

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO NORTE

NATHANA LUIZA PINTO DE LIMA

**ARGAMASSA CIMENTÍCIA SUSTENTÁVEL COM RESÍDUOS DE POLIETILENO
TEREFTALATO PARA USO COMO REVESTIMENTO EXTERNO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE FÍSICA, MECÂNICA E DE DURABILIDADE**

NATAL
2021

NATHANA LUIZA PINTO DE LIMA

**ARGAMASSA CIMENTÍCIA SUSTENTÁVEL COM RESÍDUOS DE POLIETILENO
TEREFTALATO PARA USO COMO REVESTIMENTO EXTERNO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE FÍSICA, MECÂNICA E DE DURABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, como cumprimento parcial à obtenção do título de Mestra em Ciências Ambientais.

Orientadora: Dra. Renata Carla Tavares dos Santos Felipe.

NATAL

2021

Página reservada para ficha catalográfica.
Elaboração de responsabilidade da Biblioteca

NATHANA LUIZA PINTO DE LIMA

**ARGAMASSA CIMENTÍCIA SUSTENTÁVEL COM RESÍDUOS DE POLIETILENO
TEREFTALATO PARA USO COMO REVESTIMENTO EXTERNO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE FÍSICA, MECÂNICA E DE DURABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, como cumprimento parcial à obtenção do título de Mestra em Ciências Ambientais.

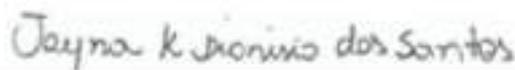
Orientadora: Dra. Renata Carla Tavares dos Santos Felipe.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 10/09/2021, pela seguinte Banca Examinadora:

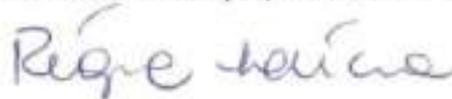
BANCA EXAMINADORA



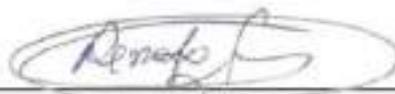
Renata Carla Tavares dos Santos Felipe, Prof. Dra. – Presidente
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Jayna Kátia Dionísio dos Santos, Dra. – Examinadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará



Régia Lúcia Lopes, Dra – Examinadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Renato Samuel Barbosa de Araújo, Dr. – Examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Ao Senhor, Alfa e o Ômega, o Primeiro e o
Último, o Princípio e o Fim. Amém.

AGRADECIMENTOS

À Deus quem torna possível todas as coisas. Que tudo tenha sido e que continue para sempre sendo para Ele e por Ele.

À minha mãe Francisca, que muito mais que mãe é minha melhor amiga, por poder contar desde sempre com sua atenção, apoio, cuidado e carinho mesmo sem justificativa de tê-los.

Ao meu pai Nazareno, que mesmo agora ausente, sempre será meu exemplo de dignidade mostrando que somente através do esforço contínuo é possível tornar sonhos realidade.

Ao meu esposo Gracon, pelo companheirismo, dedicação e proteção que me doa diariamente, além de toda a paciência e ajuda no desenvolvimento desse trabalho.

À minha professora orientadora Prof. Renata Felipe, por me dá o privilégio de trabalhar e me apaixonar ainda mais pela área de materiais. Você se tornou uma grande inspiração para mim.

Ao PPgUSRN e todos os professores que o compõe, por compartilharem um pouco seus conhecimentos. Em especial agradeço ao Prof. Valdenildo Pedro pelas contribuições nesse trabalho.

Aos professores Jayna Santos, Régia Lúcia e Renato Samuel por aceitarem gentilmente participarem das bancas de correção desse trabalho, cedendo seu tempo e conhecimento. Certamente, suas colaborações foram e serão valiosas para a melhoria desse trabalho.

Ao IFRN por desde cedo, ainda como CEFET, me proporcionar crescimento intelectual e como pessoa. Como aluna e servidora, posso certificar a qualidade e grandes oportunidades que essa instituição nos presenteia.

RESUMO

O modelo econômico linear adotado pela indústria da construção se baseia no alto consumo de recursos naturais e na grande geração de resíduos, o que fez desse setor um dos principais agentes depreciativos do planeta. Afim de atenuar essa conjuntura, se têm buscado o desenvolvimento de materiais de construção a partir de subprodutos reciclados como alternativa a utilização de recursos naturais. Nesse contexto, a utilização do Agregado Leve de Resíduo de PET (ALRP) como substituto a areia em argamassas pretende ser uma maneira eficiente de conciliar a redução no consumo de agregados naturais pela construção civil e a reutilização de resíduos plásticos de PET (polietileno tereftalato) mitigando o impacto gerado pelo seu descarte. Embora essa proposta tenha inicialmente alcançado bom desempenho em trabalhos anteriores, existem lacunas quanto ao conhecimento de sua durabilidade, impossibilitando sua utilização e comprometendo sua sustentabilidade. Diante desse contexto, essa pesquisa tem como objetivo produzir argamassas cimentícias para uso como revestimento externo em camada única, utilizando taxas de substituição de 5% e 10% de areia por ALRP e avaliar seu comportamento mecânico e físico como resultado à aplicação de processos de envelhecimento natural e acelerado. Para isso foram confeccionados corpos de prova de argamassas com taxas de 0%, 5% e 10% de substituição de areia por ALRP, as quais foram submetidas aos processos de envelhecimento acelerado e natural. Posterior aos processos, foram realizados ensaios para a determinação dos indicadores de degradação, sendo estes comparados aos valores obtidos pelos corpos de prova sem envelhecimento. Os resultados indicam que as argamassas com ALRP sem envelhecimento obtiveram melhores valores de consistência, densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico, porém pequeno aumento nas taxas de absorção por capilaridade e reduções nas resistências à tração. O processo de envelhecimento natural acarretou o aumento nos valores de densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração e compressão. O envelhecimento acelerado proporcionou o aumento nos índices de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade. Através desses resultados foi possível verificar a viabilidade técnica da substituição parcial de areia pelo ALRP em argamassas para revestimento externo, como forma de mitigar os impactos associados a exploração excessiva de agregados naturais e a intensa geração de resíduos plásticos.

Palavras-chave: Agregado Leve de Resíduo de PET (ALRP). Compósito. Envelhecimento.

ABSTRACT

The linear economic model adopted by this sector, which is based on the high consumption of natural resources and large waste generation, has made it one of the main derogatory agents on the planet. In order to alleviate this current situation, the development of new building materials from recycled by-products as an alternative to natural resources has been sought. In this context, the use of Lightweight PET Waste Aggregate (LPWA) as a substitute for natural sand in external coating mortars is intended to be an efficient way to reconcile the reduction in the consumption of natural aggregates by civil construction and the reuse of PET plastic waste (polyethylene terephthalate). Although the proposal has initially achieved good performance, there are gaps in the knowledge of its durability, making its use impossible and compromising its sustainability. Given this context, this research aims to develop cementitious mortars for use as an external coating in a single layer, using replacement rates of 5% and 10% of sand by LPWA and to evaluate their mechanical and physical behavior as a result of the application of aging processes natural and accelerated. For this purpose, samples of mortar with rates of 0%, 5% and 10% of sand replacement by LPWA were prepared, which were subjected to accelerated and natural aging processes. After the processes, tests were carried out to determine the degradation indicators, which were compared to the values obtained by the samples without aging. The results indicate that the mortars with LPWA without aging had better values of consistency, bulk density and dynamic modulus of elasticity, but small increase in capillary absorption rates and reductions in tensile strength. The natural aging process led to an increase in the values of bulk density, dynamic modulus of elasticity and tensile and compression strength. Accelerated aging provided an increase in capillary water absorption rates and capillary coefficient. Accelerated aging provided an increase in capillary water absorption rates and capillary coefficient. Through these results, it was possible to verify the technical feasibility of partial replacement of sand by LPWA in mortars for external coating, as a way to mitigate the impacts associated with the overexploitation of natural aggregates and the intense generation of plastic waste

Keywords: Lightweight PET Residue Aggregate. Composite. Aging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos compósitos	19
Figura 2 – Representação da microestrutura de argamassas no estado fresco	20
Figura 3 – Tipos de argamassas de revestimento de parede	22
Quadro 1 – Classificação das argamassas por função que desempenha.....	21
Quadro 2 – Procedência dos agentes de degradação	23
Figura 4 – Fluxograma do esquema metodológico	31
Figura 5 – (a) Ensaio de finura do cimento; (b) Ensaio de massa específica do cimento	32
Figura 6 – Agregado natural utilizado – areia	33
Figura 7 – Agregado plástico utilizado – ALRP	33
Figura 8 – Ensaio de índice de consistência, (a) Enchimento do cone; (b) Medição de espalhamento	35
Figura 9 – Medições, (a) comprimento; (b) largura; (c) altura; (d) massa das amostras.....	37
Figura 10 – Medição do módulo de elasticidade dinâmico: (a) aplicação do gel; (b) medição da velocidade do pulso	38
Figura 11 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	39
Figura 12 – (a) Representação de dispositivo de carga para ensaio de resistência à tração na flexão; (b) Dispositivo de carga para ensaio de resistência à tração na flexão.....	40
Figura 13 – (a) Representação de dispositivo de carga para ensaio de resistência à compressão; (b) Dispositivo de carga para ensaio de resistência à compressão	41
Figura 14 – Câmara de envelhecimento acelerado.....	43
Figura 15 – Corpos de prova no suporte para submissão ao processo de envelhecimento acelerado.....	43
Figura 16 – Sistema de envelhecimento natural.....	44
Figura 17 – Tela de cadastro no portal INPI.....	46
Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado natural – areia.....	48

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado plástico – ALRP.....	48
Gráfico 3 – Índice de consistência dos traços.....	49
Figura 18 – Corpos de prova antes da exposição ao envelhecimento acelerado.....	50
Figura 19 – Corpos de prova após exposição ao envelhecimento acelerado.....	51
Figura 20 – Corpos de prova antes da exposição ao envelhecimento natural.....	52
Figura 21 – Corpos de prova após exposição ao envelhecimento natural.....	52
Gráfico 4 – Densidade de massa aparente no estado endurecido dos traços.....	54
Gráfico 5 – Módulo de elasticidade dinâmico dos traços.....	57
Figura 22 – Corpos de prova após finalização do ensaio de capilaridade – grupo 2 (envelhecimento natural).....	59
Figura 23 – Corpos de prova após finalização do ensaio de capilaridade – grupo 3 (envelhecimento acelerado).....	60
Gráfico 6 – Absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos.....	60
Gráfico 7 – Absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos.....	61
Gráfico 8 – Coeficiente de capilaridade dos traços.....	63
Gráfico 9 – Resistência à tração na flexão dos traços.....	66
Figura 24 – Característica da fratura dos corpos de prova sem envelhecimento: (TR) sem resíduo; (TR5%) com 5% de ALRP; (TR10%) com 10% de ALRP.....	67
Figura 25 – Característica da fratura dos corpos de prova com envelhecimento natural: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP.....	68
Figura 26 – Característica da fratura dos corpos de prova com envelhecimento acelerado: (TR) sem resíduo; (TR5%) com 5% de ALRP; (TR10%) com 10% de ALRP.....	68
Gráfico 10 – Resistência à compressão dos traços.....	70
Figura 27 – Característica da fratura na compressão dos CPs sem envelhecimento: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP.....	72
Figura 28 – Característica da fratura na compressão dos CPs com envelhecimento natural: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP.....	73

Figura 29 – Característica da fratura na compressão dos CPs com envelhecimento acelerado:
(TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura e traços a serem confeccionados	34
Tabela 2 – Informações dos grupos de amostras	36
Tabela 3 – Dados de ensaios de caracterização de agregados	47
Tabela 4 – Índice de consistência dos traços	49
Tabela 5 – Densidade de massa aparente dos traços	53
Tabela 6 – Classificação de argamassas em função da densidade de massa aparente no estado endurecido	55
Tabela 7 – Módulo de elasticidade dinâmico	56
Tabela 8 – Absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos	58
Tabela 9 – Absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos	58
Tabela 10 – Coeficiente de capilaridade dos traços.....	61
Tabela 11 – Classificação de argamassas em função do coeficiente de capilaridade.....	63
Tabela 12 – Resistência à tração na flexão	64
Tabela 13 – Classificação de argamassas em função da resistência à tração na flexão.....	66
Tabela 14 – Resistência à compressão.....	69
Tabela 15 – Classificação em função da resistência à compressão	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS	17
3.1.1 A durabilidade e a sustentabilidade	17
3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	18
3.2.1 Revestimentos externos argamassados	20
3.2.1.1 Degradação e seus agentes	22
3.2.1.2 Métodos de avaliação de durabilidade em argamassas	24
3.3 PLÁSTICO E SEUS IMPACTOS À SOCIEDADE	25
3.3.1 Impactos socioambientais	25
3.3.2.1 Reciclagem de resíduos PET	27
3.4 PRODUÇÕES DE ARGAMASSAS COM AGREGADO DE PET	28
4 METODOLOGIA	30
4.1 ETAPA 2: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	32
4.2 ETAPA 3: MOLDAGENS E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	34
4.2.1 Índice de Consistência	35
4.2.2 Determinação de indicadores de degradação	35
4.2.3 Processos de envelhecimento	42
4.3 ETAPA 4: TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	45
4.3.1 Registro de Patente de Invenção	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	47
5.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	48
5.3 PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO	50
5.3.1 Acelerado	50
5.3.2 Natural	51
5.4 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO	53
5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	55
5.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDAD	58
5.7.1 Resistência à tração na flexão	64
5.7.1.1 Caracterização Morfológica da Fratura	67
5.7.2 Resistência a compressão	69
5.7.2.1 Caracterização Morfológica da Fratura	71

5.8 PRODUTO TÉCNICO: REGISTRO DE PATENTE DE INVENÇÃO	74
6 CONCLUSÃO	76
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A — PLANILHA DE DADOS EXPERIMENTAIS – TRAÇO TR	87
APÊNDICE B — PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	88
APÊNDICE C — DOCUMENTAÇÃO DE ENTRADA DE PETIÇÃO DE PATENTE	89

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a questão ambiental ganha destaque frente as inquietações mundiais. Grandes volumes de recursos naturais são utilizados na indústria, comércio e construção, e somado a isso, a alta taxa de geração de resíduos acarreta a degradação do solo e poluição da água e do ar.

A areia é um agregado natural formado pela da erosão de rochas por milhares de anos (EUROPEAN COMMISSION, 2014), com ampla utilização na construção civil mundial como componente de concretos, argamassas e cerâmicas. Há registros da utilização de areia desde as mais remotas épocas, como na confecção de blocos utilizados nas pirâmides egípcias (GAVRILETEA, 2019), sendo hoje o segundo recurso natural mais consumido do planeta, menor apenas que o consumo de água (TORRES; BRANDT; LIU, 2017).

Embora a areia ainda seja um recurso de baixo custo e de grande oferta, a *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2019), através de uma cartilha intitulada "*Sand and sustainability: finding new solutions for environmental governance*", alerta para uma futura escassez desse recurso natural. Tal preocupação ocorre devido a taxa de extração das areias naturais está excedendo a taxa de reabastecimento, sendo estimados que 40 a 50 bilhões de toneladas de agregados naturais (rochas, areia e cascalho) são extraídos a cada ano. A indústria da construção consome anualmente mais da metade desse volume — 25,9 a 29,6 bilhões de toneladas em 2012 (UNEP, 2019).

A UNEP ainda ratifica a importância do volume de recursos naturais utilizados na produção de materiais cimentícios — como concretos e argamassas, já que por volta de 65% do total produzido é composto por agregados naturais, sendo que a areia representa 25% desse valor (UNEP, 2019). Além disso, a exploração dos agregados naturais que são muitas vezes ilegais, ameaça a segurança dos trabalhadores do setor, moradores das regiões exploradas e dos ecossistemas ribeirinhos e marinhos, além da água doce e a biodiversidade local.

Por outro lado, surgem problemas relacionados aos resíduos plásticos, que se tornou um ponto importante na gestão de resíduos devido a sua elevada produção e consumo (ALMEIDA *et al.*, 2021). Além disso, sua característica não biodegradável acarreta sua eliminação inapropriada resultando em grandes volumes de resíduos acumulados no meio ambiente, como em rios, aterros ou queimados livremente causando contaminantes tóxicos (MANSOUR; ALI, 2015; ZHANG *et al.*, 2021).

Se estima que quase metade do resíduo plástico gerado mundialmente seja oriundo de embalagens (RITCHIE; ROSER, 2018), sendo a maior parte confeccionados a partir de

Polietileno Terifitalado (PET) (CHU *et al.*, 2021). Essa atual conjuntura resulta de um consumo de um milhão de garrafas plásticas de PET por minuto, sendo previsto de que até 2021 esse número cresça 20% (LAVILLE; TAYLOR, 2017). No Brasil, entre os anos de 2000 e 2016, houve um aumento de 229,4% no consumo de garrafas PET (ABIPET, 2016).

Embora o PET seja o material com maior taxa de reciclagem no Brasil, ganhando para materiais como aço e alumínio, em 2016 apenas 51% do material PET produzido foi reciclado (ABIPET, 2016). De acordo com os dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2018-2019), 9% do PET produzido possui o lixão como destino final (ABRELPE, 2019), causando poluição no solo por centenas de anos (SAIKIA; BRITO, 2012).

Atualmente, as questões ambientais demandam que a produção industrial caminhe com ações sustentáveis atreladas aos seus processos (SOUZA *et al.*, 2020). Nesse sentido, surge uma busca por soluções econômicas que atenuem os problemas relacionados a exploração excessiva de agregados naturais e da geração de resíduo PET e sua destinação inapropriada, surgindo nas últimas duas décadas pesquisas utilizando o resíduo PET como componente de concretos e argamassas (CHOI *et al.*, 2009; DETOMI *et al.*, 2016; GOUASMI *et al.*, 2016; HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE., 2010; MAHDI; ABBAS; KHAN, 2009; SAFI *et al.*, 2013; SILVA; BRITO), o qual tem sido muitas vezes utilizado como substituto da areia natural (LIMA; FELIPE; FELIPE, 2021).

As argamassas são aplicadas amplamente no setor da construção civil (BEZERRA NETO, 2018), estando entre os primeiros materiais utilizados nas construções desde os tempos pré-históricos (STEFANIDOU; PAPAYIANNI; PACHTA, 2012). São materiais compostos basicamente por uma mistura de agregados miúdos (areia), aglomerantes inorgânicos e água (ABNT, 2005), sendo a criação de argamassas com substituição de areia por Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) uma alternativa já aplicada em pesquisas e avaliada normalmente através de ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão, densidade, módulo de elasticidade e outros (CHOI *et al.*, 2009; DETOMI *et al.*, 2016; GOUASMI *et al.*, 2016; HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE., 2010; SAFI *et al.*, 2013; SILVA; BRITO; VEIGA, 2014). Grande parte das pesquisas comprovam a viabilidade técnica das argamassas cimentícias com uso de ALRP nas primeiras idades com taxas de substituição de até 10%. Entretanto, a revisão da literatura indica uma lacuna quanto a pesquisas que avaliem a durabilidade desse novo material, ou seja, a manutenção do seu desempenho em idades avançadas e sob ação agentes agressores climáticos, não sendo assim analisada a possível sustentabilidade desse material aplicado como revestimento externo em edificações.

Diante disso, o objetivo dessa pesquisa é avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial de areia natural por Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) em argamassas cimentícias para aplicação como revestimento externo em monocamada na construção civil.

2 JUSTIFICATIVA

Diante do atual desafio da sociedade moderna de conciliar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental, o desenvolvimento de novos materiais a partir de subprodutos plásticos reciclados, contribui para a preservação ambiental e a mitigação dos impactos associados a duas problemáticas atuais: a escassez e impactos ambientais gerados pela exploração excessiva de agregados naturais pela construção civil; e os desafios de insustentabilidade acarretados pela intensa geração de resíduos plásticos dispostos inadequadamente no meio ambiente. A realização desse trabalho se justifica pela proposição de um novo compósito — novo por se tratar de uma proposta pouca aplicada em artigos publicados e inexistente em solicitação de patente nacional, o qual tem potencial de promover à redução do consumo de areia natural, a reciclagem e adição de resíduos de material PET às argamassas cimentícias de revestimento externo aplicado como camada única. Apresentando adequado desempenho e durabilidade, esse material pode ser integrado aos demais utilizados pelo setor da construção civil, dessa vez, de forma mais sustentável pela comprovação direta de sua durabilidade obtida através dos processos de envelhecimento natural e acelerado, com aplicação inédita nesse material.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

A sustentabilidade se torna cada vez mais relevante na área da construção civil. A Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) define construção sustentável como um conjunto de práticas que buscam a qualidade nos âmbitos econômico, social e ambiental, através de processos como a racionalização de recursos naturais e gerenciamento de resíduos gerados (OECD, 2002).

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável desenvolvida e adotada pelos membros da Organização das Nações Unidas é composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que abrange temas ligados às dimensões ambiental, social, econômica e institucional do desenvolvimento sustentável (KRONEMBERGER, 2019). De acordo com a *Green Building Council* Brasil (2020) a contribuição de construções sustentáveis aos ODS é significativa, podendo englobar 9 dos 17 objetivos, entre eles: Saúde e Bem-Estar; Trabalho Decente e Crescimento Econômico; Indústria, Inovação e Infraestrutura e Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Os materiais de construção são um importante instrumento na obtenção de construções sustentáveis. Ações importantes para a sustentabilidade dos materiais é reutilizar ou reciclar um outro material tornando um produto de construção, não deixando de atender ao nível de satisfação do usuário e as normas técnicas aplicáveis (AKADIRI; OLOMOLAIYE; CHINYIO, 2013). Estes devem atender sua função logo após instalados e ao longo de sua vida útil, podendo esse tempo de vida útil ser influenciado pelas condições ambientais a qual esteja submetido e as propriedades intrínsecas do material (JOHN; CLEMENTS-CROOME; JERONIMIDIS, 2005; MEDINECKIENE; ZAVADSKAS; TURSKIS, 2011).

3.1.1 A durabilidade e a sustentabilidade

Durabilidade é a capacidade de uma construção ou de seus componentes para executar as funções exigidas por um período de tempo, sem imprevistos com custo de manutenção ou reparo (SINHA; GUPTA; KUTNAR, 2013). A durabilidade ainda pode ser definida como um indicador que informa em que medida um material mantém seus requisitos originais ao longo do tempo (MORA, 2007).

Existe uma estrita ligação entre durabilidade e sustentabilidade de um produto (NICOLELLA *et al.*, 2019). Em alguns idiomas como holandês, finlandês ou romeno o termo sustentável é traduzido como durável (BOURDEAU, 1999). Dessa forma, materiais de baixa durabilidade, não importa quão eficientemente produzido, dificilmente serão qualificados como “verdes” (SINHA; GUPTA; KUTNAR, 2013). Diante da estreita relação entre os termos, a sustentabilidade de um edifício pode ser aprimorada aumentando a durabilidade de seus componentes (MALHOLTRA, 2002). Os materiais com maior vida útil precisam ser substituídos ou reparados com menor frequência, reduzindo assim, os recursos necessários para a fabricação, instalação e mão de obra, além disso, produzirão menos resíduos em aterros ao longo da vida útil do edifício (DE SILVA *et al.*, 2004).

A durabilidade não é uma qualidade intrínseca a um material. Alterações simples nas composições ou design dos materiais podem aumentar sua vida útil sem necessariamente aumentar sua carga ambiental (JOHN; AGOPYAN; SJOSTROM, 2002).

3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são aqueles materiais formados pela combinação de pelo menos dois macros constituintes, de forma que após a mistura, ainda se possa os identificar, ou seja, sejam absolutamente insolúveis um no outro, e cujas propriedades da mistura sejam superiores aos dos materiais constituintes (SANTIAGO, 2002; SCHWARTS, 1984).

Os compósitos são formados por duas fases, sendo uma chamada matriz, que é a fase contínua e a outra dispersa ou reforço. Sendo assim, a função do reforço é melhorar as propriedades mecânicas como dureza, resistência à tração, tenacidade e rigidez, enquanto que a matriz tem como uma das funções proteger o material de reforço contra abrasão e intemperes, além de transferir e distribuir as solicitações mecânicas para o material de reforço. (MACEDO NETO, 2017; SILVA *et al.* 2021). A fase dispersa consiste em fibras e/ou partículas, podendo ser classificadas conforme a sua orientação no compósito, mediante esquema mostrado na Figura 1 (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Ainda de acordo com Felipe (2012) os compósitos podem ser também classificados segundo a natureza da matriz que podem ser do tipo cerâmica, metálica ou polimérica.

Figura 1 - Classificação dos compósitos



Fonte: Adaptado de Levy Neto e Pardini (2006).

Os compósitos surgem de uma recente demanda na melhoria dos materiais, de forma que muitas das recentes inovações industriais só foram permitidas devido aos materiais compósitos (BARROS, 2019; LIMA; FELIPE; FELIPE, 2021), que permitem ser aplicados de diversas formas e em diversos setores, já que apresentam características variadas como desempenho estrutural, preço e disponibilidade (FELIPE *et al.*, 2019).

Os compósitos de matrizes cerâmicas são os mais amplamente utilizados em construções, sendo representado pelos concretos e argamassas. Conforme Zhang *et al.* (2020) o compósito cimentício é o material de engenharia mais utilizado no mundo. O autor ainda estima que a longo prazo o material compósito a base de cimento deverá continuar nesse patamar, já que grandes países como Índia e China preveem a duplicação em seu consumo nas próximas décadas. Nesses materiais normalmente é utilizado como aglomerante¹ o cimento Portland, que quando misturado à água atua como uma fase de colagem que aglutina os agregados² envolvidos na mistura (CALLISTER JUNIOR, 2002).

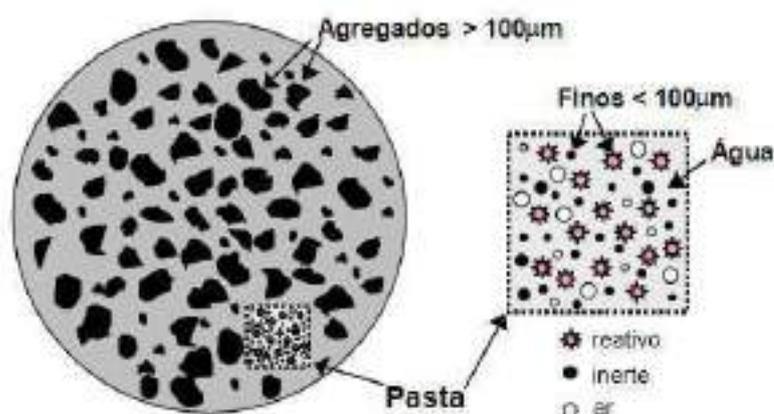
¹ Material ativo, ligante, em geral pulverulento, cuja principal função é formar uma pasta que promove a união entre os grãos do agregado (ROSÁRIO, 2016).

² Material granular geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto (ABNT, 2011).

3.2.1 Revestimentos externos argamassados

Um dos compósitos amplamente utilizados na construção são as argamassas, que são definidas como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, cujas propriedades permitam seu endurecimento e aderência ao substrato (ABNT, 2005) (FIGURA 2).

Figura 2 – Representação da microestrutura de argamassas no estado fresco



Fonte: Cardoso (2009).

As propriedades exigidas das argamassas variam conforme a função que ela desempenha na edificação. De acordo com Carasek (2007), elas podem ser de assentamento de alvenaria de vedação ou estrutural, revestimentos de parede e tetos, revestimentos de piso, revestimentos cerâmicos e de recuperação de estrutura (QUADRO 1).

Quadro 1 – Classificação das argamassas por função que desempenha

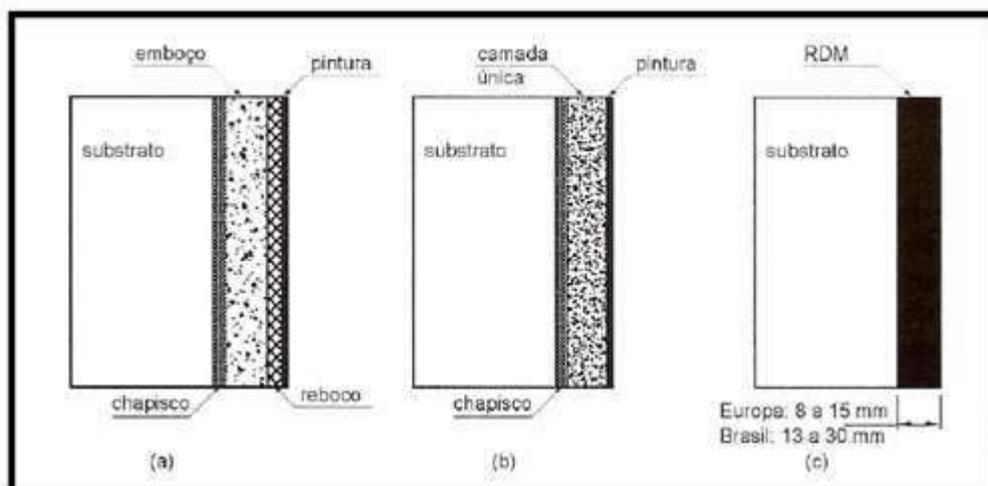
Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) - alv. de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante
	Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Adaptado de Carasek (2007).

Em virtude de atuar como importante elemento estético e de proteção, as argamassas de revestimento aplicadas em paredes externas ganham ênfase no setor construtivo. Esses revestimentos constituem camadas de proteção de uma base aos agentes agressivos, além disso, devem garantir o bom acabamento, absorver as deformações naturais que a estrutura está submetida e contribuir para o seu isolamento termo acústico e estanqueidade (RECENA, 2012). De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), revestimentos argamassados com espessura entre 30% e 40% da espessura da parede podem contribuir em 100% com a estanqueidade de uma alvenaria, afetando diretamente a durabilidade dos substratos a elas aderidas (ABCP, 2002).

Conforme classificação de Carasek (2007) as argamassas de revestimentos de paredes podem ser classificadas em argamassa de chapisco, emboço, reboco, camada única e revestimento decorativo monocamada (RDM) (FIGURA 03).

Figura 3 –Tipos de argamassas de revestimento de parede



Fonte: Carasek (2007).

Na região nordeste brasileira os sistemas de camada única são amplamente utilizados, onde o revestimento em argamassa possui acabamento final em pintura e cumpre a função de regularização e acabamento (ANTUNES, 2010).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da emissão de normas técnicas regulamenta a produção, uso e circulação das argamassas de revestimento no Brasil. Por meio de uma série de normas, a ABNT padroniza os ensaios de caracterização das argamassas, bem como especifica os requisitos de classificação. A ABNT NBR 13281 classifica as argamassas de revestimento em função de propriedades do material como densidade de massa aparente no estado endurecido e coeficiente de capilaridade (ABNT, 2005).

3.2.1.1 Degradação e seus agentes

Revestimentos argamassados externos são elementos construtivos altamente susceptíveis a degradação ambiental, muito em virtude da exposição aos diversos fatores climáticos externos como radiação solar extrema, variação brusca de temperatura e poluição (JELLE, 2012). Estudos indicam que esses elementos estão entre os mais afetados por patologias, representando juntamente com as coberturas mais de 50% do total de registros (FREITAS; ALVEZ; SOUZA, 2007). Além disso, devido sua função prioritariamente protetiva, a degradação dos revestimentos externos normalmente desencadeia uma série de outros problemas à construção, como a redução de sua eficiência energética (ELEFTherIADIS; HAMDY, 2017) e estanqueidade e aumento em custos e geração de

resíduos. Dessa forma, por cumprir uma valiosa função quanto a sustentabilidade das construções, os revestimentos argamassados externos devem prioritariamente atender seus requisitos de durabilidade.

Para avaliar a durabilidade de um revestimento é necessário identificar seus componentes e as agressões que irão afetá-lo (PEREIRA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018), haja visto que cada material utilizado terá diferentes resistências em função dos fatores de exposição que estejam sujeitos (JELLE, 2012). Os elementos ou condições que atuam de forma deletéria nos materiais são denominados agentes de degradação. A identificação desses agentes é uma tarefa complexa, já que são particulares para cada edifício ou mesmo para cada região em análise, além disso, atuam em ação conjunta com vários agentes, o que dificulta ainda mais a identificação dos mecanismos de degradação atuantes. A ISO 15686-1 (2011) apresenta as classes dos agentes de degradação de materiais dos elementos construtivos em função de sua procedência (QUADRO 2).

Quadro 2 – Procedência dos agentes de degradação

Procedência	Classe
Provenientes da atmosfera	Água no estado líquido
	Umidade
	Temperatura
	Radiação solar - radiação ultravioleta
	Gases de oxigênio
	Ácido sulfúrico
	Gases ácidos
	Bactérias, insetos
	Vento com partículas em suspensão
Provenientes do solo	Sulfatos
	Cloretos
	Fungos
	Bactérias
	Insetos
Provenientes ao uso	Esforços de manobra
	Agentes químicos normais e uso doméstico
Provenientes do projeto	Compatibilidade química
	Compatibilidade física
	Cargas permanentes e periódicas

Fonte: Adaptado de ISO 15686-1 (2011).

Normalmente a degradação em revestimentos externos são decorrentes de fatores de exposição climática (JELLE, 2012), de forma que os fenômenos provenientes da atmosfera são os mais agressivos. Segundo a ASTM E632-82 (1996), a radiação, temperatura, chuva e outras formas de água, gelo, degelo e constituintes normais do ar e seus poluentes e ventos são os grupos de fatores associados com o ambiente natural.

3.2.1.2 Métodos de avaliação de durabilidade em argamassas

A durabilidade de um material pode ser avaliada diretamente a partir de três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado, ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso (JOHN; AGOPYAN; PRADO, 1997).

No ensaio de envelhecimento natural, os materiais são expostos aos fatores de degradação climáticos naturais, aos quais seriam submetidos durante seu uso. Os agentes agressivos agem simultaneamente e estão em sua intensidade normal da região estudada. Nesse processo, não se tem controle da intensidade desses agentes, já que o clima é variável (AKERS; STUDINKA, 1989; BENTUR; AKERS, 1989).

No ensaio de envelhecimento acelerado o objetivo é simular as condições de serviço e que possam ocasionar o processo de degradação, através de ciclos repetitivos de submissão do material aos agentes de agressão, de modo a obter dados de envelhecimento do material em curtos prazos e condições controladas, que em condições naturais se prolongaria por longos períodos. De acordo com Souza (2011) a correlação desses dados com os de envelhecimento natural é difícil, tornando sua maior utilização na comparação das propriedades dos materiais. As propriedades mensuráveis usadas para medir o avanço da queda de desempenho do material são chamadas de indicadores de degradação, e devem ser aferidas após cada período de envelhecimento (JOHN *et al.*, 2011).

Os ensaios realizados para verificação da deterioração em uso, são os mais eficazes, visto que o material é exposto em condições reais de exposição, conformação e de interação com outros sistemas construtivos (CALDAS E SILVA; JR; JOHN, 2009), entretanto também demandam longo tempo de exposição e um elevado custo associado à sua aplicação.

Quando se trata de suas características intrínsecas, a durabilidade da argamassa normalmente está associada à sua estanqueidade e capacidade de absorção de deformações. A estanqueidade está relacionada à absorção capilar de sua estrutura porosa que possibilita a ação direta de agentes agressivos no material, já a capacidade de absorver deformações, sem que haja a sua ruptura, fissuração ou perda de aderência, é governada pelo módulo de

elasticidade e resistência à tração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

3.3 PLÁSTICO E SEUS IMPACTOS À SOCIEDADE

O maior número de materiais poliméricos se enquadra na classificação de plásticos (CALLISTER JUNIOR, 2002), sendo ele considerado uma das mais importantes inovações do século 20 (SAIKIA; BRITO, 2012). A produção do plástico cresce cerca de 9% ao ano (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014), atingindo em 2019 uma produção global de 360 milhões de toneladas, sendo previsto um crescimento para até 12.000 milhões de toneladas até 2050 (LI *et al.*, 2021).

As resinas, conhecidas industrialmente como plásticos, dominam as aplicações mais usuais, como embalagens de alimentos e outros; sendo exemplos: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o polietileno tereftalato (PET) (LEBRETON; ANDRADY, 2019).

Embora esses materiais possuam diversas características convenientes, ele demanda uma elevada taxa de combustível para sua confecção — aproximadamente 4% do combustível fóssil extraído no mundo (LEBRETON; ANDRADY, 2019). Além disso, estimativas atuais assumem que apenas 9% dos resíduos plásticos foram reciclados em todo o mundo em 2015 (VOGEL *et al.*, 2021). Conquanto altamente utilizados e pouco reciclados, os plásticos são materiais compostos por diversos produtos químicos tóxicos, sendo então, um agente poluidor e de natureza não biodegradável, cuja destinação do seu resíduo em aterros significaria preservar um material nocivo por centenas de anos (SAIKIA; BRITO, 2012).

3.3.1 Impactos socioambientais

As partículas plásticas com dimensão inferior a 5 mm são denominadas microplásticos, e essas tem atraído especial atenção dos estudiosos em virtude de estudos apontarem sua presença na atmosfera, água, solo e biota (DE FELICE *et al.*, 2021; OSTLE *et al.*, 2019), além de apresentar potencial ameaça à saúde humana.

A poluição marinha com partículas de microplásticos, por exemplo, faz com que os alimentos que são retirados desse meio, sejam poluídos; e uma vez o homem o consumindo, será contaminado. Foi verificada uma taxa de contaminação por microplásticos de 94% dos sais de cozinha testados em pesquisas no mundo todo, apresentando taxas de contaminação

com 3 polímeros - polietileno tereftalato, polipropileno e polietileno (LEE *et al.*, 2019). Em média os sais de cozinha contêm 140,2 partículas de microplásticos por quilograma de produto, podendo concluir que os seres humanos ingerem anualmente uma média de 525 partículas microplásticas apenas no sal de cozinha. De acordo com Lee *et al.* (2019) ainda não existe um consenso sobre a existência dos riscos à saúde e a quantidade de ingestão de microplásticos que pode ser considerada prejudicial.

Além da contaminação via alimentar, pesquisas revelaram que microplásticos suspensos na atmosfera podem representar uma ameaça à saúde humana por poder entrar em contato direto com órgãos respiratórios e se acumular no pulmão resultando em doenças crônicas. Na China foi verificado que em média uma criança inala 17.300 nanogramas por quilograma de massa corporal de fibra de microplástico de PET em apenas um dia (ABBASI *et al.*, 2019). Durante junho de 2019 em Xangai, a maior parte dos microplástico suspensos no ar – 51% do total, consistia em fragmentos plásticos de polietileno tereftalato (PET) (LIU *et al.*, 2019).

Além de impactos aos seres humanos, a introdução de plásticos no meio ambiente representa um grande desafio aos ecossistemas (TROTTER *et al.*, 2019). Afirmam Ostle *et al.* (2019) que 90% do lixo que flutua nos oceanos é constituído por resíduos plásticos e que mais de 8 milhões de toneladas desse material chega aos oceanos a cada ano, sendo a previsão de que até 2050 haverá mais materiais plásticos que peixes nos oceanos e que 99% das aves marinhas terão ingerido resíduo plástico. De acordo com a ficha informativa “*The ocean conference united nations*” o lixo plástico mata até um milhão de aves marinhas, cem mil mamíferos marinhos, tartarugas marinhas e inúmeros peixes a cada ano (UNITED NATIONS, 2017).

Através de pesquisa realizada em 2019, foi possível concluir que a contaminação com macro e microplásticos em habitats aquáticos produz a redução da taxa de crescimento, fecundidade e expectativa de vida em animais, além de poder reduzir características defensivas de organismos (TROTTER *et al.*, 2019). Além disso, uma pesquisa indicou que a exposição ao lixiviado de resíduos plásticos prejudica o crescimento e a capacidade fotossintética do *Prochlorococcus* marinho, considerado o organismo fotossintético mais abundante da terra e importante contribuinte para a produção do oxigênio e consumo de carbono do planeta (TETU *et al.*, 2019). A presença de microplásticos no solo também pode causar efeitos em organismos terrestres como em minhocas, ácaros e caramujos, onde sua ingestão pode ocasionar prejuízos como dano tecidual, alterações na taxa de crescimento e até a morte (DE FELICE *et al.*, 2021).

3.3.2 Polietileno tereftalato (PET)

Desde sua descoberta em 1941, o polietileno tereftalato (PET) se tornou um dos plásticos mais importantes e amplamente utilizados na atualidade (DJAPOVIC *et al.*, 2021; KIM *et al.*, 2010). Se trata de um poliéster termoplástico semicristalino, que devido a suas propriedades bem caracterizadas, como resistência à tração, leveza e facilidade de manuseio e armazenamento, é empregado como matéria prima para confecção de garrafas e embalagens da maioria dos produtos comestíveis (FRIGIONE, 2010; XIN *et al.*, 2021). Devido a seu grande consumo, cresce a preocupação quanto aos impactos ambientais e sociais ocasionados pelo seu resíduo, já que sua elevada resistência a agentes atmosféricos e biológicos (REIS; CARNEIRO, 2012) faz com que necessitem mais de cem anos para sua degradação (SILVA *et al.*, 2005).

3.3.2.1 Reciclagem de resíduos PET

Entre os anos de 1960 e 1970 surge por parte de movimentos ambientalistas a preocupação quanto ao “lixo” gerado pela sociedade moderna, que resultou em uma solução com a hierarquização das prioridades de práticas de gestão de resíduos sólidos que ficou conhecida como os 3Rs: reduzir, reutilizar e reciclar. De acordo esse princípio, o primeiro R indica a priorização na redução do seu consumo, o segundo R trata da reutilização dos materiais de forma que não seja necessária seu reprocessamento industrial e o terceiro R sugere a utilização de resíduos como matéria-prima para a fabricação de novos produtos, dando origem assim, a circularidade da economia e com isso a redução do volume de resíduos gerados e diminuição da necessidade de novos recursos nos processos de produção, além de representar oportunidades econômicas potenciais (CANDIDO, 2016; LÓPEZ RUIZ, 2020).

De acordo com a ABIPET (2016), a reciclagem do PET colabora não apenas com a preservação ambiental, mas atua plenamente nos três pilares do desenvolvimento sustentável que são: benefícios ambientais, sociais e econômicos. A reciclagem de embalagens PET pós-consumo criou em menos de 20 anos um forte setor industrial no Brasil, representando um terço do faturamento de toda a indústria brasileira do PET, gerando impostos, empregos e renda a população. O último censo de reciclagem PET realizado no Brasil em 2016 indica que 28,6% desse resíduo reciclado é destinado a indústria de resinas insaturadas e alquídicas, 25,7% à indústria têxtil, 25,7% à indústria de embalagem, 8,6% à indústria de laminas e chapas, 5,7% à indústria de fitas de arquear e 5,7% a outros setores. Contudo, a demanda ainda é limitada

pela escassez de empresas que forneçam material de qualidade (SILVA; LINS; COTTING, 2019), ou seja, esse setor possui grande potencial de crescimento para os próximos anos.

3.4 PRODUÇÕES DE ARGAMASSAS COM AGREGADO DE PET

Na literatura é possível encontrar revisões sobre a utilização de resíduos de PET em materiais de construção (LIMA; FELIPE; FELIPE, 2020; SIDDIQUE; KHATIB; KAUR, 2008; SULYMAN; HAPONIUK; FORMELA, 2016), ou mais especificamente em produtos cimentícios (SAIKIA; BRITO, 2012). Foram realizadas pesquisas nas bases de dados *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, utilizando os descritores *waste*, PET e *mortar*, de forma que foram localizados seis artigos de acesso livre, que tratam de pesquisas de substituição de areia natural por ALRP em argamassas cimentícias (CHOI *et al.*, 2009; DETOMI *et al.*, 2016; GOUASMI *et al.*, 2016; HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE, 2010; SAFI *et al.*, 2013; SILVA; BRITO; VEIGA, 2014). Com os dados obtidos foi produzido um *review* intitulado “*Cement mortars with use of polyethylene tereftalate aggregate: a review on its sustainability*” publicado no volume 09, número 08, do ano de 2020, da Revista *Research, Society and Development* ISSN 2525-3409. Abaixo serão descritas algumas das informações presentes no texto, cujas informações serviram de base à pesquisa em desenvolvimento.

Choi *et al.* (2009) identificaram o aumento linear do índice de consistência em função do incremento de ALRP na mistura. De acordo com os autores essa tendência ocorreu devido a forma do agregado PET, que diminuiu o atrito interno entre ele e a pasta de cimento, tornando o material mais fluido. Silva, Brito e Veiga (2014) verificaram que a substituição de até 15% da areia natural pelo ALRP não influenciou significativamente na consistência da argamassa.

Safi *et al.* (2013) determinaram as massas aparentes dos corpos de prova com 28 dias de idade, sendo verificada a redução desses valores nas argamassas com substituições. De acordo com os autores, essa redução ocorreu devido a densidade do agregado plástico ser até 70% inferior ao da areia natural.

Silva, Brito e Veiga (2014) verificaram a tendência de redução nos valores do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas endurecidas em função do incremento de ALRP nos traços.

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) verificaram a redução da resistência à compressão e à tração aos 28 dias de idade em função do incremento de ALRP, chegando a 69% de redução da resistência à compressão e 17,9% na resistência à tração com o traço de 50% de substituição. Nas amostras com até 10% de substituição de areia por ALRP não foi

observada mudança significativa nas resistências. Através da falha obtida nas amostras durante o ensaio de compressão, os autores verificaram o aumento da ductilidade em função da quantidade de plástico no traço.

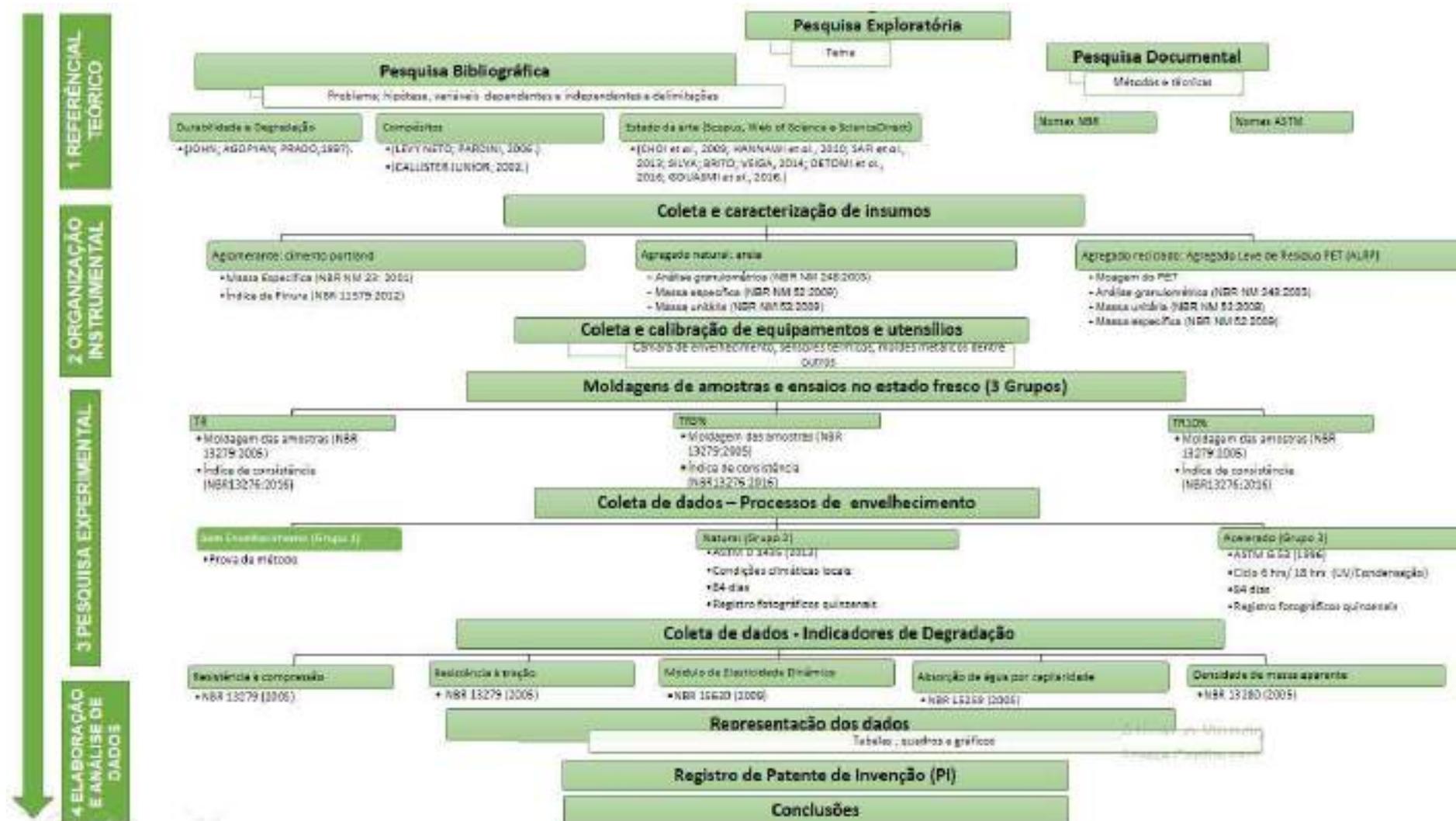
Silva, Brito e Veiga (2014) verificaram a influência do ensaio de envelhecimento acelerado, através de ciclos de aquecimento/resfriamento e umidificação/resfriamento, em corpos de prova de argamassas com uso de ALRP, verificando uma pequena degradação superficial, com redução nos valores de aderência e aumento da permeabilidade à água.

Através da pesquisa de revisão de literatura se verificou a presença de poucos estudos relacionados ao uso de agregados PET em argamassa — seis no total, sendo que dentre eles existe poucos dados a respeito da durabilidade desse material, citada em apenas uma das pesquisas (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014), porém sem nenhuma informação quanto ao seu comportamento sob ação de raios UV ou efeitos da condensação — efeitos naturais agressivos e predominantes no Brasil.

4 METODOLOGIA

O projeto de pesquisa utilizou o esquema metodológico sugerido por Marconi e Lakatos (2014), onde foi iniciada a primeira etapa através a elaboração de pesquisas bibliográficas e documentais, as quais geraram três *reviews*, sendo o primeiro publicado como capítulo de *e-book* e o segundo e terceiro como artigo em revista científica (APÊNDICE B). Após a conclusão das pesquisas foi iniciada a segunda etapa com a organização instrumental através da coleta e caracterização dos insumos e utensílios utilizados. A terceira etapa envolveu a pesquisa experimental incluindo produção dos corpos de prova juntamente com os ensaios no estado fresco e os ensaios para a determinação dos indicadores de degradação nas amostras sem exposição ao envelhecimento (condição inicial), no tempo de 84 dias de envelhecimento acelerado e natural. Na quarta etapa foi realizado o tratamento e análise dos dados recolhidos durante a etapa 3, através da Planilha de Dados Experimentais (APÊNDICE A), e a realização do registro de patente no Instituto de Propriedade Industrial – INPI (APÊNDICE C) da composição de argamassa que apresentou melhor desempenho. Na Figura 4 é apresentado o fluxograma do esquema metodológico adotado em ordem de execução. A etapa 1 foi detalhada na seção 3, sendo as próximas etapas detalhadas nas subseções seguintes.

Figura 4 – Fluxograma do esquema metodológico

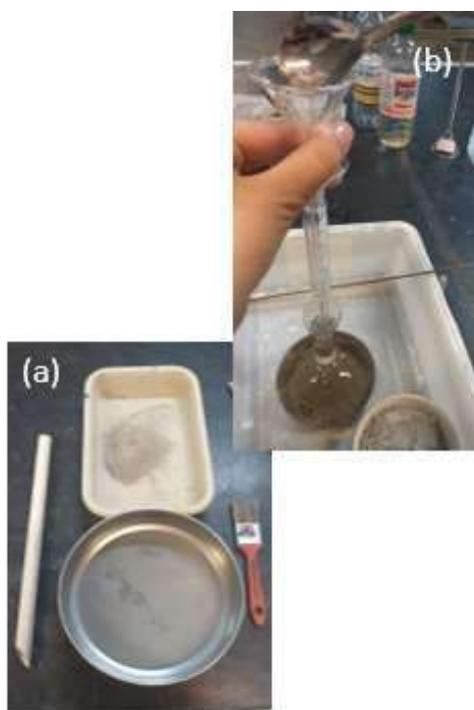


Fonte: Elaboração própria em 2021.

4.1 ETAPA 2: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foi utilizado como aglomerante o cimento CP II F 32 de fabricante *Lafarge Holcim*, geralmente utilizado nas construções da região. Esse material foi submetido ao ensaio de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200), conforme a NBR 11579:2012 (ABNT, 2012) e ao ensaio para determinação da massa específica através do frasco de *Le Chatelier*, conforme prescrito pela NBR 16605:2017 (ABNT, 2017) (FIGURA 5).

Figura 5 – (a) Ensaio de finura do cimento; (b) Ensaio de massa específica do cimento



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Foi usada a areia de quartzo lavada da região de Natal no nordeste brasileiro, sendo então submetida ao ensaio para determinação de sua composição granulométrica de acordo com a NM 248:2003 (ABNT, 2003). Para a produção da mistura foi utilizado o material passante na peneira de abertura 2,36 mm (FIGURA 6), que é a dimensão máxima normatizada pela NBR 7214:2015 (ABNT, 2015) da areia normal utilizada para ensaios de resistência do cimento. Os valores da massa unitária e específica do agregado natural foram determinados conforme procedimentos da NM 45:2006 (ABNT, 2006) e a NBR 9776:1988 (ABNT, 1988), respectivamente.

Figura 6 – Agregado natural utilizado – areia



Fonte: Elaboração própria em 2021.

O Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) foi obtido em empresa de reciclagem da região em forma de fibras de aproximadamente (30 x 2) mm, obtidas a partir da trituração de garrafas PET nas cores transparente e verde. Para obtenção do material em forma de partículas, elas foram trituradas manualmente através de conjunto de lâminas para obtenção de um material com dimensão máxima de 2,36 mm, de forma a manter a dimensão máxima característica da areia natural a ser utilizada nos traços (FIGURA 7). O ensaio para obtenção da curva granulométrica foi realizado conforme NM 248:2003 (ABNT, 2003).

Figura 7– Agregado plástico utilizado – ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Os valores da massa unitária e específica do agregado natural foram determinados conforme procedimentos da NM 45:2006 (ABNT, 2006) e a NBR 9776:1988 (ABNT, 1988), respectivamente.

4.2 ETAPA 3: MOLDAGENS E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A pesquisa de estado da arte apresentada na seção 4.4, mostrou a utilização de traços de relação cimento:areia entre 1:2 e 1:3, sendo então fixado para esta pesquisa a utilização do traço 1:3 (massa), conforme proporção utilizada por Hannawi *et al.* (2010) e relação aglomerante/agregado usualmente utilizada no Brasil (CARASEK, 2010). Em função da análise de composições aplicadas em pesquisas anteriores, bem como de seus positivos resultados (HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE, 2010; DETOMI *et al.*, 2016), foi fixada uma taxa de 0,5 para a relação água/cimento.

Foram confeccionados três traços com 0%, 5% e 10% de substituição em volume de areia natural por ALRP, na faixa granulométrica entre 2,36 e 0,6 mm, mantendo assim a curva granulométrica do agregado natural. As misturas foram realizadas durante quatro minutos em misturador mecânico, conforme procedimento descrito na NBR 1654:2016 (ABNT, 2016). A tabela 1 mostra os traços utilizados.

Tabela 1– Nomenclatura e traços a serem confeccionados

Nomenclatura	Traço (c:a:w) (massa)	Traço (c:a:w) (volume)	a/c
TR	1:3	1:3,39	0,5
TR5%	1:2,85:0,07	1:3,22:0,16	0,5
TR10%	1:2,70:0,14	1:3,04:0,32	0,5

c: cimento; a:areia; w: ALRP.

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Para cada traço foram moldados nove corpos de prova prismáticos nas dimensões de 4x4x16 cm, através de duas camadas de argamassa seguidas de 30 quedas da mesa de consistência, conforme NBR 13279:2005 (ABNT, 2005). Após adensamento e rasamento, eles foram mantidos nos moldes metálicos por 48±24 horas. Posterior a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos nas condições de temperatura de 23±2 °C e umidade de 60±5% por 28 dias.

4.2.1 Índice de consistência

Imediatamente após a finalização da mistura dos traços, foram determinados os índices de consistência conforme NBR 13276:2016 (ABNT, 2016). Para isso, foi cheio o cone metálico padrão com a argamassa através de três camadas, sendo aplicados 15, 10 e 5 golpes respectivamente (FIGURA 8). Após o rasamento o molde foi retirado verticalmente e então acionada a manivela 30 vezes durante 30 segundos e então medido o espalhamento da argamassa através de 3 diâmetros distribuídos no perímetro. O índice de consistência foi obtido pela média dos espalhamentos em mm e arredondada para o inteiro mais próximo.

Figura 8 – Ensaio de índice de consistência, (a) Enchimento do cone; (b) Medição de espalhamento



Fonte: Elaboração própria em 2021.

4.2.2 Determinação de indicadores de degradação

As amostras foram divididas em três grupos compostos por nove corpos de prova, sendo três de cada traço (TR, TR5% e TR10%). Cada grupo foi utilizado para a determinação do desempenho do material através dos seguintes indicadores de degradação: densidade de massa aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade e resistência à tração e à compressão, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Informações dos grupos de amostras

Grupo	Idade (dias)
1	28 (cura) – sem envelhecimento
2	112 (28 dias de cura + 84 dias de envelhecimento natural)
3	112 (28 dias de cura + 84 dias de envelhecimento acelerado)

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Conforme indicado no Tabela 2, as amostras do grupo 1 foram ensaiadas logo após a finalização do período de cura de 28 dias. As amostras do grupo 2 e 3 após o período de cura (28 dias) foram expostas por 84 dias sob condições acelerada e natural de envelhecimento. A seguir serão detalhados os procedimentos para determinação dos indicadores de degradação obtidos.

- Densidade de massa aparente no estado endurecido

Foram utilizados três corpos de prova para a determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme procedimento apresentado na NBR 13280:2005 (ABNT, 2005). Através de paquímetro foi verificada a altura, largura e comprimento de cada corpo de prova em duas posições e então pesados em balança da fabricante Knwaagen com resolução de 0,1g (FIGURA 9). A densidade de massa aparente é a média entre as relações de massa e volume dos corpos de prova em kg/m^3 , arredondando para o número inteiro mais próximo.

Figura 9 – Medições, (a) comprimento; (b) largura; (c) altura; (d) massa das amostras



Fonte: Elaboração própria em 2021.

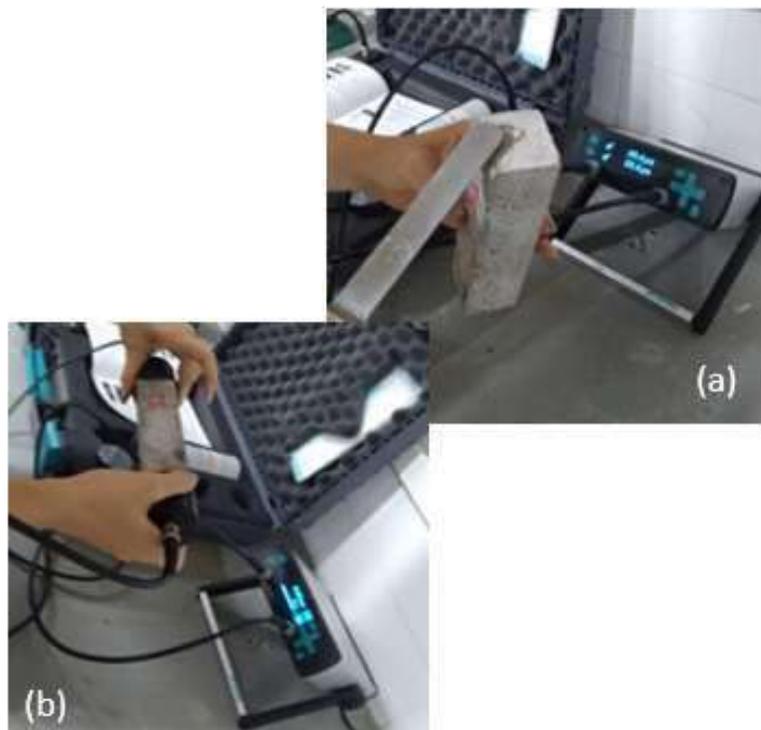
- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Após a finalização do ensaio de massa aparente os mesmos três corpos de prova foram utilizados no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica normatizado pela NBR 15630:2009 (ABNT, 2009).

Foi utilizado o equipamento de ultrassom *Pudit Lab* da fabricante Proceq e o gel condutor para a emissão e verificação da velocidade do pulso nos corpos de prova. O equipamento é composto por um conjunto de transdutores que foram acoplados nos corpos de prova para que fosse efetuada as leituras.

Inicialmente foi colocada uma camada de gel nas superfícies dos transdutores de forma que haja extravasamento do gel ao entrar em contato com a face quadrada dos corpos de prova e posteriormente foi posicionado os transdutores em faces quadradas opostas do corpo de prova e então registrado o valor indicado no mostrador digital do equipamento (FIGURA 10). Para cada corpo de prova foram realizadas três leituras de tempo em micros segundos (μ s), sendo considerada a de menor valor.

Figura 10 – Medição do módulo de elasticidade dinâmico, (a) aplicação do gel; (b) medição da velocidade do pulso



Fonte: Elaboração própria em 2021.

A velocidade de propagação de onda (V) em cada corpo de prova foi determinada através da equação 1:

$$V = L/t \quad (1)$$

Onde, L é a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores em mm e t é o tempo registrado no mostrador do equipamento em μs .

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado conforme a equação 2:

$$E_d = \rho V^2 * 0,9 \quad (2)$$

Onde, ρ é a densidade de massa aparente em kg/m^3 , V é a velocidade de propagação de onda ultrassônica em $\text{mm}/\mu\text{s}$ e 0,9 foi obtido utilizando o coeficiente de *Poisson* de 0,2, conforme indicação da norma.

- Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Após a finalização do ensaio para determinação do módulo de elasticidade, os mesmos três corpos de prova foram utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade, que

segiu o procedimento descrito na NBR 15259:2005 (ABNT, 2005). As superfícies dos corpos de prova foram lixadas e limpas através de pincel e em seguida determinada a massa inicial. Posteriormente os corpos de prova foram posicionados com uma das faces quadradas sobre a malha no recipiente com água, com seu nível mantido constante com 5 ± 1 mm acima da face de contato entre o corpo de prova e a malha (FIGURA 11).

Figura 11 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria em 2021.

A partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, foram determinadas as massas de cada um deles no final do período de 10 e 90 minutos, tomando o cuidado de fazer a secagem da superfície antes da cada pesagem. A absorção por capilaridade de cada tempo (A_t) foi calculada através da equação 3:

$$A_t = (m_t - m_0) / 16 \quad (3)$$

Onde, m_t é a massa do corpo de prova no momento t e m_0 é a massa do corpo de prova no momento inicial.

O coeficiente de capilaridade (C) foi calculado para cada corpo de prova de acordo com a equação 4, e em seguida foi determinada a média entre os valores.

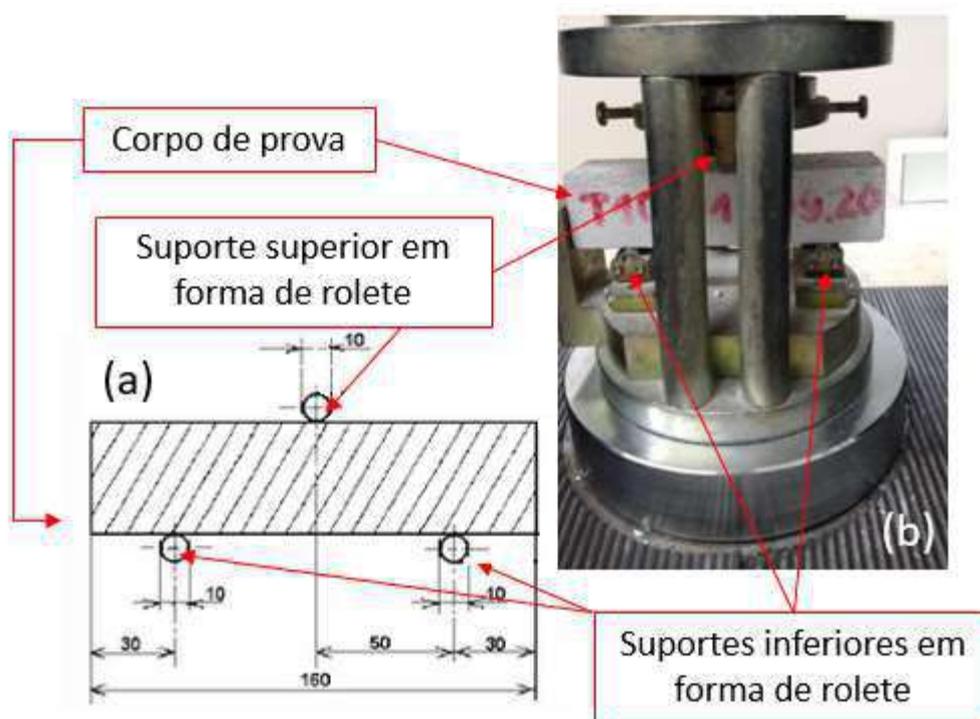
$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (4)$$

Onde, m_{90} é a massa do corpo de prova no momento 90 minutos e m_{10} é a massa do corpo de prova no momento 10 minutos.

- Determinação da resistência à tração e compressão

Após a finalização dos ensaios citados anteriormente, os mesmos três corpos de prova prismáticos de cada traço foram utilizados para determinação dos índices de resistência à tração e a compressão. Na realização dos ensaios de resistência foram obedecidos os procedimentos descritos na NBR 13279:2005 (ABNT, 2005). Foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu AG-I 250 kN e os dispositivos de carga para o ensaio de resistência à tração na flexão (FIGURA 12) e de resistência a compressão (FIGURA 13). Primeiro foram realizados os ensaios de tração na flexão onde foi aplicada uma carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura da peça. No ensaio de compressão foram utilizadas as metades dos corpos de prova rompidos durante a flexão, e então aplicada uma carga de 500 ± 50 N/s até a ruptura da amostra.

Figura 12 – (a) Representação de dispositivo de carga para ensaio de resistência à tração na flexão; (b) Dispositivo de carga para ensaio de resistência à tração na flexão



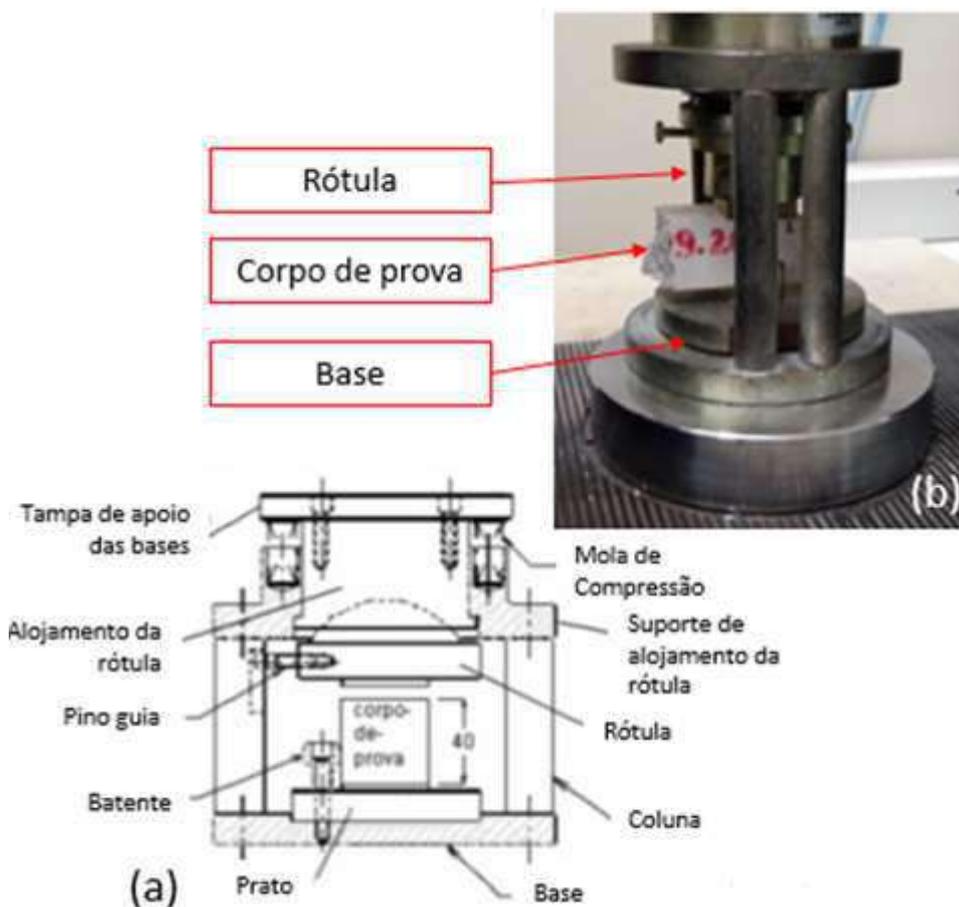
Fonte: Elaboração própria em 2021.

A resistência à tração na flexão (R_f) foi calculada através da equação 5:

$$R_f = (1,5 F_f L) / 40^3 \quad (5)$$

Onde, F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma em Newtons e L é a distância entre os centros dos suportes inferiores – 100 mm.

Figura 13 – (a) Representação de dispositivo de carga para ensaio de resistência à compressão; (b) Dispositivo de carga para ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaboração própria em 2021.

A resistência à compressão (R_f) foi calculada seguindo a equação 6:

$$R_f = F_c / 1600 \quad (6)$$

Onde, F_c é a carga máxima aplicada em N e 1600 é a área da seção quadrada do dispositivo de carga em mm^2 .

4.2.3 Processos de envelhecimento

Após 28 dias da fabricação dos corpos de prova (CPs), os CPs do segundo e do terceiro grupos foram submetidos aos procedimentos de envelhecimento natural e acelerado, respectivamente, e ao término foi avaliado seu desempenho e desgaste por meio da análise comparativa com os indicadores de degradação das amostras sem envelhecimento. Também foi feita a análise comparativa dos dados entre os CPs do mesmo grupo de envelhecimento, verificando as possíveis alterações de desempenho em virtude das diferentes taxas de ALRP no material.

- Envelhecimento acelerado

Foi realizado o ensaio de simulação do envelhecimento ocasionado pela luz solar e água da chuva ou orvalho. O procedimento foi realizado conforme ASTM G 53:1996 (ASTM, 1996) a qual normatiza essa prática para materiais não metálicos. Devido à grande variação dos efeitos de intemperismo natural em função da localização ou período do ano, essa prática não será correlacionada aos resultados à exposição natural.

O equipamento consiste em uma câmara dotada de quatro lâmpadas fluorescentes de emissão UV com potência de 80W, um recipiente de água aquecida mediante o uso de uma serpentina, formando uma lâmina de água de no mínimo 25 mm, um recipiente plástico que fez o controle dessa lâmina de água, um suporte para as amostras que estavam com a superfície interna expostas à ação das lâmpadas e o painel de controle (FIGURA 14). A temperatura e umidade foram medidas usando sensores acoplados a câmara.

Figura 14 – Câmara de envelhecimento acelerado



Fonte: Elaboração própria em 2020.

Três corpos de prova prismáticos (4x4x16 cm) de cada traço (TR, TR5% e TR10%) foram colocadas no suporte e então preenchido o espaço vazio com placas de modo a manter as condições dentro da câmara (FIGURA 15).

Figura 15 – Corpos de prova no suporte para submissão ao processo de envelhecimento acelerado



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Foi utilizado o ciclo de 6 horas de exposição UV e 18 horas de condensação (geração de vapor). Os CPs foram reposicionados em esquema de rotação horizontal uma vez a cada 15 dias para garantir que receberiam quantidade igual de exposição radiante, porém sem alterar a face exposta. O ensaio ocorreu em um tempo total de 2016 horas ou 84 dias, sendo verificada a temperatura e umidade de exposição a cada troca de ciclo e sendo feitos registros fotográficos quinzenalmente.

- Envelhecimento natural

O ensaio de envelhecimento natural foi realizado conforme ASTM D 1435:2013 (ASTM, 2013), onde os corpos de prova foram expostos ao ambiente externo em apoio inclinado a 45° para o norte magnético e sob efeito das condições climáticas locais do Campus Natal-Central do IFRN ($5^{\circ}48'42.8''S$ $35^{\circ}12'11.4''O$) (FIGURA 16).

Figura 16 – Sistema de envelhecimento natural



Fonte: Elaboração própria em 2021.

O ensaio de envelhecimento natural ocorreu durante o período de 84 dias, sendo verificada três vezes por semana a temperatura e umidade de exposição e sendo feitos registros fotográficos quinzenalmente.

4.3 ETAPA 4: TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Após a conclusão das etapas anteriores — etapas 1, 2 e 3, foi realizado o tratamento e análise dos dados coletados através da Planilha de Dados Experimentais representada no Apêndice A. Nessa etapa foram obtidos os indicadores de degradação de cada processo de envelhecimento (indicados na sessão 5.2), bem como foram comparados os dados, de modo a obter informações de durabilidade dos materiais propostos, através da possível alteração dos índices de desempenho do compósito após os processos e entre as amostras com diferentes taxas de ALRP. Além disso, foi realizado o registro de patente de invenção da composição de argamassa com melhor desempenho. Os resultados obtidos serão apresentados na seção 6.

4.3.1 Registro de Patente de Invenção

Como forma de proteger contra usos indevidos e garantir a autoria da composição de uma argamassa sustentável a partir da substituição parcial de areia por ALRP, foi realizada a solicitação de registro de Patente de Invenção (PI) submetido ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI. Através da pesquisa bibliográfica, documental e na base de dados do INPI foi evidenciado que as composições produzidas atendem aos requisitos mínimos de registro de patente instituídos pelo órgão quanto a novidade, atividade inventiva e aplicação industrial da invenção.

Inicialmente foi realizado o cadastro no portal do INPI onde foram necessários os dados pessoais do autor da invenção, sendo então cadastrado no portal como pessoa física (FIGURA 17). Em seguida foram elaborados os documentos necessários a solicitação de patente, que incluíram o conteúdo técnico composto pelo relatório descritivo, quadro reivindicatório e resumo.

Figura 17 – Tela de cadastro no portal INPI

formulario.inpi.gov.br/e-inpi/ctrl/ClienteAgenteControllerAction-23

BRASIL Acesso à Informação

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

GRU GUIA DE RECOLHIMENTO DA UNIÃO

Atenção!

Recomendamos o preenchimento de todos os campos, de forma a podermos evitar, quando necessário, o maior tempo possível.

A senha deve ser pacata e sigilosa, contendo a mínimo de seis e o máximo de 11 caracteres, podendo conter letras e números ou de dois tipos, sem espaços. Não utilize caracteres especiais do tipo @, !, %, ? hífen ou aspas. O sistema diferencia as letras maiúsculas das minúsculas no registro da login e senha. Recomendamos, por motivo de segurança, a troca da senha periodicamente.

Cliente

Natureza Jurídica: Escolha a natureza Jurídica

CNPJ:

Razão Social (nome empresarial):

País: Brasil

Estado: Escolha um Estado

Cidade: Escolha uma Cidade

Endereço:

Cep:

Telefone: (opcional)

Celular: (opcional)

Fax: (opcional)

E-Mail:

Login: Senha: Confirmar Senha:

Declaração

Declaro, sob as penas da Lei, ficar por aos benefícios à redução de tributação, conforme previsto na [Resolução INPI Nº 279/2011](#).

Salvar Voltar

Ativar
Acessar

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Posteriormente foi realizado o pagamento da Guia de Recolhimento da União – GRU, sendo necessário o comprovante para o início do processo de patente. Após a obtenção do comprovante de pagamento se pôde acessar a página para a entrada do pedido no sistema e-Patentes do INPI. Nessa página foram cadastrados os dados dos inventores, do tipo de material a ser patentado e foram anexos os materiais de conteúdo técnicos produzidos, além do comprovante de pagamento da GRU. Após a finalização do processo foram gerados os números de protocolo e de processo que são necessários ao acompanhamento no sistema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

É verificado que o valor de massa unitária do ALRP é 33,80% inferior ao agregado natural, já a massa específica do ALRP é 48,85% menor em relação ao agregado natural (TABELA 3). Os valores apresentados são compatíveis aos obtidos nas pesquisas de Silva, Brito e Veiga (2014), onde o valor de massa unitária do agregado de PET *flakes* é 4,08% menor e a massa unitária é igual aos valores obtidos. Como aglomerante foi utilizado o cimento CP II F 32 que possui índice de finura de 1,30% e massa específica de 2,96 g/cm³.

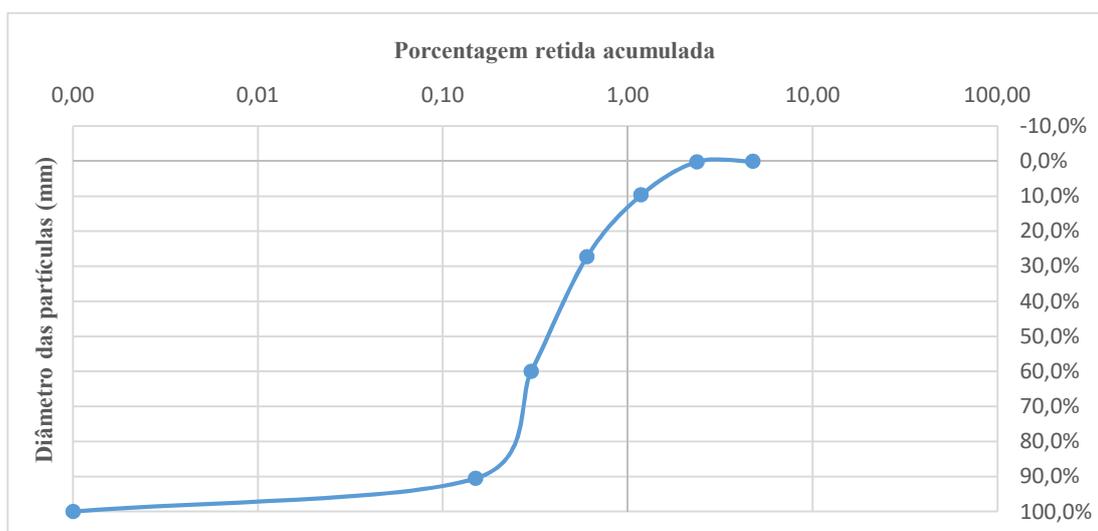
Tabela 3 – Dados de ensaios de caracterização de agregados

	Agregado Natural	Agregado PET (ALRP)
Massa Unitária (g/cm³)	1,45	0,49
Massa Específica (g/cm³)	2,62	1,28
Dimensão Máxima (mm)	2,36	2,36

Fonte: Elaboração própria em 2021.

A partir dos ensaios de granulometria do agregado natural e PET foram confeccionadas as curvas granulométricas dos materiais (GRÁFICO 1 e 2). As inclinações das curvas indicam que o agregado natural possui uma distribuição mais contínua de seus grãos – evidenciado pela formação de uma curva granulométrica em formato de “s” suave e alongado, quando comparados ao agregado plástico (HADDAD, 2015). De acordo com Sabbatini (1998), a descontinuidade da granulometria do agregado reduz a trabalhabilidade, a aderência e as resistências mecânicas da argamassa produzida.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado natural – areia



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado plástico – ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021.

5.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os resultados de índice de consistência de cada traço são apresentados na Tabela 4. Os valores foram obtidos pela média dos índices de consistência obtidas em três misturas de cada traço.

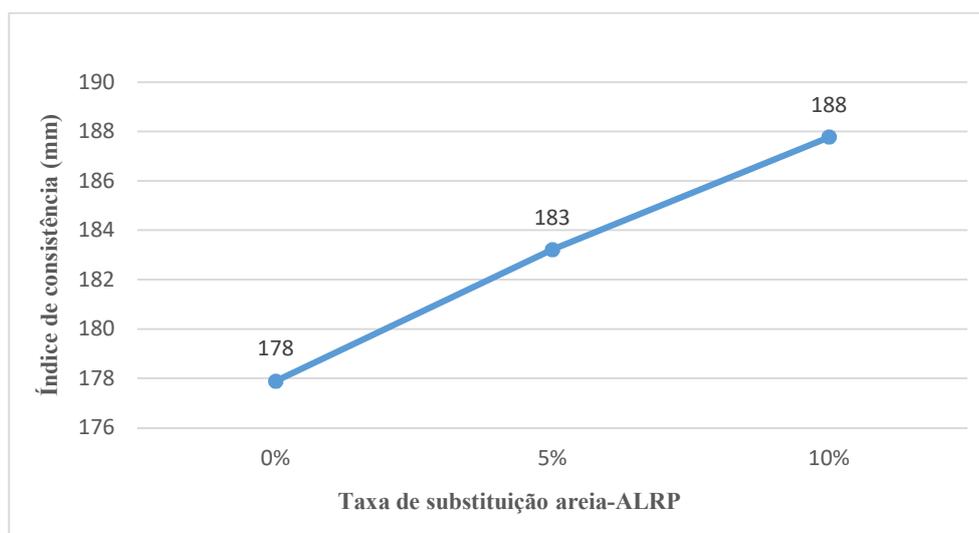
Tabela 4 – Índice de consistência dos traços

Traços	Índice de Consistência (mm)
TR	178±2,1
TR5%	183±4,9
TR10%	188±5,4

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Os valores obtidos indicam um ganho de 5,6% de fluidez da argamassa em função do incremento de 10% de resíduo. A mesma tendência linear apresentada no Gráfico 3 foi observada nas pesquisas de Choi *et al.* (2009) e Safi *et al.* (2013), onde os autores atribuíram esse aumento de fluidez a superfície lisa do agregado plástico que reduziu o atrito interno entre a argamassa e o agregado, oferecendo assim o um efeito positivo na trabalhabilidade da argamassa produzida.

Gráfico 3 – Índice de consistência dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021.

O acréscimo de 10% de resíduo na argamassa promoveu um aumento de 10 mm em seu índice de consistência, mantendo a relação água/cimento em 0,5. Esse resultado foi mais expressivo que o obtido por Silva, Brito e Veiga (2014), onde a inclusão de 15% de resíduo de PET *flakes* no traço promoveu o aumento de apenas 2 mm no índice de consistência. O ganho de fluidez da argamassa indica que é ampliada sua capacidade em manter a trabalhabilidade durante o tempo de aplicação (LEAL, 2012), promovendo assim uma maior facilidade na mistura, transporte e aplicação em condição homogênea (CARASEK, 2007).

5.3 PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO

5.3.1 Acelerado

O processo foi desenvolvido sob uma temperatura média de 43,12°C e umidade média de 62,8%, onde o período de exposição UV teve temperatura aproximadamente 2 °C superior e umidade 3% inferior ao período de condensação.

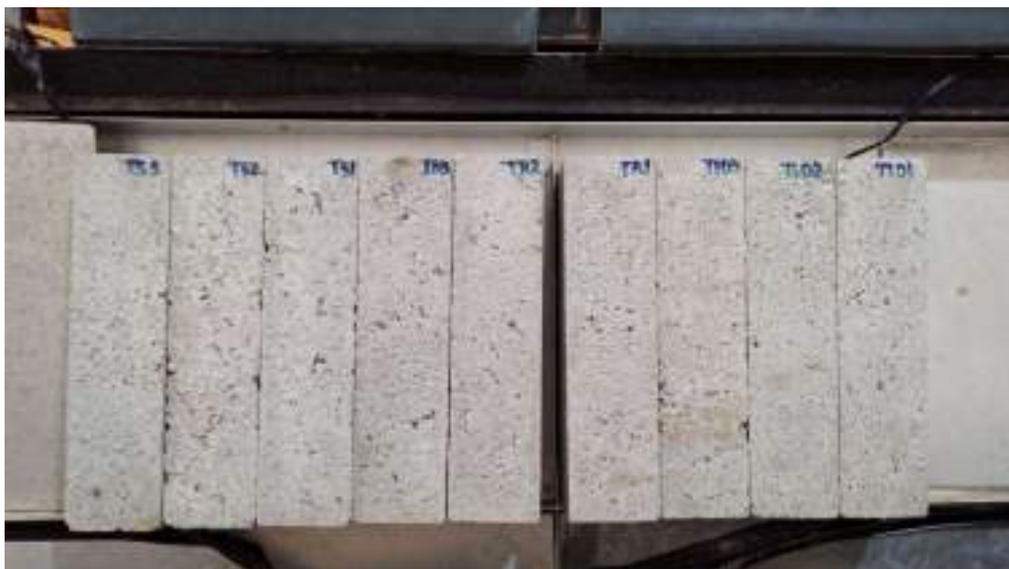
Os registros fotográficos realizados antes e após a finalização do período de envelhecimento acelerado indicam a ausência de mudanças visuais perceptíveis em todos os CPs submetidos ao processo (FIGURA 18 e 19).

Figura 18 – Corpos de prova antes da exposição ao envelhecimento acelerado



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Figura 19 – Corpos de prova após exposição ao envelhecimento acelerado



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Os resultados indicam que os compósitos produzidos são pouco susceptíveis a alterações visuais devido ao processo de envelhecimento acelerado quando colocados na câmara de envelhecimento. As argamassas produzidas por Silva, Brito e Veiga (2014) apresentaram uma ligeira lixiviação após ciclos de aquecimento-congelamento (8 ciclos de $23\pm 0,5$ horas) e umidificação-congelamento (8 ciclos de $23\pm 0,5$ horas), porém a comparação desses resultados é prejudicada pela indisponibilidade de outras pesquisas que apliquem em argamassas o processo de envelhecimento aqui utilizado, porém observa-se que não houve lixiviação ao término do período de exposição.

5.3.2 Natural

O processo foi desenvolvido sob uma temperatura média de $29,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade média de 69,5%.

Figura 20 – Corpos de prova antes da exposição ao envelhecimento natural



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Figura 21 – Corpos de prova após exposição ao envelhecimento natural



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Os registros fotográficos realizados antes e após a finalização do período de exposição ao envelhecimento natural indicam a ausência de mudanças visuais perceptíveis em todas as amostras submetidas ao processo (FIGURA 20 e 21). A comparação desses resultados é prejudicada pela indisponibilidade de outras pesquisas que apliquem em argamassas o processo de envelhecimento utilizado.

5.4 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

Foi verificado que a inclusão de 10% de ALRP na composição reduziu em média 3,1% do valor de densidade de massa aparente dos CPs (TABELA 5). Esse comportamento é coerente tendo em vista o valor de massa aparente do agregado plástico ser menor que a do agregado natural (HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE, 2010).

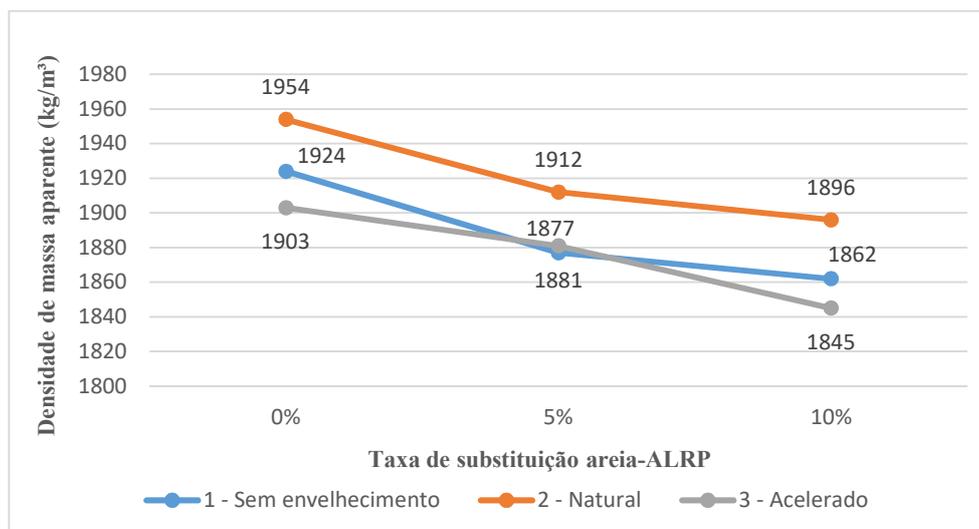
Tabela 5 – Densidade de massa aparente dos traços

Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	1924±11	1877±5	1862±20
Envelhecimento natural	1954±23	1912±15	1896±10
Envelhecimento acelerado	1903±3	1881±12	1845±5

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Trabalhos anteriores evidenciaram o comportamento linear entre a densidade da argamassa endurecida e a taxa de agregados plásticos na composição (CHOI *et al.*, 2009; GOUASMI *et al.*, 2016; SAFI *et al.*, 2013; SILVA; BRITO; VEIGA, 2014). A redução nos valores de massa aparente nas argamassas de revestimento são o intuito de grande número de pesquisas em virtude de apresentarem vantagens diretas como a redução do peso próprio do edifício e maior facilidade de transporte, além de gerarem redução nas emissões de carbono envolvidas em seu transporte quando comparadas as argamassas convencionais, sendo, portanto, mais sustentáveis (SOUZA, 2010).

Gráfico 4 – Densidade de massa aparente no estado endurecido dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Através do Gráfico 4 é possível identificar a influência dos processos de envelhecimento na propriedade de densidade de massa aparente dos corpos de prova endurecidos. As massas aparentes dos CPs submetidos ao envelhecimento natural (grupo 2) são em média 1,75% superior à dos CPs sem envelhecimento (grupo 1), provavelmente em virtude de a idade das amostras no ensaio ter sido superior, proporcionando o aumento dos produtos de hidratação do cimento no interior do material (LONGHI, 2012). De acordo com Souza (1997) esse comportamento de aumento de produtos do cimento pode ser verificado até certa idade no material, quando os fatores de degradação ambiental passam a agir causando sua corrosão. Foi identificado que os CPs submetidos ao envelhecimento acelerado (grupo 3) passam a sofrer degradação e conseqüentemente redução nos valores de massa aparente, com uma perda média de 0,8% em relação aos CPs sem envelhecimento.

Os valores de massa aparente dos traços do grupo 1 são compatíveis aos obtidos por Safi *et al.* (2013), que avalia argamassas com taxas de substituição de 0% e 10% de ALRP, e por Silva, Brito e Veiga (2014) a partir de amostras com Agregados PET *flake*. Uma comparação dos grupos 2 e 3 é impossibilitada devido à ausência de estudos que apliquem processos de degradação similares aos aqui propostos.

De acordo com os critérios de classificação de argamassas de revestimento padronizado pela ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa pode ser classificada em função de sua densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação de argamassas em função da densidade de massa aparente no estado endurecido

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	≥ 1800

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

A partir da Tabela 6, as composições produzidas a partir dos traços TR, TR5% e TR10%, podem ser classificadas como pertencentes a classe M6, considerando que de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005) quando os valores pertencem a duas faixas deve-se adotar a de maior classificação. Embora a argamassa possua valores elevados de densidade, os testes de envelhecimento comprovam que sua durabilidade em termos de densidade de massa aparente é proporcional a das argamassas convencionais.

5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os ensaios realizados evidenciam a tendência de queda nos valores de módulo de elasticidade dinâmico em função do incremento de ALRP na composição (TABELA 7). É possível verificar que a inclusão de 10% de ALRP foi responsável pela redução de 8% no módulo de elasticidade dinâmico dos CPs sem envelhecimento (grupo 1). Esse fenômeno é atribuído a maior deformabilidade do agregado plástico em comparação ao agregado natural, além disso, o agregado plástico promove uma menor aderência com a matriz cimentícia, o que provoca a maior flexibilidade da argamassa (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014).

Tabela 7 – Módulo de elasticidade dinâmico dos traços

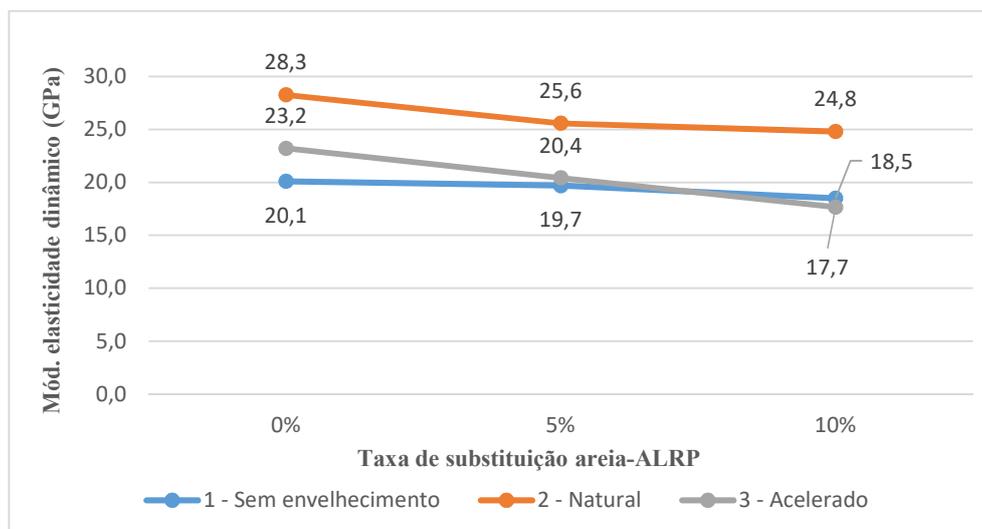
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	20,1±0,31	19,7±0,00	18,5±0,04
Envelhecimento natural	28,3±0,71	25,6±0,44	24,8±0,61
Envelhecimento acelerado	23,2±0,86	20,4±1,15	17,7±0,55

Fonte: Elaboração própria em 2021.

O módulo de elasticidade está relacionado ao comportamento elástico de um material, ou seja, sua capacidade de deformar sem que ocorra fratura (CINCOTTO *et al.*, 1995; SHACKELFORD, 2008), de forma que os resultados indicam a redução da rigidez da argamassa produzida devido a introdução de taxas de ALRP na composição. Esse aumento da capacidade de deformação da argamassa promove um aumento na sua qualidade e durabilidade, já que essa propriedade está diretamente relacionada a prevenção de fissuras que são responsáveis por grande parte dos fenômenos patológicos dos revestimentos (CARVALHO; BRITO, 2018).

O comportamento aproximadamente linear entre a taxa de agregado plásticos na composição e o módulo de elasticidade dinâmico pode ser verificada no Gráfico 5, sendo esse comportamento corroborado pelas pesquisas de Silva, Brito e Veiga (2014) e Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010).

Gráfico 5 – Módulo de elasticidade dinâmico dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Os maiores módulos de elasticidade foram apresentados pelos CPs submetidos ao envelhecimento natural (grupo 2), devido aos efeitos do aumento da idade dos CPs que proporcionaram o acréscimo nos produtos de hidratação do cimento no interior do material e consequentemente o aumento em seu módulo de elasticidade – em média de 35,1% superior as amostras sem degradação (grupo 1).

Nos corpos de provas submetidos ao envelhecimento acelerado (grupo 3) foi identificado o efeito gerado pela corrosão das argamassas compensando parcialmente o ganho de rigidez obtido pelo aumento da idade dos CPs, acarretando uma redução em seu módulo de elasticidade – em média de 5,2% menor que os CPs sem degradação (grupo 1), conforme justificado por Souza (1997).

O Gráfico 5 mostra que a diferença entre os módulos de elasticidade da argamassa de referência (TR) e a argamassa com ALRP (TR10%) é maior após os processos de envelhecimento, partindo de 8% nas amostras sem envelhecimento e chegando a 23,7% nas amostras com envelhecimento acelerado.

Os resultados relacionados ao módulo de elasticidade dinâmico obtidos na pesquisa de Safi *et al.* (2013) são compatíveis aos apresentados pelo grupo 1 (sem envelhecimento). Uma comparação dos grupos 2 e 3 é impossibilitada devido à ausência de estudos que apliquem processos de degradação similares aos aqui propostos.

5.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

A inclusão de 10% de ALRP proporcionou um aumento de 27,3% na absorção inicial (10 minutos) (TABELA 8) e de 3,1 % na absorção total (90 minutos) (TABELA 9) dos CP's sem envelhecimento (grupo 1). Essa variação se deve a baixa aderência do agregado PET com a matriz cimentícia, gerando maiores poros passíveis de serem preenchidos com água, porém, parte desse efeito é compensado por um segundo efeito que é a substituição da areia que é um material poroso, pelo plástico, que possui uma menor porosidade, assim esses efeitos podem ser parcialmente anulados, de forma a não ser apresentada grandes variações nas taxas de absorção total entre os traços, conforme SAFI *et al.* (2013) e Silva, Brito e Veiga (2014).

Tabela 8 – Absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos

Absorção de água – 10 minutos (g/cm²)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	0,11±0,01	0,13±0,00	0,14±0,00
Envelhecimento natural	0,09±0,01	0,11±0,00	0,10±0,01
Envelhecimento acelerado	0,16±0,01	0,16±0,03	0,18±0,01

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Tabela 9 – Absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos

Absorção de água – 90 minutos (g/cm²)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	0,32±0,01	0,29±0,02	0,33±0,01
Envelhecimento natural	0,21±0,01	0,25±0,01	0,25±0,01
Envelhecimento acelerado	0,48±0,06	0,41±0,04	0,43±0,01

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010), apresenta resultado semelhante, obtendo um aumento na absorção de água de 4,7% nas argamassas com 10% de agregado plástico.

A porosidade é parâmetro de referência para a avaliação da durabilidade de materiais principalmente quando submetidos a intemperismo e fenômenos de ambientes agressivos, como é o caso de revestimentos externos, influenciando diretamente na resistência mecânica (CULTRONE *et al.*, 2004; LU; LU; XIAO, 1999; MALLIDI, 1996). A pequena taxa de incremento verificada nos valores de absorção total de água por capilaridade pela inclusão de 10% de ALRP nas amostras sem envelhecimento (grupo 1) é um importante requisito a sua utilização.

As Figuras 22 e 23 apresentam os corpos de prova utilizados no ensaio de capilaridade, onde foi verificada pouca alteração na presença da água entre os CPs submetidos ao mesmo processo de envelhecimento, porém, é notória a diferença entre grupos submetidos a diferentes processos de envelhecimento, apresentando na imagem do grupo 3 – CP's submetidos ao envelhecimento acelerado (FIGURA 23), uma maior nitidez da presença de água quando comparada a imagem do grupo 2 – CP's submetidos ao envelhecimento natural (FIGURA 22), evidenciado pela marca d'água na superfície, sendo possível identificar visualmente um efeito significativo dos processos de envelhecimento nos valores de absorção de água por capilaridade dos CPs.

Figura 22 – Corpos de prova após finalização do ensaio de capilaridade – grupo 2 (envelhecimento natural)



Fonte: Elaboração própria em 2021.

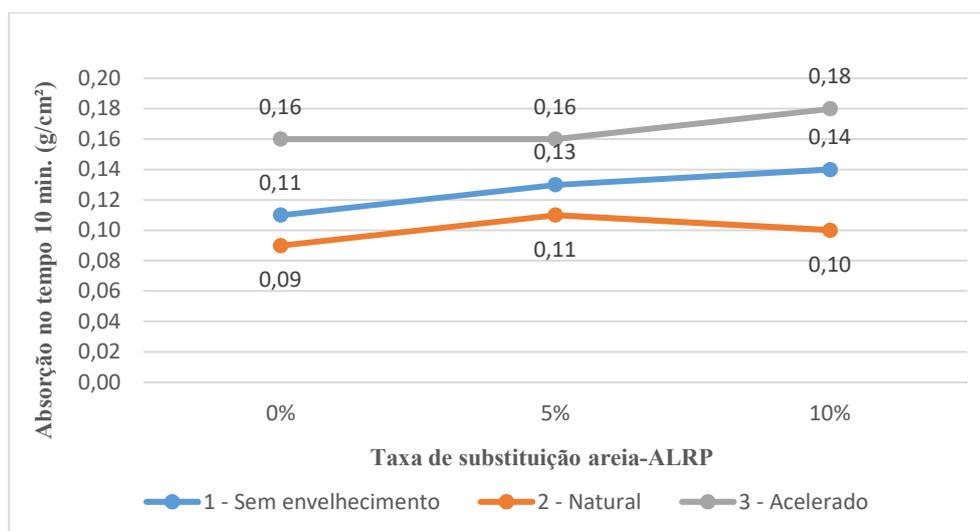
Figura 23 – Corpos de prova após finalização do ensaio de capilaridade – grupo 3 (envelhecimento acelerado)



Fonte: Elaboração própria em 2021.

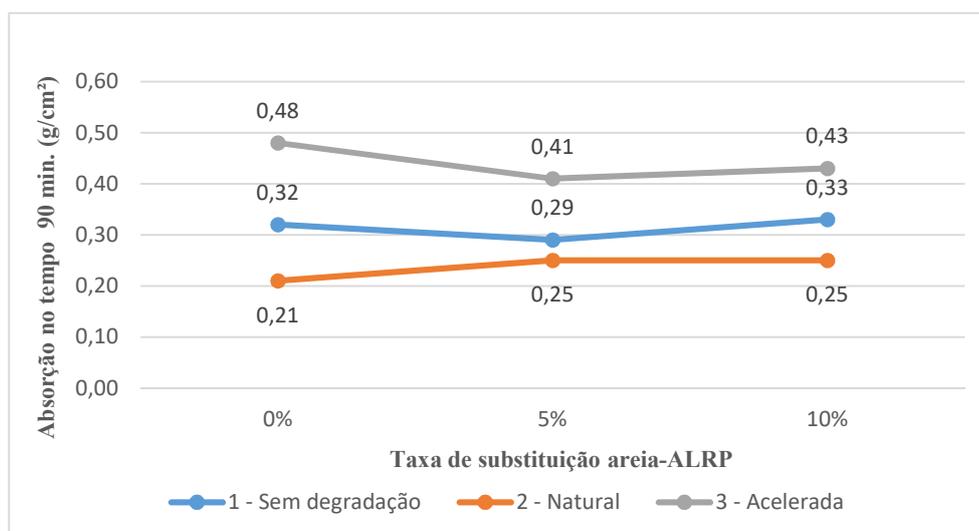
Nos Gráficos 6 e 7 é observado que os valores de absorção de água dos CPs submetidos ao envelhecimento acelerado são superiores aos valores dos CPs sem degradação – em média 30,6% maior na absorção inicial (10 minutos) e 41,9% na absorção total (90 minutos). Esse comportamento é atribuído a deterioração gerada pelo envelhecimento acelerado, que aumenta a conectividade da rede porosa da estrutura, aumentando assim a absorção de água por capilaridade nos traços (BOTAS, 2009).

Gráfico 6 – Absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Gráfico 7 – Absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos



Fonte: Elaboração própria em 2021.

O envelhecimento natural não foi suficiente para degradar a estrutura, porém devido ao aumento na formação de produtos de hidratação do cimento em seu interior, houve uma redução dos poros na estrutura e conseqüentemente na absorção de água. De forma que os valores de absorção de água das amostras submetidas ao envelhecimento natural são em média 23,1% inferiores ao das amostras sem degradação no início do ensaio (10 minutos) e de 22,6% no final do ensaio (90 minutos).

Os valores de coeficiente de capilaridade dos compósitos e seus desvios relativos máximos são expostos na Tabela 10. Todos os valores de desvio relativos foram inferiores ao máximo permitido na ABNT NBR 15259 (2005) (20%).

Tabela 10 – Coeficiente de capilaridade dos traços

Coeficiente de capilaridade (g/dm ² min. ^{1/2})			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	3,4	2,7	3,1
<i>Desvio relativo máximo</i>	5,0%	18,5%	8,5%
Envelhecimento natural	2,0	2,3	2,3
<i>Desvio relativo máximo</i>	3,3%	6,4%	5,7%
Envelhecimento acelerado	5,0	4,1	4,1
<i>Desvio relativo máximo</i>	17,2%	3,3%	6,6%

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Quando comparadas os CPs sem envelhecimento (grupo 1), é possível verificar que a composição com 10% de resíduo (TR10%) obteve valores de coeficiente de capilaridade 8,8% inferiores as amostras sem resíduo (TR). Como o coeficiente de capilaridade não considera a absorção inicial (antes de 10 minutos de ensaio), os valores sofreram redução, embora a absorção tenha aumentado com a inclusão de ALRP no traço. Isso ocorre devido ao aumento nos tamanhos dos poros no material que gerou maiores velocidades iniciais, porém menor quantidade de água absorvida (BOTAS, 2009). Marzouk, Dheilly e Queneudec (2007) também verificaram uma tendência de queda dos coeficientes de capilaridade de compósitos cimentícios com taxas de até 50% de agregado plástico.

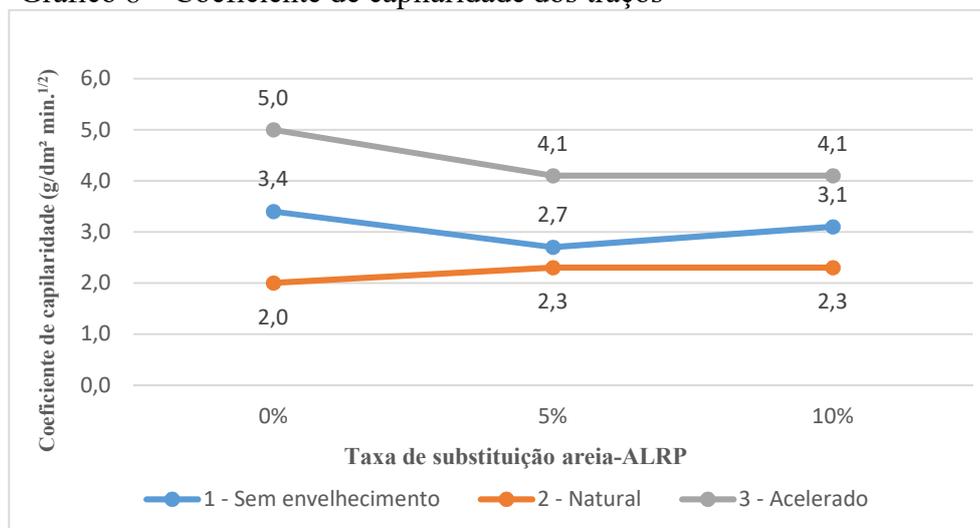
A redução do coeficiente de capilaridade do compósito ocorrida foi benéfica ao material, já que esse comportamento representa a redução da movimentação da água pelos capilares do material, apresentando assim maior dificuldade no transporte de fluidos em seu interior. Esse comportamento tem importância vital as argamassas de revestimento externo, representando um parâmetro fundamental a sua durabilidade (DA SILVA, 2016; MARVILA *et al.*, 2017).

Vaz (2016) confirma a tendência aqui evidenciada, verificando em sua pesquisa uma redução ainda mais significativa no coeficiente de capilaridade de argamassas com ALRP, indicando uma redução de 10,1% em amostras com 5% de resíduo e 41% em amostras com 15% de resíduo em relação a argamassas de referência (sem ALRP).

No Gráfico 8 verificamos que os CPs submetidos ao envelhecimento acelerado (grupo 3) apresentam valores de coeficientes de capilaridade em média 41,9% superior aos CPs sem envelhecimento (grupo 1). Esse comportamento é atribuído à deterioração dos CPs gerada pelo processo de envelhecimento.

Os CPs submetidos ao envelhecimento natural (grupo 2), apresentam valores de coeficiente de capilaridade em média 29% inferior aos CPs sem envelhecimento (grupo 1), isso ocorre devido ao aumento dos produtos de hidratação do cimento no material ao final do processo de envelhecimento.

Gráfico 8 – Coeficiente de capilaridade dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021.

De acordo com os critérios de classificação de argamassas de revestimento padronizado pela ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa pode ser classificada em função seu coeficiente de capilaridade, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação de argamassas em função do coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² min. ^{1/2})
C1	≤ 1,5
C2	1,5 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

As composições sem envelhecimento (grupo 1) podem ser classificadas como pertencentes a classe C3. Bauer (2013) menciona que o coeficiente de capilaridade de argamassas para aplicações gerais deve se enquadrar no mínimo na classe C3, com valor máximo de 4 g/dm² min^{1/2}, diante disso as composições propostas (TR5% e TR10%) atendem esse requisito.

Após a submissão dos CPs ao envelhecimento acelerado as argamassas passariam a ser classificadas como C4 – aumentando sua capacidade de absorção e coeficiente de capilaridade e passando a não atender ao requisito mínimo descrito por Bauer (2013), porém

não deixando de atender a norma já que ela apenas classifica e não específica o requisito mínimo.

5.7 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

5.7.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados apresentados na Tabela 12 indicam uma redução de 10% na resistência dos CPs sem envelhecimento (grupo 1) devido a inclusão de 10% de ALRP no traço, não havendo alteração na resistência do compósito com inclusão da taxa de 5%. Além disso, verifica-se que os corpos de prova com 10% de ALRP expostos aos envelhecimentos natural e acelerado, tiveram os mesmos percentuais de perda da resistência – aproximadamente 17%, quando comparado com o compósito de referência (TR). Para os percentuais de 5% de resíduos a perda foi de aproximadamente 15% e 14%, para a condição de envelhecimento natural e acelerado, respectivamente, quando comparado com os valores do compósito sem resíduo (TR). Embora o ALRP possua um formato de fibra ela não chega a contribuir como ponte de aderência devido a característica da superfície do agregado plástico, que ao contrário do natural, possui uma superfície lisa e impermeável reduzindo a aderência entre o ALRP e a matriz cimentícia e conseqüentemente sua resistência à tração (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014).

Tabela 12 – Resistência à tração na flexão dos traços

Resistência à tração na flexão (MPa)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	4,0	4,0	3,6
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,3	0,3	0,2
Envelhecimento natural	6,6	5,6	5,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,0	0,03	0,1
Envelhecimento acelerado	4,2	3,6	3,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,2	0,2	0,2

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Silva, Brito e Veiga (2014) verificaram uma redução de 36,5% do valor da resistência à tração na flexão com uma taxa de 10% de substituição de areia por PET *flakes* nos

compósitos, ou seja, superior à que foi encontrada no trabalho aqui desenvolvido. Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) verifica a mesma tendência de queda de resistência em função do incremento de agregado plástico na composição, porém não verificaram significativas variações nas resistências à tração na flexão de argamassas com taxas de até 10% de agregado plástico.

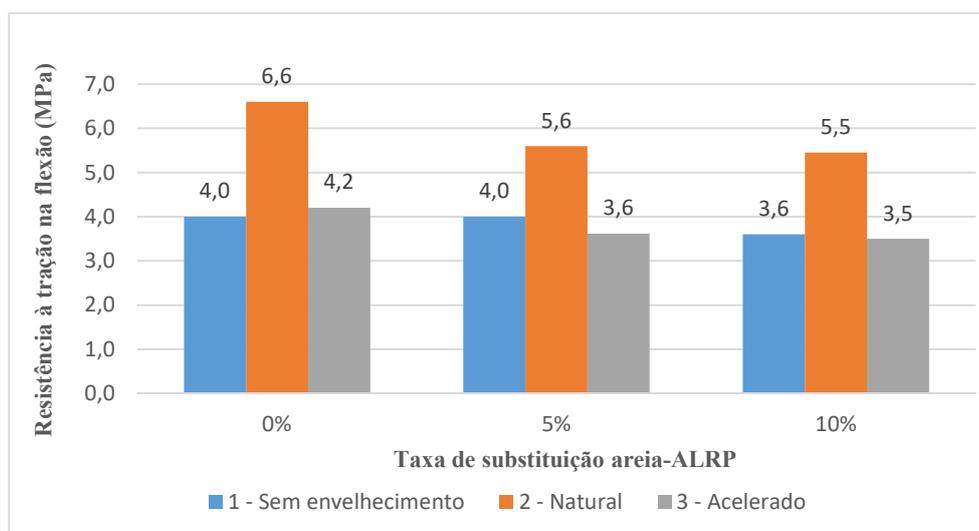
De acordo com Nakakura e Cincotto (2004) a resistência à tração na flexão é uma das mais importantes solicitações ao revestimento argamassado, indicando sua capacidade de resistência a fissuração que além de comprometer sua estática afetará sua durabilidade. A redução da resistência à tração nas argamassas com ALRP talvez represente o principal limitador a taxas de substituição de areia por ALRP, inviabilizando a produção de argamassas com elevadas taxas de substituição de areia por ALRP.

Apesar da inevitável perda da resistência à tração na flexão causado pelo uso de ALRP em argamassas, é importante ressaltar sua pouca relevância quando em uso de taxas de até 10%. Entretanto, sua produção possui um considerável ganho ambiental relacionado a redução no emprego de recursos naturais e da retirada de resíduos plásticos do ambiente. Além disso, estudos como este possibilitam alterações na composição da argamassa que permitam a ela atingir valores de resistência apropriada, considerando a perda devido a inclusão do agregado PET.

O gráfico 9 relaciona a resistência à tração na flexão dos traços em função do tipo de envelhecimento os quais foram submetidos. É possível verificar que as amostras submetidas ao envelhecimento natural (grupo 2) apresentaram valores de resistência em média 51,3% superiores aos CPs sem envelhecimento (grupo 1). Isso ocorre devido ao aumento da idade dos compósitos e consequente aumento dos produtos de hidratação do cimento no material.

Os compósitos submetidos ao envelhecimento acelerado (grupo 3) apresentam valores de resistência à tração na flexão próximos aos dos CPs sem degradação (grupo 1). Nesse processo os efeitos de degradação foram suficientemente deletérios para compensar o ganho de resistência adquirida pelo aumento de idade das amostras.

Gráfico 9 – Resistência à tração na flexão dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021

De acordo com os critérios de classificação de argamassas de revestimento padronizado pela ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa pode ser classificada em função sua resistência à tração na flexão, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação de argamassas em função da resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)
R1	$\leq 1,5$
R2	1,0 a 2,0
R3	1,5 a 2,7
R4	2,0 a 3,5
R5	2,7 a 4,5
R6	$> 3,5$

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

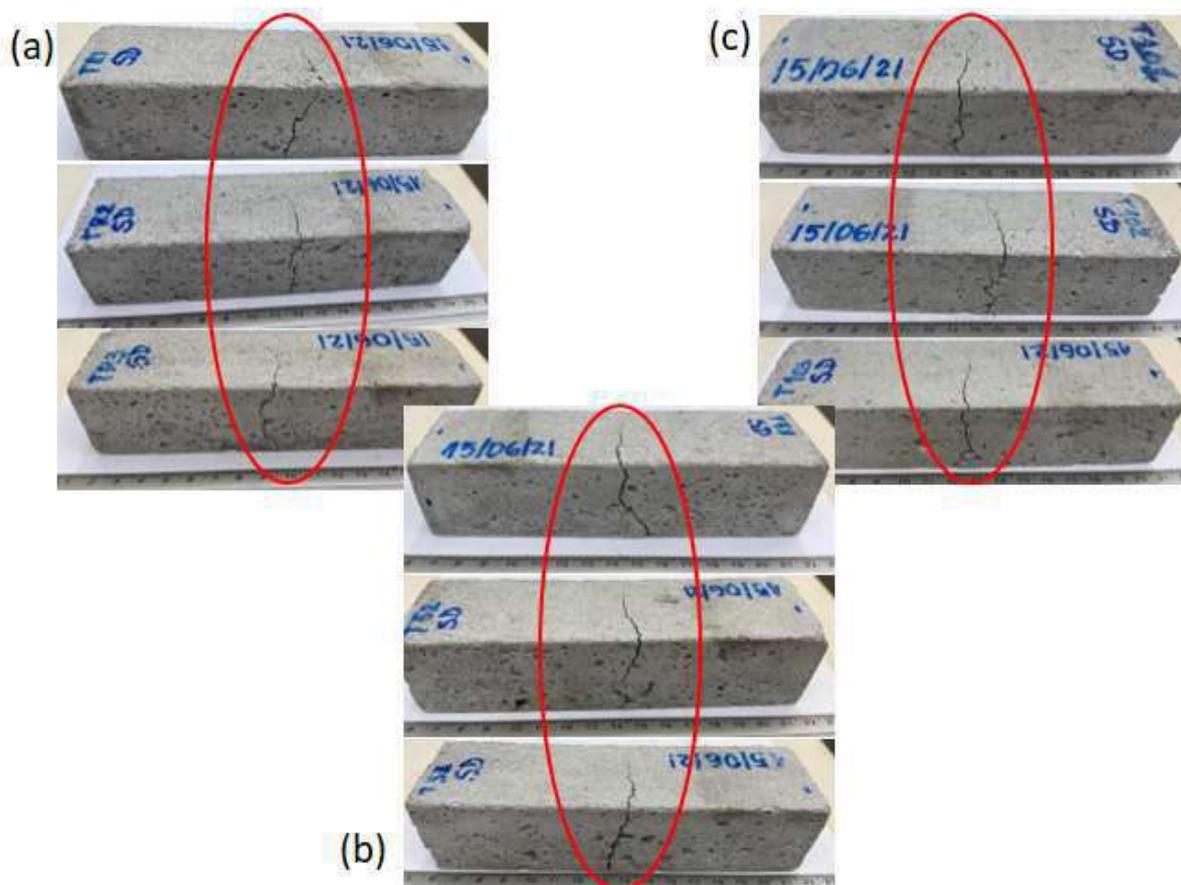
Todas as composições de argamassa (TR, TR5% e TR10%) sem envelhecimento (grupo 1) se adequam a classe R6, com resistência à tração na flexão superior a 3,5 MPa, permanecendo nessa classe em todas as etapas de envelhecimento avaliados (envelhecimento natural e acelerado). De acordo com Bauer (2013), argamassa de revestimento sujeitas a choque deve ser classificada como R4 ou superior, de forma que mesmo com a redução de resistência decorrente na inclusão do material PET, os compósitos produzidos atendem a esse

requisito, apresentando altos valores de resistência o que reduz a possibilidade de trincas e fissuras e possibilita a alta durabilidade do material (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

5.7.1.1 Caracterização Morfológica da Fratura

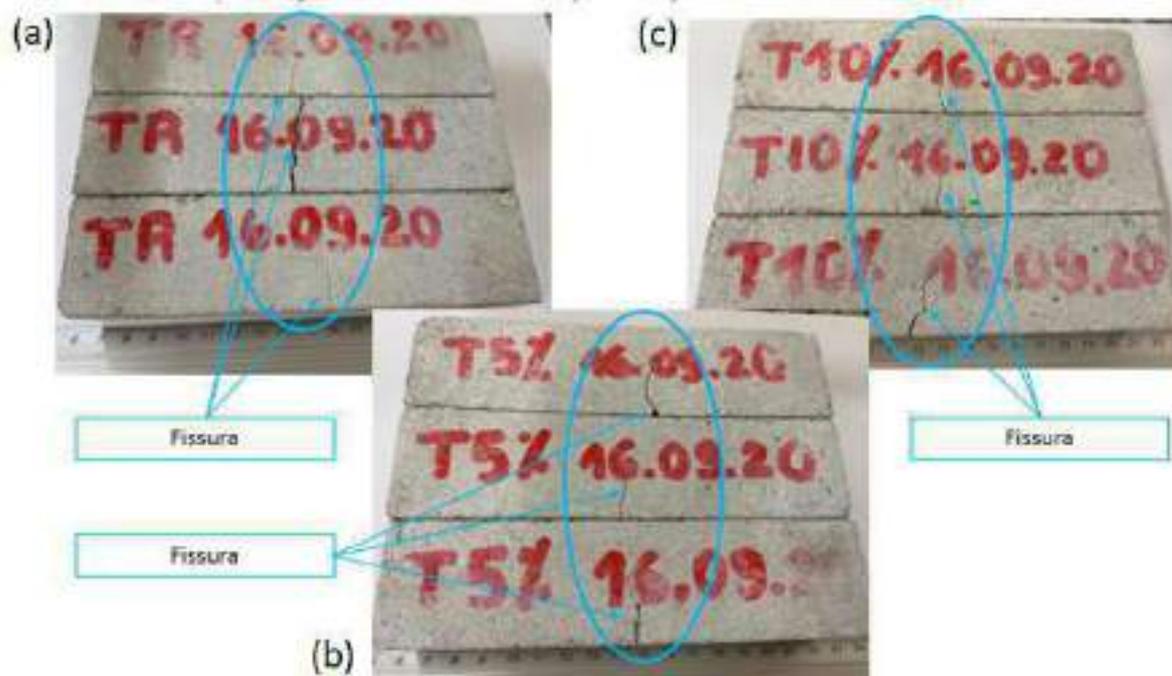
Após a realização do ensaio de tração na flexão a característica da fratura do material analisado foi típica de um material frágil (FIGURA 24, 25 e 26), que é o caso da argamassa cimentícia, sendo classificada como um material cerâmico e tendenciado um comportamento reto da fratura independentemente da presença de ALRP na composição (SHACKELFORD, 2008).

Figura 24 – Característica da fratura dos corpos de prova sem envelhecimento, (a) TR sem resíduo; (b) TR5% com 5% de ALRP; (c) TR10% com 10% de ALRP



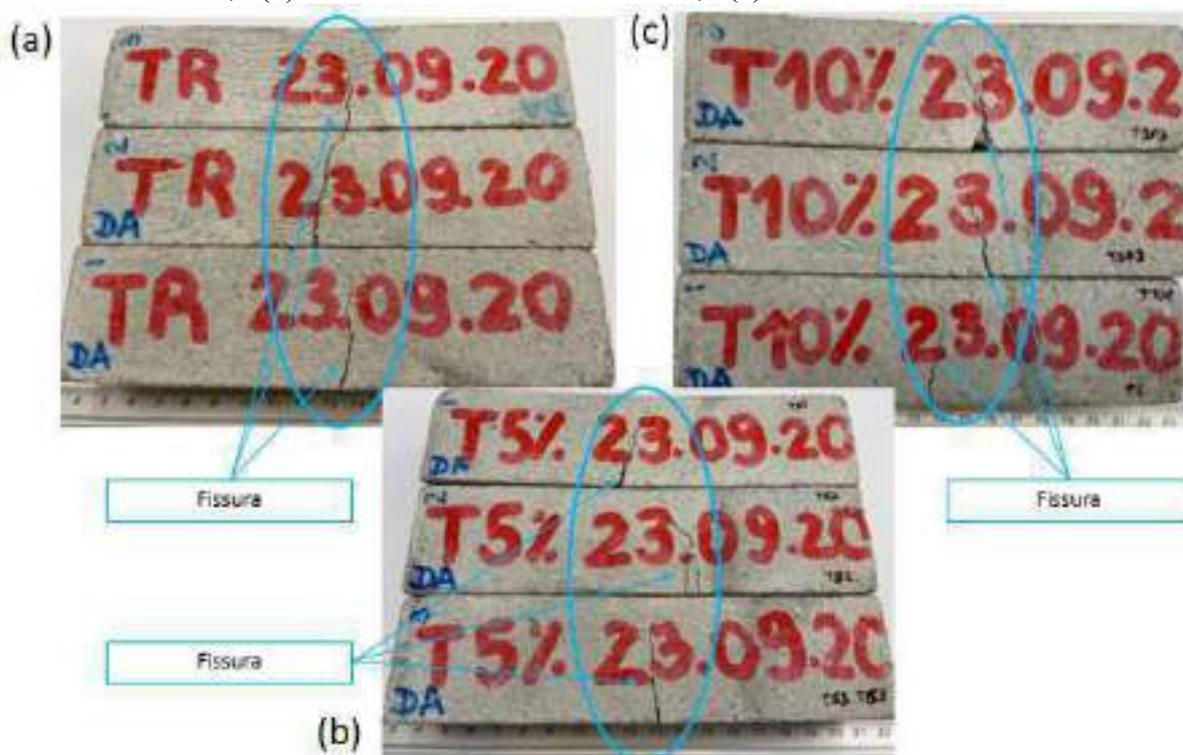
Fonte: Elaboração própria em 2021.

Figura 25 – Característica da fratura dos corpos de prova com envelhecimento natural, (a) TR sem resíduo; (b) TR5% com 5% de ALRP; (c) TR10% com 10% de ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021

Figura 26 – Característica da fratura dos corpos de prova com envelhecimento acelerado, (a) TR sem resíduo; (b) TR5% com 5% de ALRP; (c) TR10% com 10% de ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021

5.7.2 Resistência a compressão

Através dos valores obtidos durante o ensaio de resistência à compressão (TABELA 14), se pode verificar que a resistência dos compósitos sem envelhecimento é aumentada em 1,6% pela inclusão de 10% de ALRP no traço.

Tabela 14 – Resistência à compressão dos traços

Resistência à compressão (MPa)			
Condição de ensaio	TR	TR5%	TR10%
Sem envelhecimento	12,3	12,7	12,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	<i>0,4</i>	<i>0,8</i>	<i>0,7</i>
Envelhecimento natural	21,6	14,2	17,3
<i>Desvio absoluto máximo</i>	<i>0,6</i>	<i>0,5</i>	<i>0,8</i>
Envelhecimento acelerado	16,0	14,1	15,2
<i>Desvio absoluto máximo</i>	<i>0,9</i>	<i>0,7</i>	<i>0,4</i>

Fonte: Elaboração própria em 2021.

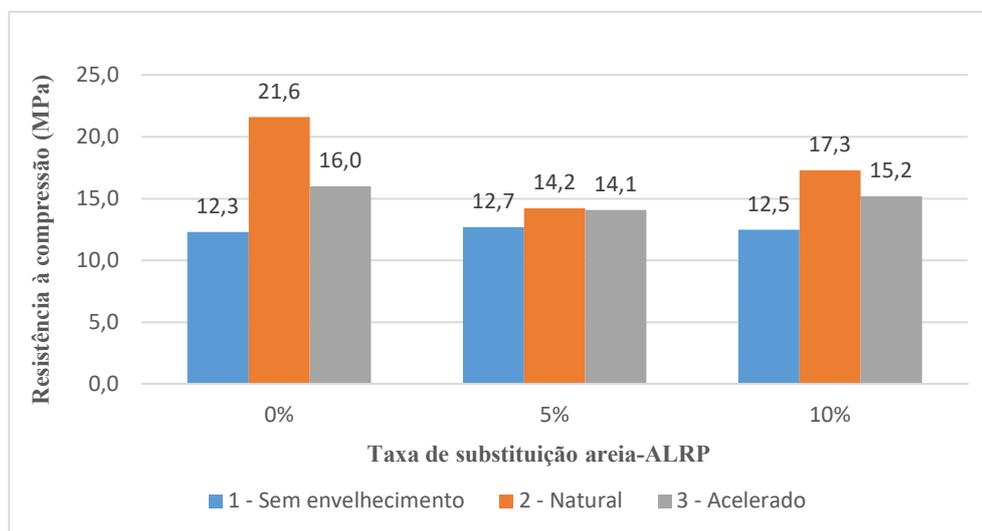
Safi *et al.* (2013) ratificando a informação aqui apresentada, verifica haver pequena variação na resistência à compressão com a inclusão de taxas inferiores a 20% de ALRP, sendo a inclusão de 10% responsável pela redução de 3,3%. Choi *et al.* (2009) também evidencia esse comportamento, verificado uma redução média de 13% na resistência à compressão da argamassa com taxa de 25% de ALRP.

O Gráfico 11 relaciona a resistência à compressão dos traços em função do tipo de envelhecimento aplicado. É verificado que os CPs submetidos ao envelhecimento natural (grupo 2) possui maiores valores de resistência que os CPs sem envelhecimento (grupo 1), sendo TR superior em 75,6%, TR5% em 11,8% e TR10% em 38,4%, aos respectivos traços do grupo sem envelhecimento (grupo 1). Isso ocorre devido ao aumento da idade das amostras ao final do processo de envelhecimento natural, que geram um aumento dos produtos de hidratação do cimento no interior do material.

Os valores de resistência à compressão das amostras submetidas ao envelhecimento acelerado (grupo 3) são afetados pelos efeitos deletérios do processo de envelhecimento, compensando parcialmente o ganho de resistência obtido pelo aumento da idade dos CPs. Todavia, ainda houve o aumento dos valores de resistência das amostras submetidas ao

envelhecimento acelerado (grupo 3) quando compradas as amostras sem envelhecimento (grupo 1), sendo de 30% nos CPs TR, 11% nos CPs TR5% e 21,6% nos CPs TR10%.

Gráfico 10 – Resistência à compressão dos traços



Fonte: Elaboração própria em 2021

Os valores de resistência à compressão aqui obtidos são compatíveis aos obtidos na pesquisa de Detomi *et al.* (2016).

De acordo com os critérios de classificação de argamassas de revestimento padronizado pela ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa pode ser classificada em função de sua resistência à compressão, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Classificação em função da resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (Mpa)
P1	≤ 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

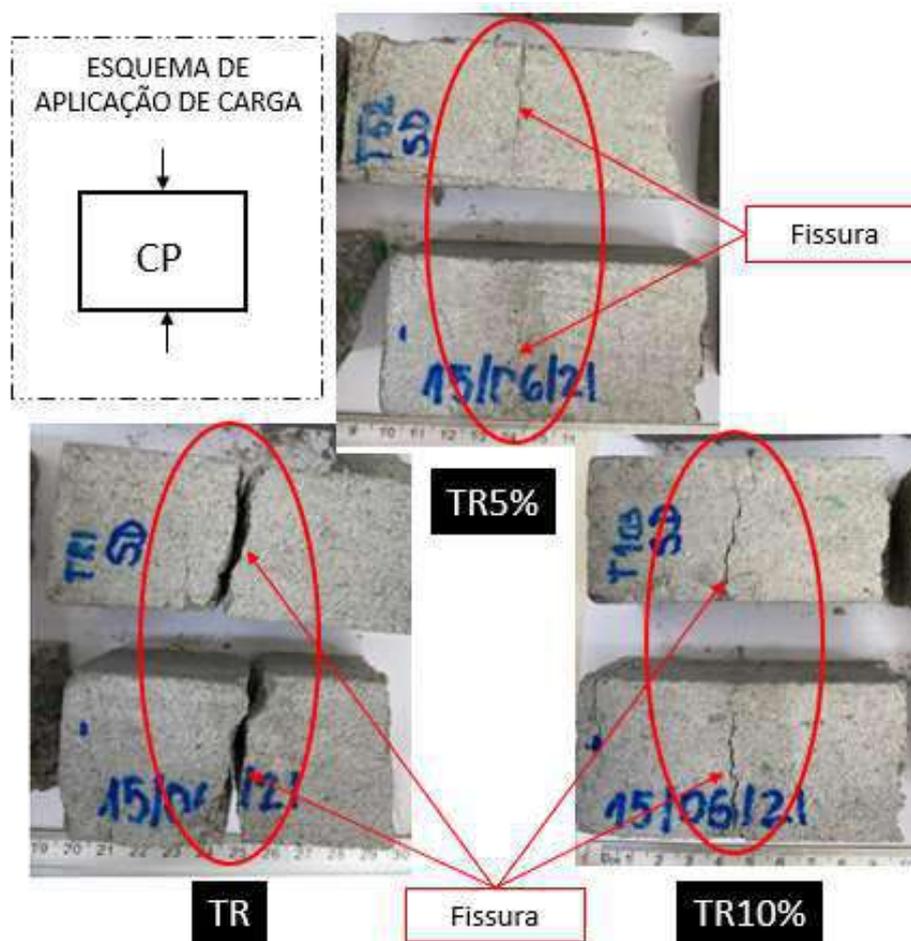
Todas as composições de argamassa (TR, TR5% e TR10%) se adequam a classe P6, inclusive apresentando resistência à compressão superior a 8,0 MPa após os processos de envelhecimento avaliados (natural e acelerado).

As propriedades mecânicas das argamassas dizem respeito ao seu estado de consolidação interna. Embora a resistência à compressão não seja uma característica determinantes em argamassas, essa deve ser capaz de suportar esforços mecânicos de diversas origens, que normalmente se traduzem em tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2010). Os valores de resistência verificados nas argamassas produzidas indicam que não existe redução significativa de desempenho mecânico após a substituição de até 10% de areia por ALRP, além disso, os testes de envelhecimento comprovam que sua durabilidade em termos de desempenho mecânico é proporcional a das argamassas convencionais.

5.7.2.1 Caracterização Morfológica da Fratura

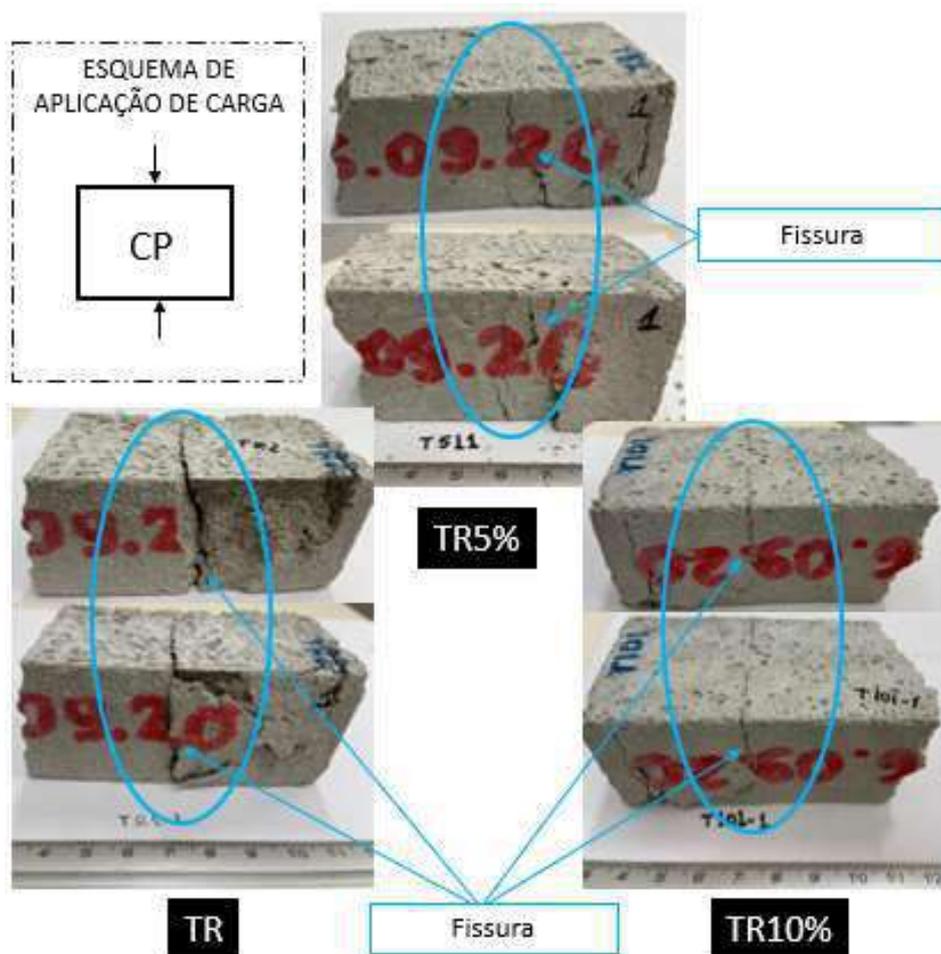
As Figuras 27, 28 e 29 evidenciam uma mudança no comportamento da falha identificada nas amostras após o ensaio de compressão, verificando sua ocorrência menos perceptível visualmente com a inclusão de taxas de ALRP na composição, independentemente do tipo de exposição. Comparando as composições das argamassas verifica-se um ganho de ductilidade em função da taxa de inclusão do agregado plástico, conforme indicado pela redução do módulo de elasticidade dinâmico e sendo evidenciado pela característica da fratura final. Esse comportamento também foi identificado nas pesquisas de Silva, Brito e Veiga (2014) e Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010), os quais o atribuem a capacidade de transporte de carga dos agregados plásticos após a falha sem que ocorra sua desintegração completa.

Figura 27 – Característica da fratura na compressão dos CPs sem envelhecimento: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP



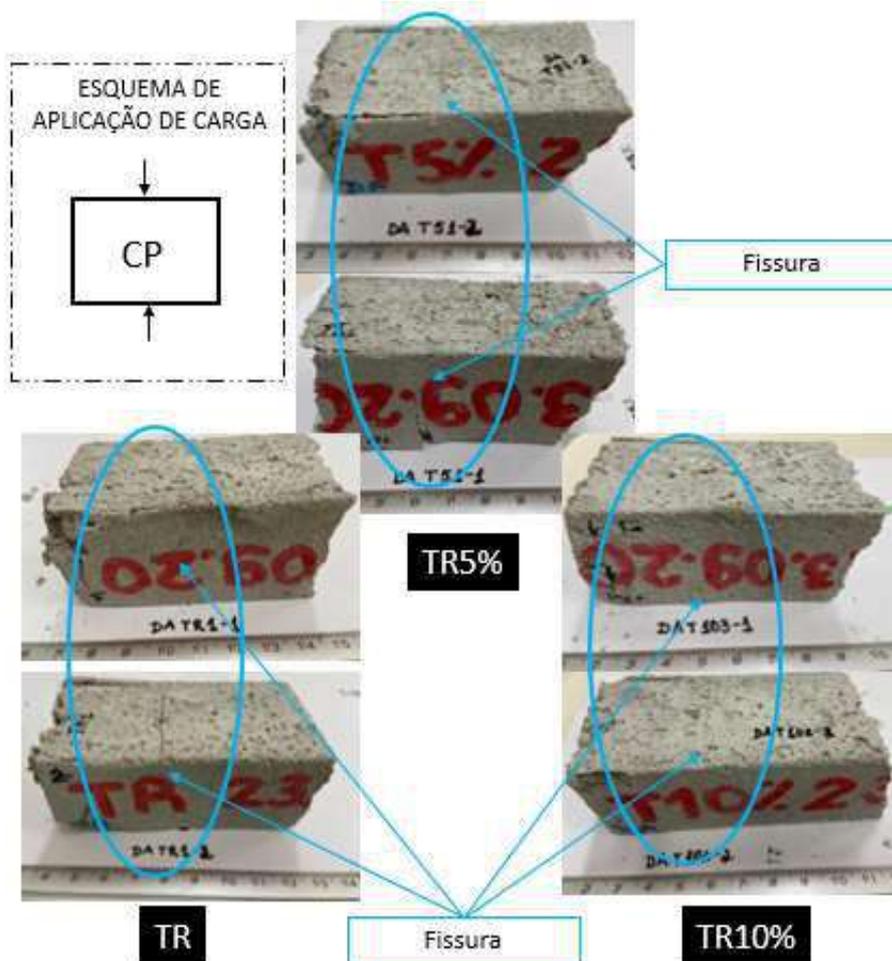
Fonte: Elaboração própria em 2021.

Figura 28 – Característica da fratura na compressão dos CPs com envelhecimento natural: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021.

Figura 29 – Característica da fratura na compressão dos CPs com envelhecimento acelerado: (TR) sem resíduo, (TR5%) com 5% de ALRP e (TR10%) com 10% de ALRP



Fonte: Elaboração própria em 2021.

5.8 PRODUTO TÉCNICO: REGISTRO DE PATENTE DE INVENÇÃO

Visto que a durabilidade das composições desenvolvidas não foi prejudicada em função da inclusão de taxas de ALRP no traço, foi determinada a composição de argamassa cimentícia com substituição de 10% de areia por ALRP como o produto técnico a ser patenteado, em função de apresentar uma maior redução na massa aparente no estado endurecido e no módulo de elasticidade dinâmico e desempenhos similares a composição TR5% relativos a absorção e coeficientes de capilaridade e resistências à tração e compressão. Além disso, o traço TR10% representa a solução mais sustentável, devido a apresentar a maior taxa de substituição do agregado natural pelo reciclado. A documentação de conteúdo técnico necessário a entrada da petição de patente se encontra disponível no Apêndice C, sendo gerado

através do sistema de peticionamento eletrônico o processo de número BR 10 2021 015773 9 e protocolo 870210073171.

6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi avaliada a viabilidade técnica da substituição parcial de areia natural pelo Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) em argamassas cimentícias para revestimento externo monocamada em construções, como forma de mitigar os impactos associados a exploração excessiva de agregados naturais e a intensa geração de resíduos plásticos. As principais conclusões obtidas a partir desse trabalho são:

- Nas argamassas sem envelhecimento houve a redução dos valores de densidade de massa aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de capilaridade e resistência à tração na flexão das argamassas em função do aumento de ALRP nas amostras;
- Nas argamassas sem envelhecimento houve o aumento do índice de consistência e de absorção de água por capilaridade em função do aumento de ALRP nas amostras, além disso, foi verificada a pouca influência da substituição de até 10% de areia por ALRP na resistência à compressão;
- O processo de envelhecimento natural não foi suficiente para degradar a estrutura das argamassas, porém acarretou o aumento dos valores de massa aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração e a compressão, e redução nos valores de absorção de água por capilaridade e coeficiente de absorção por capilaridade nas amostras;
- O processo de envelhecimento acelerado gerou efeitos de corrosão nas argamassas, acarretando o aumento dos valores de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade e poucos efeitos na densidade de massa aparente no estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração e compressão das amostras;
- Foi prioritariamente verificada a viabilidade na produção da argamassa TR10%, por apresentar melhor ou compatível desempenho em relação a argamassa de referência e por ser a solução mais sustentável devido a maior taxa de substituição do agregado natural pelo reciclado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as propriedades de retenção de água, densidade de massa no estado fresco e resistência potencial de aderência à tração em argamassas cimentícia com substituição parcial de 5% e 10% de areia por ALRP, de forma a classificar o material em todas as propriedades requisitadas pela ABNT NBR 13281 (2005) e ABNT NBR 13749 (2013).
- Produzir placas de alvenaria com revestimento em camada única por meio de traços de argamassa cimentícia com substituição parcial de 5% e 10% de areia por ALRP, avaliando sua durabilidade através de processos de envelhecimento natural e acelerado e o seu desempenho de resistência à aderência.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, S.; KESHAVARZI, B.; MOORE, F.; TURNER, A.; KELLY, F. J., DOMINGUEZ, A. O.; JAAFARZADEH, N. Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County. **Environmental Pollution**, v. 244, p. 153–164, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>. Accessed on: 12 Oct. 2019
- AKADIRI, P. O.; OLOMOLAIYE, P. O.; CHINYIO, E. A. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. **Automation in Construction**, v. 30, p. 113-125, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>. Accessed on: 05 Nov. 2019.
- AKERS, S. A. S.; STUDINKA, J. B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n. 2, p. 93-97, 1989.
- ALMEIDA, J.; FARIA, P; RIBEIRO, A.B; SANTOS SIVA, A. Cement-based mortars production applying mining residues treated with an electro-based technology and a thermal treatment: Technical and economic effects. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 1-10. 2021. Available at :<https://doi.org.ez139.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.conbuildmat.2021.122483>. Accessed on: 24 Ago. 2021
- ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília – Sistematização da incidência de casos**. 2010. 178 p. Dissertação. (Mestrado em estruturas e construção civil) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2010
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA ÍNDUSTRIA DO PET – ABIPET. **Reciclagem - Benefícios da Reciclagem de PET**. Brasil, 2016. Available at: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=49>. Accessed on: 28 Apr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos**. 2002. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>. Acessado: 05 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: método de ensaio: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios — Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G53– 96**: practice for operating light- and water-exposure apparatus (fluorescent UV-condensation type) for exposure of nonmetallic materials. West Conshohocken, PA: 1996.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1435– 13**: standard practice for outdoor weathering of plastics. West Conshohocken, PA: 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E632-82**: Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1996.

BARROS, L. H. V. **Reciclagem de resíduos de plástico reforçado com fibras de vidro na indústria de piscinas**. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

BAUER, E.; FEITOSA, C. P.; RODRIGUES FILHO, H.; ALMEIDA, P. O. Análise das argamassas de revestimento (industrializadas e usinadas), empregadas em obras do Distrito Federal, quanto aos requisitos e ao desempenho. *In*: IX CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUTURAS, João Pessoa, 2013. Disponível em: http://www.casadagua.com/wp-content/uploads/2014/02/A1_094.pdf. Acesso 16 de novembro de 2016, 20:00.

BENTUR, A.; AKERS, S. A. S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n. 2, p. 99-109, 1989.

- BEZERRA NETO, A. **Estudo de argamassas de revestimento com incorporação de resíduo de pavimento asfáltico**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- BOTAS, S. M. S. **Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia–Lisboa, 2009.
- BOURDEAU, L. Sustainable development and the future of construction: a comparison of visions from various countries. **Building Research & Information**, n. 6, v. 27, p. 355-367, 1999.
- CALDAS E SILVA, A.; SAVASTANO JUNIOR, H. S.; e JOHN, V. M. Envelhecimento de compósitos à base de escória de alto-forno reforçados com polpa celulósica residual de eucalipto. **Revista Ambiente Construído**, v. 9, n.1., 2009.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 589 p., 2002.
- CANDIDO, S. E. A. **Emergência e dinâmicas das práticas de reciclagem de PET no BRASIL: múltiplos campos e embates de valores**. São Carlos: UFSCar, 2016. 289 p. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.
- CARASEK, H. Argamassas. In: **Material de Construção Civil e Princípios de Ciências dos Materiais**. 1ª Edição, Volume 2. São Paulo. Ed. Geraldo C. Isaia, 2007.
- CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010.
- CARVALHO, V. F.; BRITO, B. S. A influência do módulo de elasticidade da argamassa no descolamento de revestimentos externos. In: SEMANA CIENTÍFICA DA UNILASALLE, Canoas, 2018. **Anais [...]**. Canoas, 2018.
- CHOI, Y.; MOON, D.; KIM, Y.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2829-2835, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>. Accessed on: 02 Oct. 2019
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim técnico n. 68, 1995.
- CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E; ELLERT, K; TORRE, M. J. DE L.; CAZALLA, O.; RODRIGUES-NAVARRO, C. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 3, p. 547-564, 2004.
- DA SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- DE FELICE, B., AMBROSINI, R., BACCHETTA, R., ORTENZI, M., PAROLINI, M. Dietary exposure to polyethylene terephthalate microplastics (PET-MPs) induces faster growth but not oxidative stress in the giant snail *Achatina reticulata*. **Chemosphere**, 270, 129430, 2021.

DE SILVA, N.; DULAIMI, M. F.; LING, F. Y. Y.; OFORI, G. Improving the maintainability of buildings in Singapore. **Building and Environment**, v. 39, p. 1243–1251, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.011>. Accessed on: 25 Oct. 2019.

DJAPOVIC, M., MILIVOJEVIC, D., ILIC-TOMIC, T., LJEŠEVIĆ, M., NIKOLAVITS, E., TOPAKAS, E., NIKODINOVIC-RUNIC, J. Synthesis and characterization of polyethylene terephthalate (PET) precursors and potential degradation products: Toxicity study and application in discovery of novel PETases. **Chemosphere**, v. 275, p. 130005, 2021.

DETOMI, A.; FILHO, S. L. M. R.; PANZERA, T. H.; SCHIAVON, M. A.; SILVA, V. R. V.; SCARPA, F. Replacement of quartz in cementitious composites using pet particles: a statistical analysis of the physical and mechanical properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, Issue 1, 2016. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001358](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001358). Accessed on: 05 Oct. 2019.

ELEFThERIADIS, G.; HAMDY, M. Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: a review paper." **Energy Procedia**, 132: 321-326, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.739>.

EUROPEAN COMMISSION. **Joint research centre technical reports: revision of green public procurement criteria for road construction**. 2014. Available at: http://susproc.jrc.ec.europa.eu/road/docs/1AHWG_GPP_road_draftTechnicalReport_v1.pdf. Accessed on: 09 Oct. 2019.

FELIPE. R. C. T. S. **Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro: propriedades e instabilidade estrutural**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

FELIPE, R. C. T. S.; FELIPE, R. N. B.; BATISTA, A. C. M. C.; AQUINO, E. M. F. Influence of environmental aging in two polymer-reinforced composites using different hybridization methods: Glass/Kevlar fiber hybrid strands and in the weft and warp alternating Kevlar and glass fiber strands. **Composites Part B-Engineering**, v. 1, p. 106994-10, 2019.

FREITAS, V. P. D.; ALVES, S.; SOUSA, M. Um contributo para a sistematização do conhecimento da patologia da construção em Portugal. *In*: CONGR. MORTARS CONSTR. LISBOA, 2, 2007, Lisboa. **Anais** [...]. Lisboa, 2007.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v. 30, Issue 6, p. 1101-1106, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>. Accessed on: 10 Oct. 2019.

GAVRILETEA, M. D. Environmental impacts of sand exploitation: analysis of sand market. **Sustainability**, 2019. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1118#framed_div_cited_count. Accessed on: 07 Oct. 2019.

GOUASMI, M.T.; BENOSMAN, A.; TAIBI, H.; BELBACHIR, M.; SENHADJI, Y. Les Propriétés physico-thermiques des mortiers à base des agrégats composites « PET-sable siliceux » (The physico- thermal properties of mortars made of composite aggregates "PET- siliceous sand"). **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 7, 409-415, 2016.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL (Brasil). **Como as construções sustentáveis contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU?**. Brasil, 15 out. 2020. Disponível em: https://www.gbcbrasil.org.br/como-as-construcoes-sustentaveis-contribuem-para-os-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/?gclid=Cj0KCQjwkIGKBhCxARIsAINMioJj49_d3nEECHpplvEfd63vs0z1PhGto0XDNj2qwnkIHkC5PJGG8AcaAi0REALw_wcB

HADDAD, L. D. O. **Estudo da influência da forma e da granulometria dos agregados nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

HANNAWI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. **Waste Management**, v. 30, Issue 11, p. 2312-2320, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>. Accessed on: 02 Oct. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15686-1: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework**. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.

JELLE, B. P. 2012. Accelerated Climate Ageing of Building Materials, Components and Structures in the Laboratory. **Journal of Materials Science**, 47, no. 18: 6475-496, 2012.

JOHN, G.; CLEMENTS-CROOME, D.; JERONIMIDIS, G. Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world. **Building and Environment**, v. 40, Issue 3, p. 319-328, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.011>. Accessed on: 29 Nov. 2019.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; SJOSTROM, C. Durability in the built environment and sustainability in developing countries. *In*: INT. CONF. ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 9, 2002, Brisbane. **Anais [...]**. Brisbane: CIB, CSIRO, 2002. Available at: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB9145.pdf>. Accessed on: 25 Oct. 2019.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. A durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DURABILIDADE DE MATERIAIS, COMPONENTES E ESTRUTURAS, 3., 1997, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PCC-USP, 1997.

KIM, S. B.; YI, N. H.; KIM, H. Y.; KIM, J. J.; SONG, Y. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, Issue 3, p. 232-240, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>. Accessed on: 10 Oct. 2019.

KRONEMBERGER, D. M. P. Os desafios da construção dos indicadores ODS globais. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 1, p. 40-45, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602019000100012>. Acessado em: 14 Set. 2021.

LAVILLE, S.; TAYLOR, M. A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change'. **The Guardian**, 28 jun. 2017. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>. Accessed on: 07 Oct. 2019.

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, v. 5, n. 6, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>. Accessed on: 04 Nov. 2019.

LEE, H.; KUNZ, A.; SHIM, W. J.; WALTHER, B. A. Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review. **Scientific Reports** **9**, v. 10145, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46417-z>. Accessed on: 12 Oct. 2019.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313 p.

LI, X., HAN, X., VOGT, R., ZHOU, J., ZHENG, B., SONG, Y., & LU, X. Distributions, temporal trends and ecological risks of polyethylene terephthalate (PET) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in sediments of Jiaozhou Bay, China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 165, 112176, 2021.

LIMA, N. L. P.; FELIPE, R. N. B.; FELIPE, R. C. T. S. Cement mortars with use of polyethylene Tereftalate aggregate: a review on its sustainability. **Research, Society and Development**, **9**, 2020. Available at: [10.33448/rsd-v9i8.5640](https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5640). e513985640.

LIMA, N. L. P.; FELIPE, R. N. B.; FELIPE, R. C. T. S. Aplicações de resíduos plásticos em compósitos na construção civil: um *review*. In: CONGRESSO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, Recife, 2021. **Anais [...]** Recife, 2021.

LIU, K.; WANG, X.; WEI, N.; SONG, Z.; LI, D. Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health, **Environment International**, v. 132, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105127>. Accessed on: 12 Oct. 2019.

LÓPEZ RUIZ, L. A., ROCA RAMÓN, X. & GASSÓ DOMINGO, S. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 2020. Available at: [10.1016/j.jclepro.2019.119238](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238). Accessed on: 04 nov. 2020.

LU, G.; LU G. Q. M.; XIAO, Z. M. Mechanical properties of porous materials. **Journal of Porous Materials**, v. 6, n. 4, p. 359-368, 1999.

MACEDO NETO, M. C. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

MAHDI, F.; ABBAS, H.; KHAN, A. Strength characteristic of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 25-36, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.006>. Accessed on: 07 Oct. 2019.

MALHOLTRA, V. M. Introduction: sustainable development and concrete technology. **Concrete International**, v. 24, p. 22. 2002.

MALLIDI, S. R. Application of Mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability – a bibliography with abstracts. **Construction and building materials**, v. 10, n. 6, p. 461-465, 1996.

MANSOUR, A. M. H.; ALI, S. A. Reusing waste plastic bottles as an alternative sustainable building material. **Energy for Sustainable Development**, v. 24, p. 79-85, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.11.001>. Accessed on: 09 Oct. 2019.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. 7. ed. rev. ampl. São Paulo: Atlas, 2014. 225 p.

MARVILA, M.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A.; ZANELATO, E.; MONTEIRO, S.; DELAQUA, G.; AMARAL, L. Estudo da capilaridade para argamassas de múltiplo uso. *In: ABM ANNUAL CONGRESS*, 72, São Paulo, 2017. **Anais [...]** São Paulo, 2017.

MARZOUK, O.; DHEILLY, R.; QUENEUDEC, M. Valorization of Post-Consumer Waste Plastic in Cementitious Concrete Composites. **Waste Management**, v. 27, no. 2, pp. 310–318, 2007.

MEDINECKIENE, M.; ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. Dwelling selection by applying fuzzy game theory. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 11, Issue 3, p. 681-697, 2011. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60109-5](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60109-5). Accessed on: 29 Nov. 2019.

MORA, E. P. Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. **Building and Environment**, v. 42, Issue 3, p. 1329-1334, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.004>. Accessed on: 05 Nov. 2019.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP/DECC**. São Paulo, 2004.

NICOLELLA, M.; LANDOLFI, R.; PINO, A.; SCOGNAMILLO, C. Comparative evaluations of sustainability, durability and resilience of external envelopes for environmentally efficient buildings. *In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 296, 1, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012023>. Accessed on: 23 Oct. 2019.

OSTLE, C.; THOMPSON, R. C.; BROUGHTON, D.; GREGORY, L.; WOOTTON, M.; JOHNS, D. G. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. **Nature Communications** 10, v. 1622, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>. Accessed on: 12 Oct. 2019.

PEREIRA, C.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Contribution of Humidity to the Degradation of Façade Claddings in Current Buildings. **Engineering Failure Analysis** 90: 103-115, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.028>.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars, **Construction and Building Materials**, v. 27, Issue 1, p. 107-111, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020>. Accessed on: 10 Oct. 2019.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Plastic Pollution. **Our Word in Data**, 2018. Available at: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#plastic-trade-impact-of-china-s-import-ban>. Accessed on: 18 Mar. 2020.

ROSÁRIO, G. P. **Argamassa produzida com resíduos da indústria calçadista (NOBUCK) em substituição parcial ao agregado miúdo**. 2016. Monografia (Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

SAFI, B.; SAIDI, M.; ABOUTALEB, D.; MAALLEM, M. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 436-442, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>. Accessed on: 02 Oct. 2019.

SAIKIA, N.; BRITO, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 385-401, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>. Accessed on: 04 Nov. 2019.

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC: cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Servilha, Espanha. *In: ARQUIMACOM'2002*, 2002, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: 2002.

SCHWARTS, M. M. **Composites materials handbook**. New York: McGraw Hill, 1984.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: a review. **Waste Management**, v. 28, Issue 10, p. 1835-1852, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>. Accessed on: 27 Oct. 2019.

SILVA, A.; BRITO, J.; VEIGA, M. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 71. 226–236, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>. Accessed on: 04 nov. 2019.

SILVA, D.A.; BETIOLI, A. M.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R.; GÓMEZ, L. A.; RIBEIRO, J. L. D. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials, **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1741-1746, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>. Accessed on: 02 Nov. 2019.

SILVA, E. A.; LINS, V. F. C; COTTING, F. Processo de moagem de garrafas pet pós-consumo. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 5, 2019.

SILVA, G. R. B.; FELIPE, R. C. T. S.; Queiroz, F. A. Análise da degradação de plástico reforçado em fibra de vidro quando exposto na água destilada e no ambiente natural. *In: CONGRESSO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS*, Recife, 2021. **Anais [...]** Recife, 2021.

SINHA, A.; GUPTA, R.; KUTNAR, A. Sustainable Development and Green Buildings (Održivi razvoj i zelena gradnja). **Drvna industrija**, v. 64. p. 45-53, 2013. Available at: <https://doi.org/10.5552/drind.2013.1205>. Accessed on: 29 Nov. 2019.

SOUZA, F. A. **Estudo de durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz**. 2011. Tese (Doutorado em desenvolvimento de processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SOUZA, A. J. C. **Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias**. 2010. Mestrado (Mestrado integrado em engenharia civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2010.

SOUZA, N. S.; FELIPE, R. N. B.; FELIPE, R. C. T. S.; LIMA, N. L. P. Resíduos sólidos industriais: compósito com resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro. **Research, Society and Development**, 9, 2020. Available at: 10.33448/rsd-v9i9.7135

SOUZA, G. F. Eflorescências nas argamassas de revestimento. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 2, 1997, Salvador. **Anais [...]**Salvador: CETA/ANTAC, 1997.

SHACKELFORD, J. E. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2008;

STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I.; PACHTA, V. Evaluation of inclusions in mortars of different historical periods from greek monuments, **Archaeometry**, v. 54, p. 737-751, 2012. Available at: <https://doi-org.ez139.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1475-4754.2011.00645.x> Accessed on: 16 Dec. 2020

SULYMAN, M.; HAPONIUK, J.; FORMELA, K. Recycled Polyethylene terephthalate (PET) as Construction Material in Civil Engineering: a review. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 7, nr. 2, s.100-108, 2016. Available at: <https://doi.org/10.7763/ijesd.2016.v7.749>. Accessed on: 27 Oct. 2019.

TETU, S. G.; SARKER, I.; SCHRAMEYER, V.; PICKFORD, R.; ELBOURNE L.; MOORE, L.; PAULSEN, I. Plastic leachates impair growth and oxygen production in *Prochlorococcus*, the ocean's most abundant photosynthetic bacteria. **Communications Biology** 2, v. 184, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0410-x>. Accessed on: 01 Oct. 2019.

THE OECD ENVIRONMENT PROGRAMME – OECD. **Design of sustainable building policies: scope for improvement and barriers**. 2002. Available at: <http://www.oecd.org/env/consumption-innovation/1936478.pdf>. Accessed on: 22 Jan. 2020.

TORRES, A.; BRANDT, J.; LIU, J. A looming tragedy of the sand commons: Increasing sand extraction, trade, and consumption pose global sustainability challenges. **Science**, v. 357, p. 970-971, 2017. Available at: <https://science.sciencemag.org/content/357/6355/970>. Accessed on: 09 Oct. 2019.

TROTTER, B.; RAMSPERGER, A. F. R. M.; RAAB, P.; HABERSTRONH, J.; LAFORSCH, C. Plastic waste interferes with chemical communication in aquatic ecosystems. **Scientific Reports** 9, v. 5889, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41677-1>. Accessed on: 09 Oct. 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME — UNEP. **Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources**. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland, 2019. Available at: <http://www.unepgrid.ch/>. Accessed on: 09 Oct. 2019.

UNITED NATIONS. Factsheet: Marine pollution. *In*: THE OCEAN CONFERENCE, 2017, New York. **Anais** [...]. New York: UN, 2017.

VOGEL, K.; WEI, R.; PFAFF, L.; BREITE, D.; AL-FATHI, H.; ORTMANN, C.; MASKOW, T. Enzymatic degradation of polyethylene terephthalate nanoplastics analyzed in real time by isothermal titration calorimetry. **The Science of the Total Environment**, 773, 145111, 2021.

XIN, J.; ZHANG, Q.; HUANG, J.; HUANG, R.; JAFFERY, Q.; ZAHRA, Y., DONGXIA; LU, Xingmei. Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate. **Journal of Environmental Management**, v. 296, 113267, 2021.

ZHANG, Y.; JIANG, H.; DU, Y.; WANG, C.; WANG, H. Surface alcoholysis induced by alkali-activation ethanol: A novel scheme for binary flotation of polyethylene terephthalate from other plastics. **Journal of Cleaner Production**, 314, Vol.314, 2021.

ZHANG, W.; ZHENG, Q.; ASHOUR, A.; HAN, B. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 189, 2020.

APÊNDICE B — PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Artigos Publicados

Ano 2020

Periódico: *Research, Society and Development*

- *Cement mortars with use of polyethylene tereftalate aggregate: a review on its sustainability*”, DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5640>, *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, e513985640, 2020, ISSN 2525-3409.

Ano 2021

E-book: Resíduos Sólidos: Educação e meio ambiente

- Aplicações de resíduos plásticos compósitos na construção civil: um *review*. Capítulo do e-book

Periódico: *European Academic Research*, vol 9 Issue 5

- Avaliação de durabilidade em revestimento externo argamassado: *review*

Artigos Aprovados para Publicação

Congresso: II Congresso On-line Internacional de Sustentabilidade: Da teoria à prática.

- Argamassa cimentícia com resíduos de polietileno tereftalato para uso como revestimento externo na construção civil: análise física, mecânica e de durabilidade a partir do envelhecimento natural

APÊNDICE C — DOCUMENTAÇÃO DE ENTRADA DE PETIÇÃO DE PATENTE

1 / 1

RESUMO

"COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", trata de uma nova composição de argamassa cimentícia para revestimento com base na substituição parcial de areia natural por agregado leve de resíduo de polietileno tereftalato (PET). Seu objetivo é conciliar desenvolvimento econômico com a proteção ambiental através da inovação de materiais a partir de subprodutos plásticos reciclados, atuando assim na mitigação dos impactos associados a duas problemáticas: a escassez e impactos gerados pela exploração de agregados naturais e dos impactos socioambientais acarretados pelos resíduos plásticos. A partir da substituição de agregados naturais por agregado leve de resíduo PET se obteve uma argamassa que atende aos níveis de desempenho e durabilidade exigidos para argamassas de revestimento.

COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)

Campo da invenção

[001] A presente composição se adequa ao setor de construção civil, mas especificamente voltada ao conceito de Construções Sustentáveis, já que trata do desenvolvimento de um compósito sustentável para uso como revestimento argamassado de aplicação interna e externa executadas em serviços de construção e/ou reforma.

Fundamentos da invenção

MATERIAIS COMPOSITOS

[002] Compósitos são materiais formados pela combinação de pelo menos dois macros constituintes absolutamente insolúveis um no outro, e cujas propriedades da mistura sejam superiores aos dos materiais constituintes (SANTIAGO, 2002; SCHWARTS, 1984). Na indústria da construção civil ele ocupa um importante patamar de utilização, sendo empregado em construções de diversos tipos desempenhando as mais variadas funções (FELIPE, 2012).

[003] Os compósitos de matrizes cerâmicas são os mais amplamente utilizados em construções, sendo representado pelos concretos e argamassas. Conforme Zhang *et al.* (2020) o composto cimentício é o material de engenharia mais utilizado no mundo. Nesses materiais normalmente é utilizado como aglomerante o cimento Portland, que quando misturado à água atua como uma fase de colagem que aglutina os agregados envolvidos na mistura (CALLISTER JUNIOR, 2002).

[004] Um dos compósitos amplamente utilizados na construção são as argamassas, que são definidas como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, cujas propriedades permitam seu endurecimento e aderência ao substrato (ABNT, 2005). Uma das funções

desempenhadas pelas argamassas é de revestimento aos mais diversos substratos, a qual constitui sua proteção aos agentes agressivos. Devido a cumprir uma valiosa função quanto a sustentabilidade das construções, os revestimentos argamassados devem prioritariamente atender seus requisitos de durabilidade e desempenho.

CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

[005] Diante da necessidade de crescimento do setor de construção, aliado a preocupação quanto aos impactos ambientais gerados por esse setor, surge o conceito de Construções Sustentáveis. A Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) define construção sustentável como um conjunto de práticas que buscam a qualidade nos âmbitos econômico, social e ambiental, através de processos como a racionalização de recursos naturais e o gerenciamento de resíduos gerados. Os materiais de construção são um importante instrumento na obtenção de construções sustentáveis. Ações importantes para a sustentabilidade dos materiais é o reutilizar ou reciclar um outro material tomando um produto de construção, não deixando de atender ao nível de satisfação do usuário (AKADIRI; OLOMOLAIYE; CHINYIO, 2013).

[006] Na busca por soluções econômicas que atenuem os problemas relacionados a exploração excessiva de agregados naturais e da geração de resíduo PET (polietileno tereftalato) e sua destinação inapropriada, nas últimas duas décadas surgiram pesquisas utilizando o resíduo PET como componente de concretos e argamassas (MAHDI; ABBAS; KHAN, 2009), o qual tem sido muitas vezes utilizado como substituto das areias naturais.

[007] Foram identificadas seis pesquisas que tratam de pesquisas de substituição de areia natural por ALRP (Agregado leve de resíduo PET) em argamassas cimentícias; (CHOI et al., 2009; HANNAWI et al., 2010; SAFI et al., 2013; SILVA; BRITO; VEIGA, 2014; DETOMI et al., 2016; GOUASMI et al., 2016). Com os dados obtidos foi produzido um *review* intitulado *'Cement mortars with use of polyethylene tereftalate aggregate: a review on its sustainability'* o qual foi publicado no volume 09, número 08, do ano de 2020, da Revista *Research, Society and Development* ISSN 2525-3409.

[008] O atual estado da técnica indica a existência de documentos de patentes cujas produções utilizam resíduos aplicados à argamassas, como: Processo de obtenção de

argamassa com EPS reciclado, sob número de pedido BR 10 2014 023529 9 A2 e Processo de obtenção de argamassa com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro e produto obtido, sob número de pedido BR 102018009512-9 A2, porém se verifica a ausência de argamassas com uso de Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) e que tenham sua sustentabilidade comprovada através de ensaios de desempenho e durabilidade.

[009] A partir da utilização desses conceitos é proposto por esse relatório de patente uma nova composição de argamassa sustentável que visa mitigar duas grandes problemáticas da atualidade:

[0010] - Grandes volumes de extração de recursos naturais (areia): A areia é um agregado natural formado pela da erosão de rochas por milhares de anos (EUROPEAN COMMISSION, 2014), com ampla utilização na construção civil mundial como componente de concretos, argamassas e cerâmicas. Embora a areia ainda seja um recurso de baixo custo e de grande oferta, a *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2019), através de uma cartilha intitulada "*Sand and sustainability: finding new solutions for environmental governance*", alerta para uma futura escassez desse recurso natural. Tal preocupação ocorre devido a taxa de extração das areias naturais está excedendo a taxa de reabastecimento, sendo estimados que 40 a 50 bilhões de toneladas de agregados naturais (rochas, areia e cascalho) são extraídos a cada ano. A indústria da construção consome anualmente mais da metade desse volume — 25,9 a 29,6 bilhões de toneladas em 2012 (UNEP, 2019). A UNEP ainda ratifica a importância do volume de recursos naturais utilizados na produção de materiais cimentícios — como concretos e argamassas, já que por volta de 65% do total produzido é composto por agregados naturais, sendo que a areia representa 25% desse valor (UNEP, 2019). Além disso, a exploração dos agregados naturais que são muitas vezes ilegais, ameaça a segurança dos trabalhadores do setor, moradores das regiões exploradas e dos ecossistemas ribeirinhos e marinhos, além da água doce e a biodiversidade local.

[0011] - Impactos socioambientais acarretados pelos resíduos plásticos (polietileno tereftalato - PET): O maior número de materiais poliméricos se enquadra na classificação de plásticos (CALLISTER JUNIOR, 2002), sendo ele considerado uma das mais

importantes inovações do século 20 (SAIKIA; BRITO, 2019). A produção do plástico cresce cerca de 9% ao ano (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014), atingindo em 2016 uma produção global de 330 milhões de toneladas, sendo previsto a duplicação desse valor nos próximos 20 anos. Embora esses materiais possuam diversas características convenientes, ele demanda uma elevada taxa de combustível para sua confecção — aproximadamente 4% do combustível fóssil extraído no mundo (LEBRETON; ANDRADY, 2019). Conquanto altamente utilizados, os plásticos são compostos por diversos produtos químicos tóxicos, sendo então, um agente poluidor e de natureza não biodegradável, cuja destinação do seu resíduo em aterros significaria preservar um material nocivo por centenas de anos (SAIKIA; BRITO, 2019).

[0012] A argamassa proposta reduz o consumo de agregados naturais (areia) em compósitos cimentícios através de sua substituição por Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) reciclados. Além disso, a partir de ensaios de desempenho e durabilidade, a argamassa com taxa de substituição de 10% mostrou características satisfatórias como menor massa aparente, maior deformabilidade, pouca variação nas características mecânicas e boa durabilidade.

Breve descrição dos desenhos

[0013] Abaixo serão descritas as figuras anexas a este processo de forma a exemplificar e fazer melhor compreendido os materiais utilizados e os processos realizados durante a confecção da argamassa proposta.

A Figura 1 apresenta o agregado reciclado de garrafas PET, após moído e pronto para inclusão à mistura.

A Figura 2 apresenta as amostras produzidas a partir das misturas sem a utilização do agregado reciclado (TR0%) e com sua presença na taxa de 10% (T10%).

A Figura 3 indica o equipamento utilizado no processo de degradação acelerada.

A Figura 4 mostra as amostras na câmara de degradação durante o processo de degradação acelerada.

A Figura 5 apresenta os utensílios utilizados na degradação natural: (a) vista frontal do aparato; (b) vista superior das amostras com sensor de temperatura e umidade.

A Figura 6 apresenta o gráfico que relaciona a massa aparente no estado endurecido dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

A Figura 7 apresenta o gráfico que relaciona o módulo de elasticidade dinâmico dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

A Figura 8 apresenta o gráfico que relaciona a absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

A Figura 9 apresenta o gráfico que relaciona a absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

A Figura 10 apresenta o gráfico que relaciona resistência à tração na flexão dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

A Figura 11 apresenta o gráfico que relaciona resistência à compressão dos traços em função do tipo de degradação aplicada.

Descrição da invenção

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

[0014] Foi utilizado como aglomerante o cimento CP II F 32 de fabricante Lafarge Holcim, geralmente utilizado nas construções da região nordeste brasileira. Esse material foi submetido ao ensaio de finura por meio da peneira 75 μm (n^o 200), conforme a NBR 11579 (2012) e ao ensaio para determinação da massa específica através do frasco de Le Chatelier, conforme prescrito pela NBR 16605 (2017). O cimento apresentou índice de finura de 1,30% e massa específica de 2,96 g/cm³.

[0015] Foi utilizada a areia de quartzo lavada da região de Natal no nordeste brasileiro, ela foi submetida ao ensaio para determinação de sua composição granulométrica de acordo com a NM 248 (2003). Para a produção da mistura foi utilizado o material passante na peneira de abertura 2,36 mm, que é a dimensão máxima normalizada pela

NBR 7214 (2015) da areia normal utilizada para ensaios de resistência do cimento. Os valores da massa unitária e específica do agregado natural foram determinados conforme procedimentos da NBR NM 45 (2006) e a NBR 9776 (1987), respectivamente, e são apresentados na Tabela 1.

[0016] O Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) foi obtido em empresa de reciclagem da região em forma de fibras de aproximadamente 30x2mm, obtidas a partir da trituração de garrafas PET nas cores transparente e verde. Para obtenção do material em forma de partículas, elas foram trituradas manualmente através de conjunto de lâminas para obtenção de um material com dimensão máxima de 2,36 mm, de forma a manter a dimensão máxima característica da areia natural a ser utilizada nos traços. Os dados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de ensaios de caracterização de agregados

	Agregado Natural	ALRP
Massa Unitária (g/cm ³)	1,45	0,49
Massa Específica (g/cm ³)	2,62	1,28
Dimensão Máxima (mm)	2,36	2,36

Fonte: Elaboração própria em 2021.

MOLDAGENS DAS AMOSTRAS

[0017] A partir desses materiais foram confeccionados traços com 0% (Traço de Referência) e 10% de substituição em volume de areia natural por ALRP, na faixa granulométrica entre 2,36 e 0,075 mm, mantendo assim a curva granulométrica do agregado natural. A tabela abaixo mostra os traços de cimento:areia:ALRP (c:a:w) utilizados. As misturas foram realizadas durante quatro minutos em de misturador mecânico, conforme descrito na NBR 16541 (2016).

Tabela 2 – Nomenclatura e traços a serem confeccionados.

Nomenclatura	Traço (c:a:w) (massa)	Traço (c:a:w) (volume)	a/c
TR0% (Traço de Referência)	1:3	1,3,39	0,5
T10%	1,2,70:0,14	1,3,04:0,32	0,5

c: cimento; a: areia; w: ALRP

Fonte: Elaboração própria.

[0018] Para cada traço foram moldados nove corpos de prova prismáticos nas dimensões de 4x4x16 cm, conforme NBR 13279 (2005). Após adensamento e rasamento, eles foram mantidos nos moldes metálicos por 48±24 horas. Posterior a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos nas condições de temperatura de 23±2 °C e umidade de 60±5% por 28 dias.

[0019] As amostras foram divididas em três grupos compostos por três corpos de provas de cada traço (TR0% e T10%). Cada grupo foi utilizado para a determinação do desempenho do material através de ensaios que resultaram nos indicadores de degradação em um tipo e tempo de degradação que foram submetidas

PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

[0020] Após 28 dias de idade os corpos de prova do segundo e terceiro grupos foram submetidos aos procedimentos de degradação natural e acelerada, e ao término, avaliado seu desempenho e desgaste por meio da análise comparativa dos indicadores de desempenho das amostras do grupo 1, as quais não foram submetidas a processos de envelhecimento. Também foi feita a análise comparativa dos dados entre as amostras do mesmo grupo, verificando as possíveis alterações de desempenho em virtude das diferentes taxas de ALRP no material.

[0021] Foi realizado o ensaio de simulação de deterioração ocasionada pela luz solar e água da chuva ou orvalho mediante o uso de uma câmara de envelhecimento. O procedimento foi realizado conforme ASTM G 53 (1996) a qual normaliza essa prática para materiais não metálicos. O equipamento consiste em uma câmara dotada de quatro lâmpadas fluorescentes de emissão UV com potência de 80W, um recipiente de água

aquecida contendo uma lâmina de água de no mínimo 25 mm, um recipiente plástico que fez o controle dessa lâmina de água, um suporte para as amostras que estavam com a superfície interna expostas à ação das lâmpadas e sensores de temperatura. Três corpos de prova prismáticos (4x4x16 cm) de cada traço (TR0% e T10%) foram colocadas no rack e então preenchido o espaço vazio com placas de modo a manter as condições dentro da câmara. Foi utilizado o ciclo de 6 horas de exposição UV e 18 horas de condensação. As amostras foram reposicionadas em esquema de rotação horizontal uma vez a cada 15 dias para garantir que recebam quantidade igual de exposição radiante, porém sem alterar a face exposta. O ensaio ocorreu em um tempo total de 2.016 horas ou 84 dias, sendo verificada a temperatura e umidade de exposição a cada troca de ciclo.

[0022] O ensaio de envelhecimento natural foi realizado conforme ASTM D 1435 (2013), onde os corpos de prova foram expostos ao ambiente externo em apoio inclinado 45° para o norte magnético e sob efeito das condições climáticas locais (5°48'42,8"S 35°12'11,4"O). O ensaio ocorreu durante o período de 84 dias, sendo verificada três vezes por semana a temperatura e umidade de exposição.

[0023] DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO E DURABILIDADE

[0024] Conforme conceitos utilizados na Construção Sustentável o material sustentável deve atender requisitos de desempenho e durabilidade, para isso, as amostras moldadas foram utilizadas para a realização de ensaios que indiquem a adequação do material à sua função, sempre utilizando como parâmetro dados obtidos a partir das amostras do traço de referência (TR0%). Para a determinação do desempenho da composição foram realizados os ensaios de índice de consistência, densidade de massa aparente no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, determinação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração por flexão e resistência à compressão. A durabilidade foi avaliada através da comparação dos valores dos ensaios citados acima, antes e após a finalização de processos de envelhecimento acelerado e natural. Abaixo serão detalhados os procedimentos e resultados obtidos em cada ensaio realizado:

[0025] Índice de Consistência – NBR 13276 (2016): Após a conclusão das misturas e ainda em seu estado fresco, foram determinados os índices de consistência das argamassas produzidas, conforme NBR 13276 (2016), de modo a avaliar a alteração da trabalhabilidade da argamassa com uso do ALRP. O procedimento foi realizado através do preenchimento do cone metálico padrão com a argamassa através de três camadas, sendo aplicados 15, 10 e 5 golpes respectivamente. Após o rasamento o molde foi retirado verticalmente e então acionada a manivela 30 vezes durante 30 segundos e então medido o espalhamento da argamassa através de 3 diâmetros distribuídos no perímetro. O índice de consistência foi obtido pela média dos espalhamentos em mm e arredondada para o inteiro mais próximo. Os valores obtidos indicam um ganho aproximado de 5,6% nesse índice em função do aumento da porcentagem de resíduo na composição, conforme dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Índice de consistência dos traços

Índice de Consistência		
Traços	Média (mm)	Desvio-padrão
TR0%	178	2,1
T10%	188	5,4

Fonte: Elaboração própria em 2021.

[0026] Densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280 (2005): Foram utilizados três corpos de prova para a determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme procedimento apresentado na NBR 13280 (2005). Através de paquímetro foi verificada a altura, largura e comprimento de cada corpo de prova em duas posições e então pesados em balança com resolução de 0,1g. A densidade de massa aparente é a média entre as relações de massa e volume dos corpos de prova em kg/m^3 , arredondando para o número inteiro mais próximo. Conforme os dados apresentados na Tabela 4, foi verificado a redução de 3,2% no valor de massa aparente no estado endurecido das argamassas sem degradação em função da inclusão de 10% de agregado plástico no traço.

Tabela 4 – Massa aparente dos traços
Massa aparente no estado endurecido

Grupos - Tipo de degradação	(kg/m ³)	
	TR	T10%
1- Sem degradação	1924±11	1862±20
2- Natural	1954±23	1896±10
3- Acelerada	1903±3	1845±5

Fonte: Elaboração própria em 2021

[0027] Na Figura 8 é possível verificar os valores de massa aparente dos traços e os efeitos dos processos de degradação em cada grupo de amostras. As amostras submetidas a degradação natural apresentam valores superiores aos demais grupos, provavelmente em virtude de a idade das amostras no ensaio ser superior as amostras sem degradação, o que proporcionou o aumento dos produtos de hidratação do cimento no interior do material (LONGHI, 2012). Esse comportamento pode ser verificado até certo ponto, quando os fatores de degradação ambiental passam a agir de forma deletéria no material causando sua corrosão e redução dos valores de massa aparente (SOUZA, 1997).

[0028] Foi identificado que as amostras submetidas ao processo de degradação acelerada passaram do ponto de ganho de massa aparente e passam a sofrer degradação com conseqüente perda de massa aparente. Ao final da degradação os valores de massa aparente das amostras foram em média 1% inferiores aos das amostras sem degradação.

[0029] Embora tenha havido variações de valores de massa aparente em função do tipo de degradação, em todos os grupos os valores de massa aparente do traço T10% são em média 3% inferiores ao traço TR0%, além disso, foi possível verificar que existe uma proporcionalidade na redução dos valores entre os grupos de amostras o que indica que a porcentagem de ALRP no traço não influencia a durabilidade do material, sendo as amostras de cada traço degradadas de forma similar.

[0030] Conforme a NBR 13281 (2005) a argamassa produzida (T10%) se adequa a classe M6, com densidade de massa aparente no estado endurecido superior a 1.800 kg/m³ em todas as etapas de degradação avaliadas (sem degradação, degradação natural e degradação acelerada).

[0031] Determinação do módulo de elasticidade dinâmico – NBR 15630 (2009): Após a finalização do ensaio de massa aparente, os três corpos de prova foram utilizados no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrasônica normalizado pela NBR 15630 (2009). Inicialmente foi colocada uma camada de gel nas superfícies dos transdutores que forma a haver extravasamento do gel ao entrar em contato com a face quadrada dos corpos de prova. Posteriormente foi posicionado os transdutores em faces quadradas opostas do corpo de prova e então registrado o valor indicado no mostrador digital do equipamento. Para cada corpo de prova foram realizadas três leituras de tempo em micros segundos (μ s), sendo considerada a de menor valor. A velocidade de propagação de onda (V) em cada corpo de prova foi determinada através da seguinte equação:

$V = L/t$, onde, L é a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores em mm e t é o tempo registrado no mostrador do equipamento em μ s.

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado conforme a equação:

$E_d = \rho V^2 \cdot 0,9$, onde, ρ é a densidade de massa aparente em kg/m³, V é a velocidade de propagação de onda ultrasônica em mm/ μ s e 0,9 foi obtido utilizando o coeficiente de Poisson de 0,2.

[0032] É possível verificar a redução nos valores em função do incremento de agregado plástico na composição conforme dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Módulo de elasticidade dinâmico.
Módulo de Elasticidade Dinâmico

Grupos - Tipo de degradação	(GPa)	
	TR	T10%
1 - Sem degradação	20,1±0,31	18,5±0,04
2 - Natural	28,3±0,71	24,8±0,61
3 - Acelerada	23,2±0,88	17,7±0,55

Fonte: Elaboração própria em 2021.

[0033] Na Figura 7 é apresentado o gráfico que relaciona o módulo de elasticidade dinâmico dos traços com o tipo de degradação. Através dele é possível verificar que o módulo de elasticidade dinâmico das amostras submetidas a degradação natural alcançou maiores valores quando comparado as amostras submetidas a degradação acelerada e as amostras sem degradação. Esse comportamento está sendo mais uma vez associado a idade das amostras no ensaio ser superior à das amostras sem degradação o que proporcionou o aumento dos produtos de hidratação do cimento no interior do material e conseqüentemente seu módulo de elasticidade. Nas amostras submetidas a degradação acelerada foi possível identificar os efeitos da degradação compensando parcialmente o ganho de rigidez obtido pelo aumento dos produtos de hidratação do cimento.

[0034] O gráfico ainda indica que quanto maior os efeitos de degradação sobre as amostras, maior foi a diferença entre os valores de módulo de elasticidade da argamassa de referência (TR0%) e a argamassa com ALRP (T10%), partindo de 8% nas amostras sem degradação e chegando a 23,7% nas amostras com degradação acelerada, ou seja, quanto maior o período de envelhecimento maior foi a taxa de redução nos valores de módulo de elasticidade dinâmico devido a inclusão de 10% de ALRP no traço.

[0035] Absorção de água por capilaridade – NBR 15259 (2005): Após a finalização do ensaio para determinação do módulo de elasticidade, os três corpos de prova foram utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade, que seguirá procedimento

descrito na NBR 15259 (2005). As superfícies dos corpos de prova foram limpas e secas através de pincel e em seguida determinada a massa inicial. Posteriormente os corpos de prova foram posicionados com uma das faces quadradas sobre a malha no recipiente com água, com seu nível mantido constante com 5 ± 1 mm acima da face de contato entre o corpo de prova e a malha. A partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, foram determinadas as massas de cada um deles no final do período de 10 e 90 minutos, tomando o cuidado de fazer a secagem da superfície antes de cada pesagem. A absorção por capilaridade de cada tempo (A_t) foi calculada através da seguinte fórmula:

$$A_t = (m_t - m_0) / 16, \text{ onde, } m_t \text{ é a massa do corpo de prova no momento } t \text{ e } m_0 \text{ é a massa do corpo de prova no momento inicial.}$$

[0036] Os valores obtidos durante o ensaio de absorção de água por capilaridade são apresentados na Tabela 6 e 7. É possível verificar através dos dados de absorção total (Figura 9), que embora os valores de absorção do traço T10% seja superior ao traço TR0% nas amostras em estágios iniciais de degradação (sem degradação e degradação natural), ocorre uma redução da absorção total (Figura 9) de 10,4% de água por capilaridade nas amostras com uso de ALRP após o processo de degradação acelerado.

Tabela 6 – Absorção de água por capilaridade no tempo 10 minutos.

Grupos - Tipo de degradação	Absorção de água - A10 (g/cm ²)	
	TR	T10%
1 - Sem degradação	0,11±0,010	0,14±0,004
2 - Natural	0,09±0,010	0,10±0,006
3 - Acelerada	0,16±0,010	0,18±0,013

Fonte: Elaboração própria em 2021.

Tabela 7 – Absorção de água por capilaridade no tempo 90 minutos.

Grupos - Tipo de degradação	Absorção de água - A90 (g/cm ²)	
	TR	T10%
1 - Sem degradação	0,32±0,011	0,33±0,011
2 - Natural	0,21±0,010	0,25±0,010
3 - Acelerada	0,48±0,058	0,43±0,011

Fonte: Elaboração própria em 2021.

[0037] Os gráficos apresentados nas figuras 8 e 9 e relacionam a absorção de água por capilaridade nos tempos 10 min e 90 min dos traços com o tipo de degradação. Em ambos os gráficos verificamos que as amostras submetidas a degradação acelerada apresentaram maiores taxas de absorção de água por capilaridade em comparação as amostras submetidas a degradação natural e as amostras sem degradação. Esse fato é atribuído a deterioração gerada pelo processo, que aumenta a conectividade da rede porosa da estrutura, aumentando assim a absorção de água por capilaridade em ambos os traços (BOTAS, 2009).

[0038] O processo de degradação natural não foi suficiente para gerar danos a estrutura, aumentando, porém, a idade das amostras no ensaio, o que gerou um aumento dos produtos de hidratação do cimento reduzindo os poros na estrutura e reduzindo consequentemente a absorção de água.

[0039] Comparando as amostras da argamassa de referência (TR0%) com a argamassa com ALRP (T10%) verificamos que inicialmente a introdução do resíduo aumentou os tamanhos dos poros no material aumentando assim a velocidade inicial de absorção, aumentando em média 17% a quantidade de água absorvida no tempo inicial do ensaio (10 minutos) (Figura 6). Porém, o aumento no tamanho dos poros nas amostras submetidas a degradação acelerada reduziu a quantidade total de água absorvida ao final do processo (90 minutos) (Figura 9), chegando a uma redução de 10,4% nessas amostras (BOTAS, 2009).

[0040] Conforme a NBR 13281 (2005) a argamassa produzida (T10%) se adequa a classe C3, com coeficiente de capilaridade entre 2,0 e 4,0 g/dm².min^{1/2} em todas as etapas de degradação avaliadas (sem degradação, degradação natural e degradação acelerada).

[0041] Resistência à tração e compressão: NBR 13279 (2005): Após a finalização dos ensaios citados anteriormente, três corpos de prova prismáticos de cada traço foram utilizados para determinação dos índices de resistência à tração e a compressão. Foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu AG-I 250 kN e os dispositivos de carga para o ensaio de resistência à tração na flexão e de resistência a compressão (RILEM). Primeiro foram realizados os ensaios de tração na flexão onde foi aplicada uma carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura da peça. No ensaio de compressão foram utilizadas as metades dos corpos de prova rompidos durante a flexão, e então aplicada uma carga de 500 ± 50 N/s até a ruptura das amostras.

[0042] A resistência à tração na flexão (R_f) foi calculada através da equação abaixo:

$$R_f = (1,5 \cdot F \cdot L) / 40^3$$

Onde, F é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma em Newtons e L é a distância entre os suportes – 100 mm.

[0043] A resistência à compressão (R_c) foi calculada seguindo a equação abaixo:

$$R_c = F_c / 1600$$

Onde, F_c é a carga máxima aplicada em N e 1.600 é a área da seção quadrada do dispositivo de carga em mm².

[0044] Os valores obtidos durante o ensaio de resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 8. Os valores apresentados indicam uma redução de 10% na resistência das amostras sem degradação devido a inclusão de 10% de ALRP no traço.

Tabela 8 – Resistência à tração na flexão

Grupos - Tipo de degradação	Resistência à tração (MPa)	
	TR	T10%
1 - Sem degradação	4,0	3,6
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,3	0,2
2 – Natural	6,6	5,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,6	0,7
3 – Acelerada	4,2	3,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,2	0,2

Fonte: Elaboração própria em 2021.

[0045] O gráfico apresentado na figura 10 relaciona a resistência à tração na flexão dos traços com função do tipo de degradação os quais foram submetidos. A amostra de argamassa com ALRP (T10%) aos 28 dias de idade (sem degradação) apresenta uma redução de 10% no valor de resistência à tração quando comparada a amostra de referência (TR0%). Com o aumento da idade das amostras submetidas ao processo de degradação natural, os valores de resistência do material são elevados em média 59% devido ao aumento dos produtos de hidratação do cimento nas amostras.

[0046] As amostras submetidas ao processo de degradação acelerada apresentam valores próximos aos das amostras sem degradação, pois nesse processo os efeitos de degradação foram suficientemente deletérios para compensar o ganho de resistência adquirida pelo aumento de idade das amostras. A queda nas resistências à tração das amostras TR0% e T10% entre grupos submetidos a degradação natural e acelerada foi de 36% nos dois traços.

[0047] Embora tenha havido variações nos valores de resistência à tração em função do tipo de degradação, foi possível verificar que existe uma proporcionalidade na redução dos valores entre os grupos de amostras, indicando que a 10% de ALRP no traço não influencia a durabilidade do material, sendo as amostras de cada traço degradadas de forma similar.

[0048] Conforme a NBR 13281 (2005) a argamassa produzida (T10%) se adequa a classe R6, com resistência à tração na flexão a partir de 3,5 MPa em todas as etapas de degradação avaliadas (sem degradação, degradação natural e degradação acelerada).

[0049] Os valores obtidos durante o ensaio de resistência à compressão são apresentados na Tabela 9. Através dela se pode verificar que a resistência das amostras sem degradação é aumentada em 1,6% pela inclusão de 10% de ALRP no traço.

Tabela 9 – Resistência à compressão

Grupos - Tipo de degradação	Resistência à compressão (MPa)	
	TR	T10%
1 - Sem degradação	12,3	12,5
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,4	0,2
2 – Natural	21,6	17,3
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,6	0,8
3 – Acelerada	16,0	15,2
<i>Desvio absoluto máximo</i>	0,9	0,4

Fonte: Elaboração própria em 2021.

[0050] O gráfico apresentado na figura 11 relaciona a resistência à compressão dos traços com função do tipo de degradação os quais foram submetidos. A resistência à compressão da argamassa com ALRP (T10%) aos 28 dias de idade (sem degradação) apresenta um valor 1,6% superior a amostra de referência, porém com o aumento da idade das amostras devido a submissão ao processo de degradação natural, são elevados os valores de resistência a tração do material devido ao aumento dos produtos de hidratação do cimento nas amostras, sendo o valor de resistência da amostra TR0% elevada em 75,6% e da amostra T10% em 38,4%.

[0051] Devido a degradação acelerada os valores de resistência à compressão das amostras passam a ser afetados pelos efeitos deletérios dos processos de degradação, havendo uma redução de 26% na resistência das amostras TR0% e 12% nas amostras T10%, de forma que ao final do processo de degradação as amostras com uso ALRP apresentam resistência 21,6% superior as amostras sem degradação.

[0052] Conforme a NBR 13281 (2005) a argamassa produzida (T10%) se adequa a classe P5, com resistência à compressão superior a 8,0 MPa em todas as etapas de degradação avaliadas (sem degradação, degradação natural e degradação acelerada).

Exemplos de concretizações da invenção

[0053] Através dos dados apresentados verificamos a viabilidade técnica da utilização de revestimentos argamassados com taxas de substituição de 10% de areia natural por agregado leve do resíduo PET (ALRP), sendo verificado que essa composição (T10%) apresenta melhor desempenho quanto a consistência, com aumento de 5,6% no índice de massa aparente no estado endurecido, com redução média de 3% e do módulo de elasticidade dinâmico, chegando a 23,7% de redução, quando comparado ao traço convencional de referência (TR0%). A inclusão de 10% de ALRP na argamassa ainda reduziu 10,4% da quantidade total de água absorvida ao final do processo de degradação acelerada e aumentou 1,6% a resistência à compressão das amostras sem degradação.

[0054] Os testes mecânicos confirmam o pressuposto de redução de resistência à tração devido a inclusão de ALRP na argamassa, porém, os testes de durabilidade indicam um expressivo ganho de resistência nas amostras após os 28 dias o que compensa a redução ocasionada pelos processos de degradação. Além disso, foi verificada uma relação de proporcionalidade quanto a redução da resistência à tração devido aos processos de degradação, indicando assim que porcentagem de ALRP no traço não influencia a durabilidade do material, sendo as amostras dos traços igualmente degradadas.

[0055] Abaixo será indicado a representatividade dos valores obtidos na qualidade do material produzido.

[0056] Os resultados de ensaio de índice de consistência indicam um ganho de fluidez da composição proposta, de forma que é ampliada a capacidade da argamassa de manter essa fluidez durante o tempo de aplicação (LEAL, 2012), promovendo uma maior facilidade na mistura, transporte e aplicação em condição homogênea (CARASEK, 2007), quando comparadas a argamassas convencionais.

[0057] A composição proposta produziu argamassas com menores valores de massa aparente no estado endurecido, sendo esse o intuito de grande número de pesquisas em virtude de apresentar vantagens distintas como a redução do peso próprio do edifício e maior facilidade de transporte, além de gerar redução nas emissões de carbono envolvidas no transporte quando comparada as argamassas convencionais, sendo, portanto, mais sustentável (SOUZA, 2010).

[0058] O módulo de elasticidade está relacionado ao comportamento elástico de um material, ou seja, sua capacidade de deformar sem que ocorra sem rompimento (CINCOTTO *et al.*, 1995). Os resultados indicam a redução da rigidez da argamassa proposta devido a introdução da taxa de 10% ALRP na composição. Esse fenômeno é atribuído a maior deformabilidade do agregado plástico em comparação ao agregado natural, além disso, o agregado plástico promove uma menor aderência com a matriz cimentícia, o que provoca a maior flexibilidade da argamassa.

[0059] A absorção de água de um material é diretamente proporcional a sua porosidade; e esse é um parâmetro chave para a durabilidade de materiais principalmente quando submetidos a intemperismo e fenômenos de ambientes agressivos, como é o caso de revestimentos externos, influenciando diretamente outras de suas propriedades como a resistência mecânica (MALLIDI, 1996; LU; LU; XIAO, 1999; CULTRONE *et al.*, 2004). Os resultados obtidos na pesquisa indicam que existe uma redução da quantidade de água absorvida ao longo do tempo de uso da argamassa produzida, o que pode reduzir a taxa de sua depreciação ao longo do tempo.

[0060] As propriedades mecânicas das argamassas dizem respeito ao seu estado de consolidação interna. Embora essas não sejam características determinantes em argamassas, essa deve ser capaz de suportar esforços mecânicos de diversas origens; que normalmente se traduzem em tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2010). Os valores de resistência mecânica verificados na argamassa produzida indicam que não existe redução significativa de desempenho mecânico após a substituição de 10% de areia por ALRP, além disso, os testes de envelhecimento comprovam que sua durabilidade em termos de desempenho mecânico é proporcional a das argamassas convencionais.

[0061] Diante dos resultados apresentados, a argamassa sustentável com substituição parcial do agregado natural por agregado PET reciclado se mostra eficiente como revestimento, e principalmente interessante quanto aplicado externamente, de forma a se obter todas as vantagens de desempenho adquiridas pela introdução do agregado PET. Além disso, dessa pesquisa resulta dados importantes e ainda inéditos quanto a durabilidade de argamassas com uso de ALRP.

[0062] Portanto, através dos resultados apresentados, a composição de argamassa proposta oferece excelentes características de desempenho e durabilidade, além de mitigar problemas ambientais relacionados a extração de recursos naturais (areia) e impactos socioambientais oriundos dos resíduos plásticos de polietileno tereftalato – PET. Através da pesquisa bibliográfica, documental e na base de dados do INPI foi evidenciado que a composição atende aos requisitos mínimos de registro de patente instituídos pelo órgão quanto a novidade, atividade inventiva e aplicação industrial da invenção, reunindo assim condições necessárias para merecer o Privilégio de Invenção.

REFERÊNCIAS

[0063] AKADIRI, P. O.; OLOMOLAIYE, P. O.; CHINYIO, E. A. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. *Automation in Construction*, v. 30, p. 113-125, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>. Accessed on: 05 Nov. 2019.

[0064] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13284: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[0065] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

[0066] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

REIVINDICAÇÕES

1. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", *caracterizado por* ser uma argamassa que utiliza como AGREGADO o Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) em junção com a areia natural, como AGLOMERANTE o cimento Portland e como SOLVENTE a água, de forma a obter uma composição para uso como revestimento argamassado no setor da construção civil.
2. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", de acordo com a reivindicação 1, *caracterizado por* ser constituída por traço em massa (cimento:areia:ALRP) 1:2,70:0,14, traço em volume (cimento:areia:ALRP) 1:3,04:0,32 e relação água/cimento de 0,5.
3. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", de acordo com a reivindicação 1, *caracterizado por* ser constituída por areia natural de quartzo lavada com dimensão máxima característica de 2,36 mm.
4. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", de acordo com a reivindicação 1, *caracterizado por* ser constituída de Agregado Leve de Resíduo PET (ALRP) obtido a partir da trituração de garrafas PET para obtenção do material em forma de partículas com dimensão máxima de 2,36 mm, de forma a manter a dimensão máxima característica da areia natural.
5. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", de acordo com a reivindicação 1, *caracterizado por* ser obtida através da mistura mecânica dos

agregados, aglomerante e solvente, conforme procedimento normalizado pela NBR 16541 (2016), obtendo ao final uma mistura homogênea.

6. "COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR AGREGADO LEVE DE RESÍDUO PET (ALRP)", de acordo com a reivindicação-1, caracterizado por possui viabilidade técnica como revestimento argamassado apresentando melhor desempenho quanto a consistência, massa aparente no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico, quando comparado ao traço convencional de referência em massa (cimento:areia:água) (1:3:0,5).