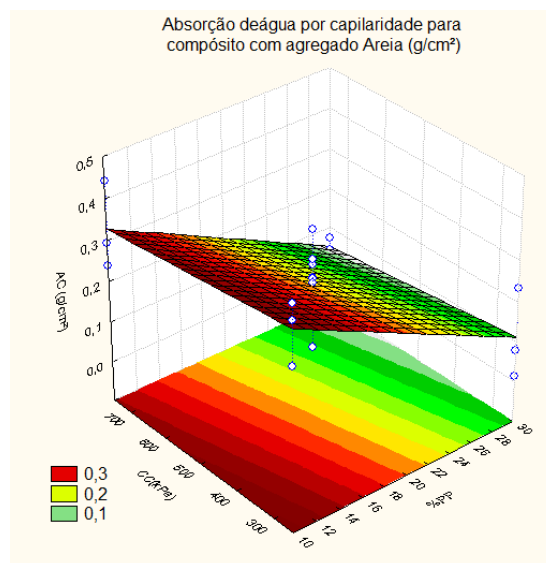


Figura 20. Superfície de resposta para a absorção de água por capilaridade, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para o agregado areia

Através das curvas apresentadas na Figura 19 e 20, nota-se que as absorções de água por capilaridade tendem a aumentar com a redução da porcentagem de polipropileno. Com qualquer dos agregados verifica-se que os melhores resultados são alcançados quando se tem maior teor de polipropileno na mistura do concreto polimérico.

5.2.2 Absorção de água por imersão

A Figura 21 apresenta as médias dos valores do parâmetro de absorção de água por imersão dos corpos de prova após 72 horas de ensaio comparando o uso com os dois agregados: areia e pó de pedra. A partir da Figura 21, pode-se constatar que a absorção por imersão foi maior para o agregado pó de pedra, chegando a mais de 100% de diferença. Os ensaios correspondentes a 10% de polipropileno, seja com areia ou com o pó de pedra, evidenciaram maior absorção por imersão, já que o polímero contribui para uma menor permeabilidade do compósito. Ao mesmo tempo que os corpos de prova moldados com uma carga de compactação de 250 kPa e 10% de polímero na mistura, mostraram menor absorção de água por imersão do que os moldados com 750 kPa para os dois agregados; enquanto que o contrário aconteceu quando se teve 30% de polipropileno. Tal comportamento pode ser explicado pelo melhor envolvimento das partículas quando aglutinadas por uma maior quantidade de polipropileno, evitando de forma mais eficaz a permeabilidade da água no compósito, independentemente da carga de compactação aplicada.

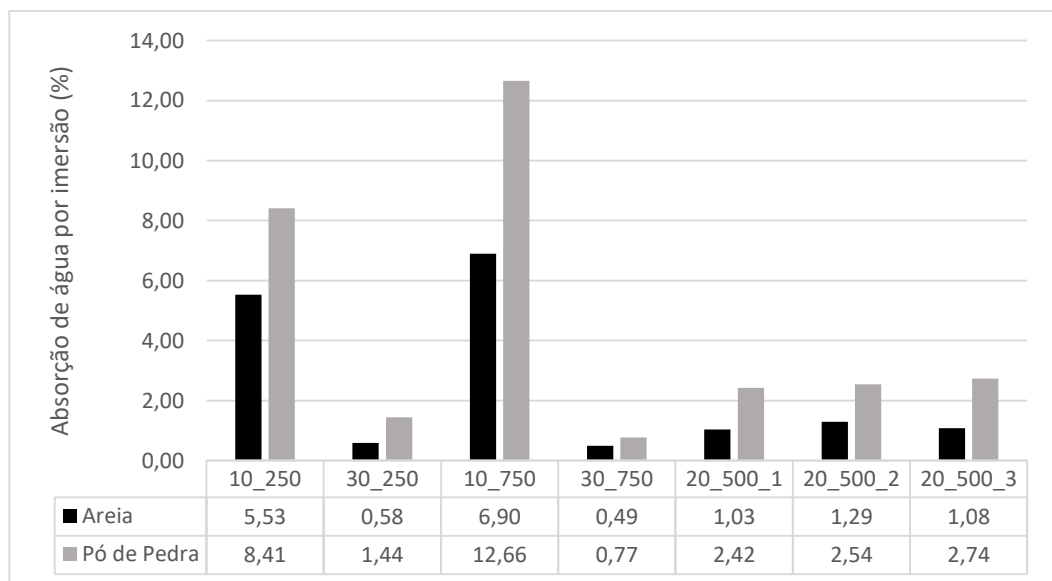


Figura 21. Resultados para os ensaios de absorção de água por imersão de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

As equações de regressão estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, para a variável absorção de água por imersão (AAI) com os coeficientes estatisticamente significativos para os agregados areia e pó de pedra, são as seguintes:

$$AAI (\text{Areia}) = 2,4147 - 2,8382PP \quad (10)$$

$$AAI (\text{Pó de Pedra}) = 1,4752 - 1,57104PP \quad (11)$$

Na Tabela 8 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 8. Análise de variância para avaliação da absorção de água por imersão no compósito

Absorção de água por imersão		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Areia	Regressão	99,4787	1	99,4787	51,90	4,38	0,732
	Resíduo	36,4206	19	1,9169			
	Total	135,8993	20				
Pó de Pedra	Regressão	32,702	1	32,702	78,2788	4,38	0,80468
	Resíduo	7,9375	19	0,4178			
	Total	40,6395	20				

Observando-se os coeficientes das Equações 10 e 11, pode-se concluir que o único coeficiente do modelo que apresenta relevância para a absorção de água por imersão é a porcentagem de Polipropileno. Pode-se concluir também observando os dados da Tabela 8 que os coeficientes de determinação (R^2), que são medidas estatísticas de quanto uma linha de regressão aproxima-se de dados reais, apresentam valores de 0,732 e 0,8047 para os agregados areia e pó de pedra, respectivamente.

As superfícies de resposta geradas a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de absorção de água por imersão em função do teor de polipropileno e a carga de compactação, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, estão apresentadas na Figura 22.

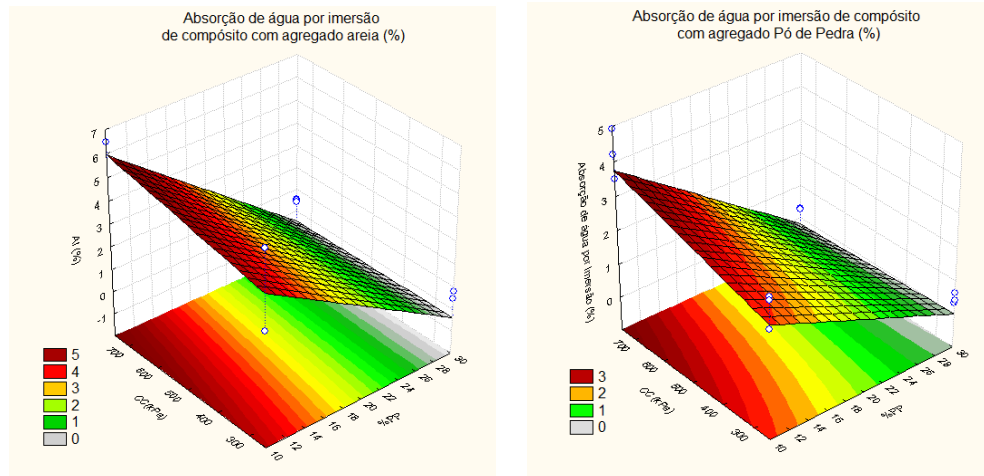


Figura 22. Superfícies de resposta para a absorção de água por imersão, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 22, nota-se que as absorções de água por imersão tendem a aumentar com a redução da porcentagem de polipropileno e que quando se trata do agregado pó de pedra, a diferença na absorção por imersão é mais visível quanto à carga de compactação do que no agregado areia, então quanto maior a carga de compactação no agregado pó de pedra, menor a taxa de absorção, o que se torna mais interesse ao estudo. Com qualquer dos agregados verifica-se que os melhores resultados são alcançados quando se tem maior teor de polipropileno na mistura do concreto polimérico.

No experimento de absorção de água por imersão, também foi determinado o índice de vazios, a massa específica da amostra seca e da amostra saturada. E pôde-se constatar que quando o compósito era preparado com a areia, o mesmo apresentava menor índice de vazios, o que explica a menor absorção quando imerso em água. Como também pôde-se avaliar que quanto mais polipropileno, menor o índice de vazios, como pode ser observado na Figura 23.

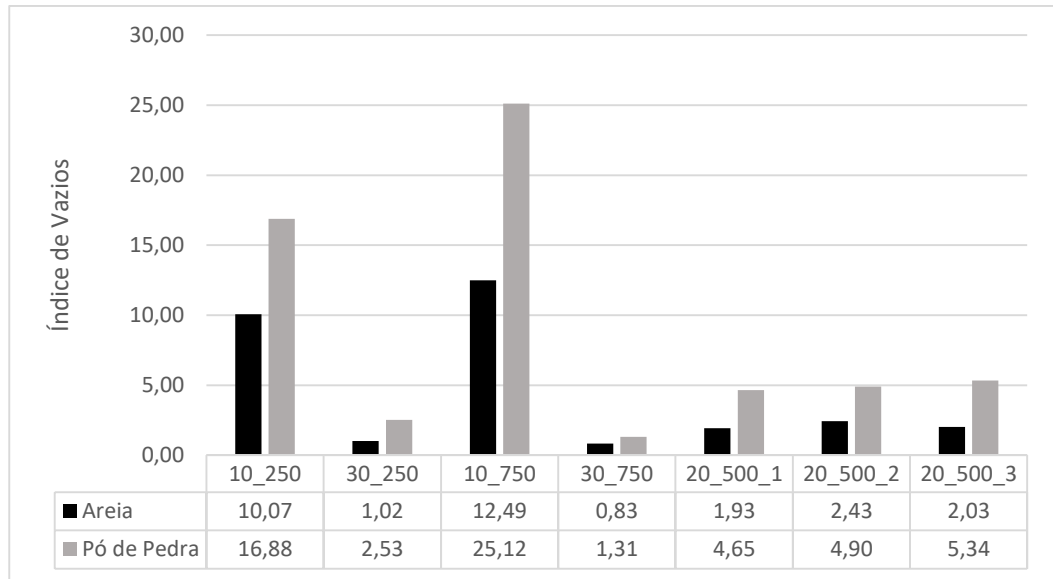


Figura 23. Resultados para a determinação do índice de vazios de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

As Figuras 24 e 25 a seguir mostram o quanto a massa específica da amostra, esteja seca, ou saturada, é bem maior quando se trata de um compósito composto por pó de pedra como agregado na mistura e que o teor de polipropileno ou a carga de compactação não fez diferença significativa nos resultados da massa específica do concreto polimérico desenvolvido.

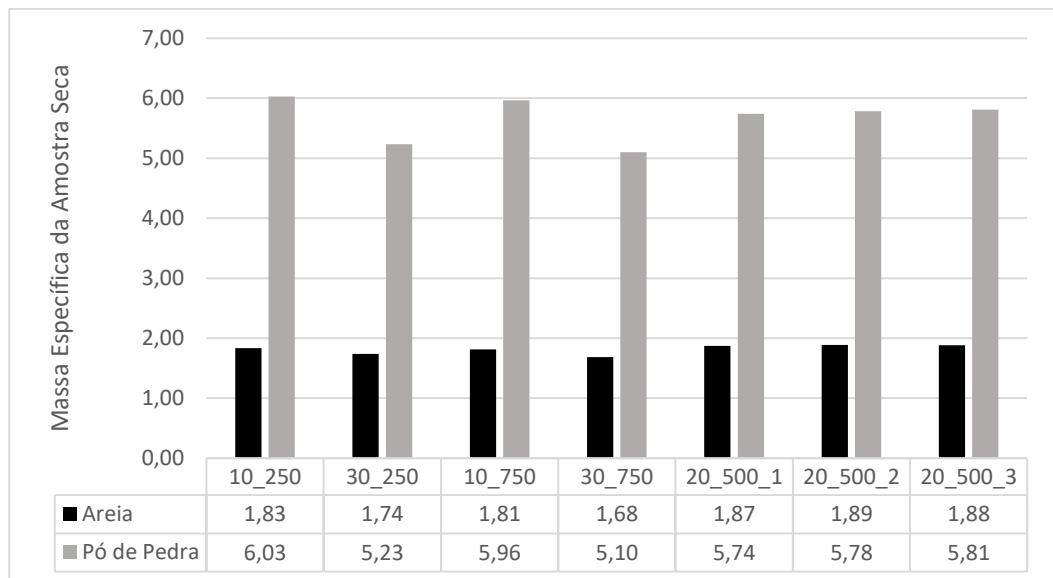


Figura 24. Resultados para a determinação da massa específica da amostra seca de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

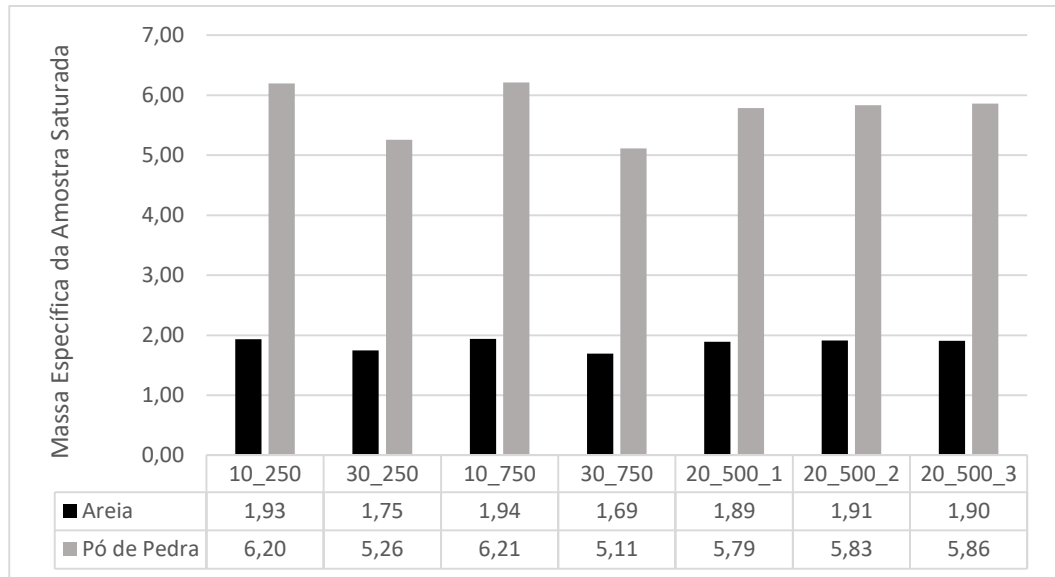


Figura 25. Resultados para a determinação da massa específica da amostra saturada de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

5.2.3 Resistência à compressão

A Figura 26 apresenta as médias dos valores do parâmetro de resistência à compressão dos corpos de prova comparando o uso com os dois agregados: areia e pó de pedra. Pode-se constatar que nos corpos de prova compostos de pó de pedra como agregado, a resistência à compressão foi maior que com a areia, chegando a mais de 30% de diferença. Os corpos de prova elaborados com 30% de polipropileno, seja com areia ou com o pó de pedra, mostraram maior resistência à compressão, uma vez que o polímero contribui para um melhor rearranjo das partículas. Ao mesmo tempo que os corpos de prova moldados com uma carga de compactação de 250 kPa, mostraram maior resistência do que os moldados com 750 kPa para os dois agregados. Este evento pode ser explicado pela não interferência que esses níveis de carga de compactação promovem no compósito. Com maiores diferenças na carga de compactação da moldagem, talvez os resultados fossem mais significativos para essa variável.

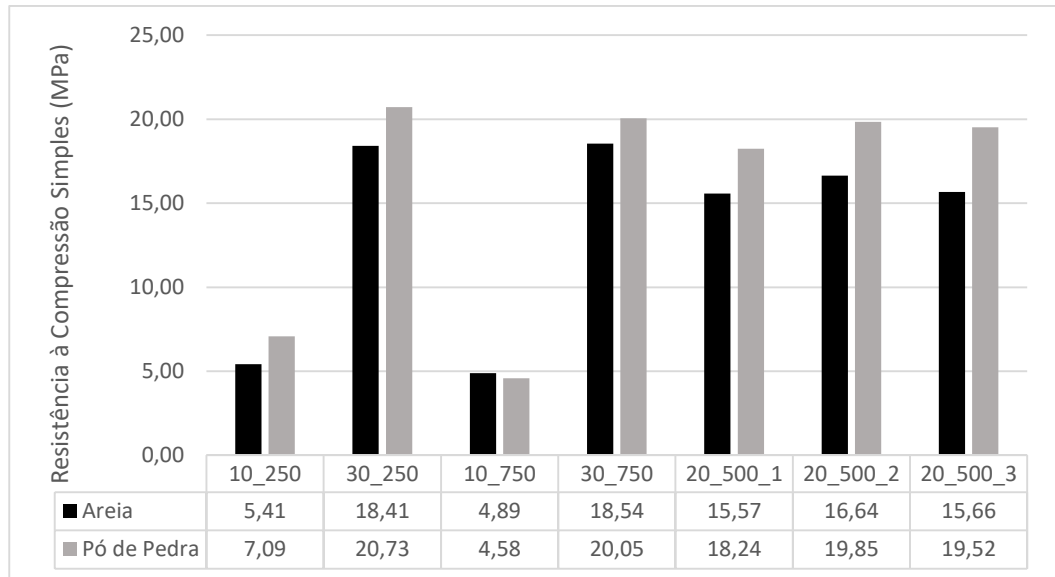


Figura 26. Resultados para os ensaios de resistência à compressão de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

As equações de regressão estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, para a variável resistência à compressão (RC) com os coeficientes estatisticamente significativos para os agregados areia e pó de pedra, são as seguintes:

$$RC (\text{Areia}) = 13,5876 + 6,6633PP \quad (12)$$

$$RC (\text{Pó de Pedra}) = 15,7219 + 7,2767PP \quad (13)$$

Na Tabela 9 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 9. Análise de variância para avaliação da resistência à compressão no compósito

Resistência à Compressão Simples		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Areia	Regressão	532,8001	1	532,8001	82,2691	4,38	0,8124
	Resíduo	123,0498	19	6,4763			
	Total	655,8500	20				
Pó de Pedra	Regressão	635,3985	1	635,3985	51,8567	4,38	0,7318
	Resíduo	232,8064	19	12,2530			
	Total	868,2049	20				

Observando-se os coeficientes das Equações 12 e 13, pode-se concluir que o único coeficiente do modelo que apresenta relevância para a resistência à compressão é a porcentagem de polipropileno. Pode-se concluir também observando os dados da Tabela 9 que os coeficientes de determinação (R^2), que são medidas estatísticas de quanto uma linha de regressão aproxima-

se de dados reais, apresentam valores de 0,8124 e 0,7318 para os agregados areia e pó de pedra, respectivamente.

As superfícies de resposta geradas a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de resistência à compressão em função do teor de polipropileno e a carga de compactação, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, estão apresentadas na Figura 27.

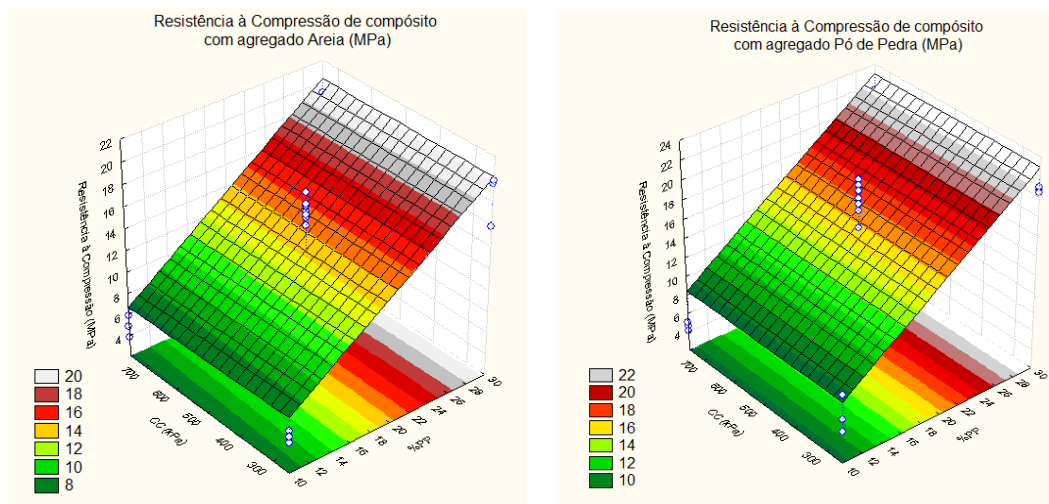


Figura 27. Superfícies de resposta para a resistência à compressão, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 27, nota-se que a resistência à compressão tende a aumentar com o aumento da porcentagem de polipropileno e que quando se trata da variável carga de compactação, não se tem diferença na resistência, seja do agregado areia ou pó de pedra. Com qualquer dos agregados verifica-se que os melhores resultados são alcançados quando se tem maior teor de polipropileno na mistura do concreto polimérico.

5.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 28 apresenta as médias dos valores do parâmetro de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova comparando o uso com os dois agregados: areia e pó de pedra.

Observando-se a Figura 28, pode-se constatar que em quase todos os casos, nos corpos de prova compostos de pó de pedra como agregado, a resistência à tração foi maior que com a areia, chegando a mais de 200% de diferença. Os ensaios correspondentes a 30% de polipropileno, seja com areia ou com o pó de pedra, mostraram maior resistência à tração, o que faz sentido, uma vez que o polímero contribui para um melhor rearranjo das partículas. Ao

mesmo tempo que as cargas de compactação não mostraram evidências de influência no resultado geral da resistência à tração. Este evento pode ser explicado pela não interferência que esses níveis de carga de compactação promovem no compósito. Com maiores diferenças na carga de compactação da moldagem, talvez os resultados fossem mais significativos para essa variável.

É importante notar que nos concretos convencionais, a resistência à tração representa apenas cerca de 10% da resistência à compressão. No entanto, o compósito aqui estudado apresenta valores de resistência à tração de mais de 10% da resistência à compressão, chegando a até mais de 23%. Como pode ser observado na Figura 27, com a exceção dos corpos de prova compostos pela areia e com 10% de polímero, todos superaram a expectativa de mais de 10% da resistência à compressão.

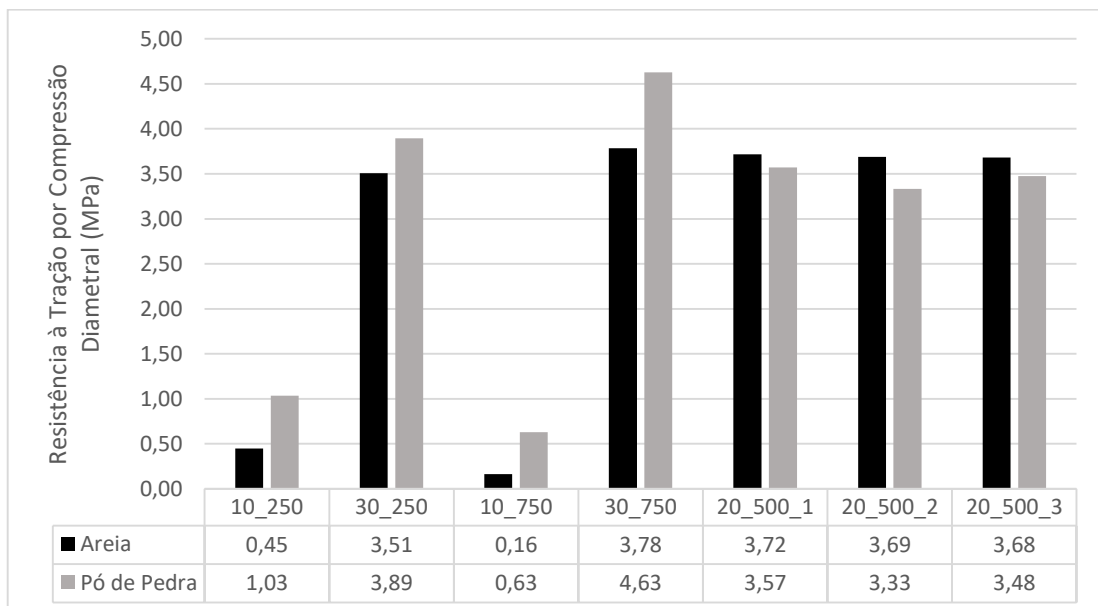


Figura 28. Resultados para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral de compósito com agregado areia comparados aos de pó de pedra

As equações de regressão estatisticamente significativas em um nível de 95% de confiança, para a variável resistência à tração por compressão diametral (RTCD) com os coeficientes estatisticamente significativos para os agregados areia e pó de pedra, são as seguintes:

$$RTCD (Areia) = 2,7125 + 1,67PP \quad (14)$$

$$RTCD (Pó de Pedra) = 2,9374 + 1,7152PP \quad (15)$$

Na Tabela 10 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 10. Análise de variância para avaliação da resistência à tração por compressão diametral no compósito

Resistência à Tração por Compressão Diametral		SQ	GL	QM	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	R^2
Areia	Regressão	33,4686	1	33,4686	35,2247	4,38	0,6496
	Resíduo	18,0527	19	0,9501			
	Total	51,5213	20				
Pó de Pedra	Regressão	35,3017	1	35,3017	73,6907	4,38	0,7950
	Resíduo	9,1020	19	0,4790			
	Total	44,4037	20				

Observando-se os coeficientes das Equações 14 e 15, pode-se concluir que o único coeficiente do modelo que apresenta relevância para a resistência à tração por compressão diametral é a porcentagem de polipropileno. Pode-se concluir também observando os dados da Tabela 10 que, apesar de os coeficientes de determinação (R^2) apresentarem baixos valores, o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo, em razão de que os valores calculados para F foram acima de 6 vezes o valor do F tabelado (Rodrigues & Iemma, 2009) e apresentam valores de 0,6496 e 0,7950 para os agregados areia e pó de pedra, respectivamente.

As superfícies de resposta geradas a partir da análise estatística dos resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em função do teor de polipropileno e a carga de compactação, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, estão apresentadas na Figura 29.

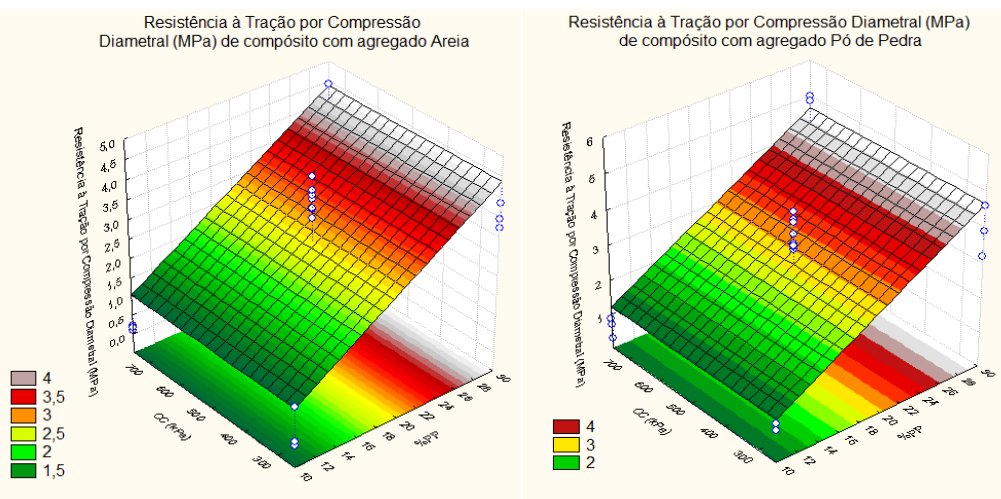


Figura 29. Superfícies de resposta para a resistência à tração por compressão diametral, em função do teor de polipropileno e da carga de compactação, para os dois agregados avaliados: areia e pó de pedra

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 29, nota-se que a resistência à tração por compressão diametral tende a aumentar com o aumento da porcentagem de polipropileno e que quando se trata da variável carga de compactação, não se tem diferença na resistência, seja do agregado areia ou pó de pedra. Com qualquer dos agregados verifica-se que os melhores resultados são alcançados quando se tem maior teor de polipropileno na mistura do concreto polimérico.

6. CONCLUSÃO

1. A variável porcentagem de polipropileno sobrepõe a variável carga de compactação, pois aquela influencia mais nos resultados, não havendo interação entre as duas variáveis.
2. Nos corpos de prova compostos de areia como agregado, a absorção por capilaridade foi maior do que com o pó de pedra e quanto mais polímero, menor a absorção por capilaridade dos corpos de prova. O mesmo acontece no ensaio de absorção de água por imersão, em que quanto mais polipropileno na mistura, menos os compósitos absorvem água.
3. Na absorção por imersão, os compósitos com o agregado pó de pedra absorvem mais água do que com a areia, já que apresentam também maior índice de vazios.
4. Para a resistência à compressão e à tração por compressão diametral, pode-se observar que quanto maior o teor de polipropileno, maiores as resistências, atingindo níveis até de concreto estrutural de 20 MPa de resistência à compressão simples e chegando até a mais de 20% da resistência à tração comparada com a resistência à compressão.
5. Obteve-se melhores repostas com o agregado pó de pedra.

Por fim, o uso do método de análise por superfície de resposta (MSR) permite estimar os níveis mais representativos para os resultados esperados. Têm-se como valores ideais para as variáveis independentes em estudo os corpos de prova que possam ser produzidos com maior teor de polipropileno (30%) e resultem em maior resistência à compressão e à tração, e menor índice de absorção de água por imersão e capilaridade, considerando-se como agregado o pó de pedra.

A viabilidade de uso desse concreto polimérico no mercado da construção é bastante ampla, variando desde uso em pavimentos, sendo usinado a quente, como em pisos, tanto para construções civis, como rurais, em instalações animais por exemplo que necessitem de uma resistência maior e melhor aderência de seus componentes, aumentando sua vida útil. Como também pode ser amplamente comercializado como um bloco pré-moldado, que pode ser aplicado em paredes de fechamento e principalmente em paredes estruturais devido sua alta resistência mecânica demonstrada nesse estudo, evitando um grande inimigo do construtor: a percolação de água. Tais aplicações trazem embutidas diversas vantagens, pois neste compósito não se faz uso de cimento nem de água, os materiais empregados são totalmente reutilizados, não necessita de tempo de espera para cura do mesmo, apresenta baixa permeabilidade, alta

resistência à compressão comparável com os concretos convencionais utilizados e resistência à tração mais elevada do que o concreto comum.

Como sugestões para futuros trabalhos, pode-se citar o estudo com teores de substituição intermediários entre 20 e 30% de polipropileno e com cargas de compactação maiores, a partir de 1 MPa. Além disso, sugere-se também a fim de aperfeiçoamento do estudo, a caracterização do polímero por meio de análises químicas e termogravimétricas, análises morfológicas por meio de microscopia e análise de infravermelho (FTIR) do polímero e do compósito para estudo dos processos de reação do polímero. Bem como a construção de um trecho ou parede experimental utilizando o concreto polimérico estudado para análise dos padrões de desempenho em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2009.

ABNT NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 1996.

ABNT NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2011.

ABNT NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2005.

ABNT NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2012.

ABNT NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2003.

ABNT NBR NM 30. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2001.

ABNT NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2006.

AGNELLI, J. A. M.; GALLO, J. B. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1998.

AHN, S.; KWON, S.; HWANG, Y.; KOH, H.; KIM, H.; PARK, J. Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system. **Composite Structures**, v. 223, 2019.

ANBUVELAN, K.; KHADAR, M. M.; LAKSHMIPATHY, M. H. M.; SATHYANARAYANAN, K. S. Studies on properties of concretes containing polypropylene, steel and reengineered plastic shred fibre. **Indian Concrete Journal**, v. 81, p. 17-24, 2007.

BALMACEDA, A. R. **Suelos compactados – um estúdio teórico y experimental**. Tese (doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1991.

BANNACH, G.; PERPÉTUO, G. L.; CAVALHEIRO, E. T. G.; CAVALHEIRO, C. C. S.; ROCHA, R. R. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. **Quim. Nova**, v. 34, p. 1825-1829, 2011.

BEDI, R.; CHANDRA, R.; SINGH, S. P. Reviewing some properties of polymer concrete - Technical Paper. **Indian Concrete Journal**, p. 47-68, 2014.

BERNARDI, D.; DEJONG, J. T.; MONTOYA, B. M.; MARTINEZ, B. C. Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 462-469, 2014.

BULUT, H.; ŞAHİN, R. A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. **Composite Structures**, v. 178, p. 50-62, 2017.

CENTOFANTE, G.; DAGOSTINI, C. M. Análise das propriedades de argamassas de revestimento com adição de fibras de polipropileno, **Unesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, Edição Especial, p. 7-16, 2014.

DING, Y.; YANG, Y.; LIU, R.; XIAO, T.; TIAN, J. Study on pressure sensitivity of smart polymer concrete based on steel slag. **Measurement**, v. 140, p. 14-21, 2019.

FERDOUS, W.; MANALO, A.; WONG, H. S.; ABOUSNINA, R.; ALAJARMEH, O. S.; ZHUGE, Y.; SCHUBEL, P. Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020.

GENCEL, O.; OZEL, C.; BROSTOW, W.; MARTÍNEZ-BARRERA, G. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Fibres. **Materials Research Innovations**, v. 15, 2011.

HAMEED, A. M.; HAMZA, M. T. Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. **Energy Procedia**, v. 157, p. 43-50, 2019.

HIPOLITO, I. da S.; HIPOLITO, R. da S.; LOPES, G. de A. Polímeros na construção civil. In: X SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA: GESTÃO E TECNOLOGIA PARA A COMPETITIVIDADE, 2013. **Anais...**

HOSSAIN, F. M. Z.; SHAHJALAL M.; ISLAM, K.; TIZNOBAIK, M.; ALAM, M. S. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 983-996, 2019.

HSIE, M.; TU, C.; SONG, P. S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**, v. 494, p. 153-157, 2008.

JAFARI, K.; TABATABAEIAN, M.; JOSHAGHANI, A.; OZBAKKALOGLU, T. Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 185-196, 2018.

JAFARI, K.; TOUFIGH, V. Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 495-510, 2017.

JAVADI, A. S.; BADIEE, H.; SABERMAHANI, M. Mechanical properties and durability of bio-blocks with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 859-865.

JUNG, K.; ROH, I.; CHANG, S. Evaluation of mechanical properties of polymer concretes for the rapid repair of runways. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 352-360, 2014.

KÜÇÜK, V. A.; ÇINAR, E.; KORUCU, H.; SIMSEK, B.; GÜVENÇ, A. B.; UYGUNOĞLU, T.; KOCAKERIM, M. M. Thermal, electrical and mechanical properties of filler-doped polymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 188-199, 2019.

LOOS, M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology. Elsevier, **UK**, 1st Edition, 304 p., 2014.

LÓPEZ, M. M.; BARRERA, G. M.; DÍAS, J. J. del C.; MARTÍNEZ, J. E. M.; GENÇEL, O.; RIBEIRO, M. C. S.; GUERRERO, V. V. Polymer waste materials as fillers in polymer mortars: experimental and finite elements simulation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018.

MADHAVI, T. C.; RAJU, L. S.; MATHUR, D. Polypropylene fiber reinforced concrete – a review. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, 2014.

MANO, E. B. Polímeros como Materiais de Engenharia. Editora Edgard Blücher Ltda. **São Paulo**, 2000.

MIRANDA, L. V.; VALDES, J. R.; CORTES, D. D. Solar bricks for lunar construction. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 241-246, 2017.

MOHEBI, Z. H.; BAHNAMIRI, A. B.; DEHESTANI, M. Effect of polypropylene fibers on bond performance of reinforcing bars in high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 401-409, 2019.

MOODI, F.; KASHI, A.; RAMEZANIANPOUR, A.; POUREBRAHIMI, M. Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes. **Construction and Building Materials**, v. 191, p.145-154, 2018.

MURAHARI, K.; RAO, R. M. Effects of Polypropylene fibres on the strength properties Of fly ash based concrete. **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 2, p. 13-19, 2013.

NOVAIS, R. M.; SENFF, L.; CARVALHEIRAS, J.; SEABRA, M. P.; PULLAR, R. C.; LABRINCHA, J. A. Sustainable and efficient cork – inorganic polymer composites: A innovative and eco-friendly approach to produce ultra-lightweight and low thermal conductivity materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 107-117, 2019.

PATEL, P. A.; DESAI, A. K.; DESAI, J. A. Evaluation of Engineering Properties for Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. **International Journal of Advanced Engineering Technology**, v. 3, p. 42-45, 2012.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos. **Campinas, SP: Casa do Pão**, 2ª edição, p. 125-133, 2009.

ROMERO, L.; CORTES, D. D.; VALDES, J. R. Experimental assessment of the heal-ability of a polymer bonded sand. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 610-617, 2018.

SOHAIB, N.; SEEMAB, F.; SANA, G.; MAMOON, R. Using polypropylene fibers in concrete to achieve maximum strength. In: EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 2018.

SONG, P. S.; HWANG, S.; SHEU, B. C. Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1546-1550, 2005.

SOSOI, G.; BARBUTA, M.; SERBANOIU, A.; BABOR, D.; BURLACU, A. Wastes as aggregate substitution in polymer concrete. **Procedia Manufacturing**, v. 22, p. 347-351, 2018.

TOUTANJI, H.; MCNEIL, S.; BAYASI, Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 961-968, 1998.

WANG, J.; DAI, Q.; GUO, S.; SI, R. Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 469-480, 2019.

WBCSD – World Business council for sustainable development, 2016. The cement sustainability initiative. Disponível em: <<http://www.wbcdcement.org/>>. Acesso em: Agosto, 2019.

XIAO, L.; JIN, Y.; LIXIA, G. U. Preparation and Properties of a New Composite of Epoxy Emulsion (EEM) Modified Cement. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, p. 843-845, 2009.

ZANVETTOR, G.; BARBUTA, M.; ROTARU, A.; BEJAN, L. Tensile Properties of Green Polymer Concrete. **Procedia Manufacturing**, v. 32, p. 248-252, 2019.