VIABILIDADE DE USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO AGREGADO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Claudia Gonçalves de Souza (IC) e Prof.ª Dr.ª Roberta Nunes Attili Franzin (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

A construção civil é uma das áreas que mais utiliza recursos naturais, sendo necessária a busca por fontes alternativas de recursos. Assim, este trabalho teve como objetivo, o estudo da viabilidade de substituição de agregados naturais por agregados de resíduos de concreto da indústria de pré-moldados em argamassa de revestimento. Para o estudo experimental, após a caracterização física dos agregados, foram dosados três traços de argamassa, um com 100% de agregado natural (traço de referência) e outros dois com a substituição de 25% e 50% do agregado natural pelo reciclado. Para todos os traços foram analisadas suas propriedades físicas e mecânicas como densidade no estado fresco e endurecido, índice de consistência, absorção de água, resistência à tração, resistência à compressão e resistência potencial de aderência à tração. Os resultados obtidos para o índice de consistência se mostraram dentro da faixa esperada para o traço de referência e para o traço com substituição de 25% do agregado natural pelo reciclado. Com relação à absorção de água, o traço com 25% de agregado reciclado apresentou o melhor resultado. Os ensaios de resistência mostraram resultados iguais ou superiores aos encontrados na literatura para todos os traços. Apesar dos resultados indicarem viabilidade de substituição do agregado natural pelo reciclado de concreto, uma análise refinada da granulometria dos agregados deve ser realizada, além de estudos complementares para a indicação do teor ótimo de substituição.

Palavras-chave: Argamassa de Revestimento. Agregado Reciclado. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Civil construction is one of the areas that most uses natural resources, requiring the search for alternative sources of resources. Thus, this work aimed to study the feasibility of replacing natural aggregates by aggregates from concrete waste from the precast industry in coating mortar. For the experimental study, after the physical characterization of the aggregates, three mortar mixtures were dosed, one with 100% natural aggregate (reference trace) and the other two with the replacement of 25% and 50% of the natural aggregate by the recycled one. For all traces, their physical and mechanical properties were analyzed, such as density in the fresh and hardened state, consistency index, water absorption, tensile strength, compressive strength, and potential tensile adhesion strength. The results obtained for the consistency index were within the expected range for the reference mix and for the mix with replacement of 25% of the natural aggregate by the recycled one. Regarding water absorption, the mix with

25% recycled aggregate showed the best result. Resistance tests showed results equal or superior to those found in the literature for all traces. Although the results indicate the feasibility of replacing the natural aggregate by the recycled concrete, a refined analysis of the aggregate granulometry must be carried out, in addition to complementary studies to indicate the optimal replacement content.

Keywords: Coating mortar. Recycled Aggregate. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é a base de desenvolvimento de uma sociedade, porém é um dos setores que mais utiliza recursos naturais, sendo a maior fração desses recursos, associada ao uso de agregados.

Agregados são materiais granulares provenientes da mineração, divididos em duas classes diferenciadas pela granulometria e denominados agregados miúdos e agregados graúdos. Os agregados miúdos (siltes, argilas e areias finas) possuem granulometria de 0,0075 mm a 4,75 mm, enquanto os agregados graúdos (britas e pedregulhos) possuem granulometria que varia de 4,75 mm a 75 mm.

Quanto à origem, os agregados podem ser classificados em naturais, artificiais ou industrializados, e reciclados. Os agregados naturais são aqueles encontrados na natureza na forma em que são usados, como areias de rios, cascalho etc. Os agregados artificiais ou industrializados são aqueles que, apesar de serem extraídos da natureza, precisam passar por algum processo físico ou mecânico para uso, como por exemplo as britas e areias, que são obtidas a partir do processo de britagem de rochas, ou aqueles obtidos por processos de fabricação ou por subprodutos da indústria, como a argila expandida e as escórias, respectivamente. Já os agregados reciclados são aqueles obtidos a partir da reciclagem de outros materiais, como por exemplo, resíduos de construção civil (RCC).

No Brasil, o consumo de agregados é elevado. De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC) (2022), a perspectiva para 2022 é de uma produção de aproximadamente 692 milhões de toneladas, 5% maior que a produção do ano anterior, mas já tendo chegado a 745 milhões de toneladas em 2013.Vale observar que, atualmente, já se observa em alguns locais do país, e do mundo, carência de alguns tipos de agregados. Há falta de brita no Acre e no Amazonas, e areia em São Paulo, e para atender as demandas nestes locais, é necessário o transporte dos materiais advindos de regiões distantes. Em função das dimensões continentais do Brasil, o custo do transporte corresponde à faixa de 1/3 a 2/3 do preço final do material (BAUER, 2019, p.110, v.1).

Considerando-se a elevada demanda de uso de agregados na construção e os fatos de a matéria-prima natural ser finita e da indústria da construção ser geradora de um volume considerável de resíduos, é importante buscar alternativas para a substituição dos agregados naturais e/ou artificiais, por agregados reciclados, na produção de materiais de construção. O que pode contribuir para uma desaceleração da exploração de recursos naturais, além de ser uma alternativa de uso para o RCC e, consequentemente, uma forma de incentivar a economia circular no setor.

A construção civil no Brasil gerou cerca 44,5 milhões de toneladas de resíduos em 2019, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2020). Dessa quantidade, apenas 21% dos resíduos são reaproveitados. Ainda, segundo estimativas da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) (2020), 98% dos RCC são reutilizáveis.

Apesar do baixo reaproveitamento de resíduos da construção ainda nos dias atuais no Brasil, é importante ressaltar que já em 2002 foi publicada a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2002) com diretrizes para a gestão dos resíduos da construção civil, em 2004 foi publicada a norma ABNT NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), que classifica os resíduos sólidos e semissólidos de acordo com a periculosidade, e em 2010 foi promulgada a Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no país (BRASIL, 2010).

De acordo com a Resolução nº 307, os resíduos são provenientes de construções e demolições de obras de construção civil, e são divididos em 4 classes de acordo com o tipo de resíduo e de sua destinação, denominadas A, B, C e D. Entretanto, apenas os resíduos classificados como Classe A são destinados para reutilização na construção civil.

Os agregados RCC classe A são subdivididos em dois grupos, o de agregado misto, que contém fragmentos de cerâmica vermelha e maior porosidade, e o de agregado de concreto, que apresenta menor porosidade comparado ao misto. A porosidade do agregado pode interferir no desempenho do material que o utiliza. Assim, de forma à não prejudicar as suas características mecânicas, os resíduos de concreto têm sido mais frequentemente utilizados na substituição de agregados naturais ou artificiais.

Um dos principais usos para esse tipo de resíduo, é como agregado reciclado para produção de concretos e argamassas, destacando-se sua utilização na composição de argamassas de revestimento, foco deste trabalho.

Apesar de ser uma solução plausível, a substituição de agregados naturais e/ou artificiais por agregados de RCC no país, até então, é pequena, em razão do preconceito relacionado à possível falta de qualidade dos materiais reciclados. Mas é importante salientar que a norma ABNT NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021) foi atualizada recentemente, a fim de especificar o uso de agregados reciclados a partir de RCC Classe A em argamassas e concretos, inclusive para fins estruturais.

Uma legislação favorável, aliada à normas técnicas que permitem o uso de agregados reciclados e um número crescente de pesquisas envolvendo novos materiais a partir desses agregados, são pontos fundamentais para seu uso em escala, na construção.

Países como a Holanda, por exemplo, que apresenta esgotamento de britas desde 2005, encontra-se à frente do Brasil em relação a pesquisas de materiais de construção com agregados reciclados. A Holanda é um dos países líderes em consumo de agregados reciclados de Resíduos de Construção Civil (RCC), com 80% do volume aproveitado (FREITAS, 2018).

No Brasil, há ainda muito o que ser feito com relação às pesquisas de novos materiais compostos com agregados reciclados. Os estudos atuais apresentam pontos que ainda precisam ser avaliados. Em geral, a taxa de substituição varia de 15% a 35% (CARASEK, 2018; ROCHA, 2019; SANTANA; PEREIRA, 2020), a caracterização do material a ser reciclado é imprecisa, uma vez que a procedência muitas vezes é desconhecida, e as condições a qual são expostas também (ROCHA, 2019).

No caso das argamassas, estudos dos últimos três anos mostram que as propriedades mecânicas com esses teores de substituição aproximam-se do limite mínimo (0,3 MPa) estipulado pela norma ABNT NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), para a resistência de aderência à tração para revestimento de paredes. Porém, há outros fatores que podem viabilizar ou inviabilizar essa substituição, como a interferência do clima, como essa argamassa se comporta na exposição a intempéries e se as argamassas produzidas com RCC, apresentam mesma incidência de manifestações patológicas que uma argamassa produzida com agregado natural ou artificial. Vale considerar, no entanto, que manifestações patológicas em argamassas de revestimento, independentemente de sua composição são comuns. As falhas podem ocorrer por diversos fatores, entre eles problemas no projeto, uso de materiais inadequados, erros de execução ou por problemas de manutenção (BAUER, 2019, p.547, v.1).

O presente estudo buscou substituir o agregado natural (areia) por agregado reciclado de concreto (areia reciclada), na produção de argamassa de revestimento, de forma a garantir algumas de suas propriedades físicas e mecânicas, e contribuir com parâmetros técnicos que validem a reinserção desse resíduo na construção para o preparo dessas argamassas. Resultados de pesquisas como esta, contribuirão para uma maior sustentabilidade do setor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Argamassas de revestimento são materiais de construção que apresentam, dentre as principais funcionalidades, a proteção dos elementos de vedação de agentes agressivos, à estanqueidade à água e gases, além do auxílio na função de desempenho térmico e acústico de uma edificação.

As características das argamassas são determinadas pelas propriedades mecânicas, físicas e químicas, definidas pela norma ABNT NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

NORMAS TÉCNICAS, 2005), que estipula os requisitos para argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

As propriedades mecânicas correspondem às tensões com a quais o material se rompe e pode ser determinada por meio de testes uniaxiais de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e ensaio de resistência potencial de aderência à tração. As propriedades físicas são as propriedades observadas ou medidas sem haver alteração na composição ou na estrutura ou forma do material, como a densidade, massa aparente, coeficiente de capilaridade e de retenção de água, também determinadas por ensaios previstos em normas. As propriedades químicas relacionam-se à interação de uma substância com outra, permitindo saber se ocorre reação química em determinadas condições, como a resistência a agentes químicos e a sulfatos.

As argamassas de revestimento são muito sensíveis quanto à sua produção, de forma que problemas oriundos deste processo podem influenciar significativamente a ocorrência de manifestações patológicas durante seu uso. Essas manifestações podem ocorrer pela variedade climática local, no seu processo de cura. Assim, em função da localização geográfica e clima diversificado, o comportamento de materiais cimentícios pode ser bem diferente.

Dentre as possíveis manifestações patológicas que podem ser apresentadas por argamassas de revestimento na fase de aplicação do material nas superfícies, as fissuras são as mais recorrentes. Essas fissuras ocorrem por um fenômeno chamado calor de hidratação. Esse fenômeno consiste na liberação de calor pelo concreto a partir de um processo exotérmico, ou seja, uma reação química do clínquer, principal componente do cimento, com a água. Fatores externos como a temperatura ambiente, podem interferir nesse processo na fase de aplicação e cura do material.

Em dias cuja temperatura esteja elevada, ou seja, uma temperatura acima dos 30ºC, o calor de hidratação é superior ao artificial, o que acaba aumentando a evaporação da água, ocasionando a retração do concreto e, consequentemente, gerando algumas fissuras. Já em dias de baixa temperatura, ou seja, abaixo de 15ºC, ocorre um baixo calor de hidratação, o que retarda o endurecimento e diminui a resistência inicial (NASCIMENTO, 2019).

Durante a vida útil do revestimento, as fissuras também podem ocorrer, além de outras manifestações como descolamentos e manchas, que são associados à temperatura e às águas de vazamentos e provenientes da chuva, que é considerada água ácida. Em concretos com contato direto com água ácida, ocorre o fenômeno de agressividade, devido a presença de substâncias químicas na água, suscetíveis a reações com certos constituintes do cimento presentes no concreto (BAUER, 2019, p.91, v.1).

As grandes cidades são as mais sujeitas às águas ácidas, devido a maior industrialização e grande quantidade de veículos automotores. Cidades como São Paulo e Rio de Janeiro confirmam a ocorrência da chuva ácida, com registro do pH da água inferior a 5 (JESUS, 1996), partindo do limite para se considerar chuva ácida pH menor que 5,6.

Apesar da importante funcionalidade, as argamassas de revestimento podem apresentar falhas decorrentes, tanto do processo de formulação, quanto de aplicação e uso. A etapa de formulação é muito sensível, uma vez que o desempenho da argamassa é fortemente dependente da matéria-prima utilizada e de sua dosagem.

Um fator que dificulta o uso de RCC como agregado nas argamassas, principalmente no Brasil, é o fato de que esse material pode prejudicar sua resistência, uma vez que, devido à maior porosidade do agregado, há a necessidade de se colocar uma maior quantidade de água no traço. No entanto, estudos como este, proposto neste projeto, têm sido realizados e contribuído para desmistificar tal fato. As pesquisas mostram que, para certos teores de substituição do agregado artificial pelo agregado de RCC, não há comprometimento da resistência da argamassa.

O estudo de Oliveira (2011), por exemplo, que se destaca na área, mostra os resultados de ensaios das propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas produzidas com RCC. Ele aponta que a substituição de 35% do agregado artificial miúdo por RCC é viável, para material obtido em central de reciclagem de resíduos, responsável por separação e caracterização dos resíduos de construção e demolição.

Pinto e Fontanini (2018) mostram que as propriedades físicas e mecânicas de uma mistura com substituição de 20% por agregados de RCC são satisfatórias. Já o estudo de Pimentel (2018) aponta, para um teor de substituição do agregado de RCC de 30%, com resultados dentro da norma ABNT NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Vale ressaltar que em ambas as pesquisas foram utilizados materiais (RCC) obtidos de unidades recicladoras e que, portanto, passaram por controle de composição.

Parece claro que a procedência dos resíduos pode ser um fator de interferência preponderante no desempenho do material que o utiliza como agregado, em função da chance de contaminação. Rocha (2019) utilizou em seu estudo, agregado obtido em um terreno baldio, que não passou por nenhuma triagem ou tipo de controle. O material estava em contato com madeiras, tintas, telhas, pisos, concreto, borracha e plástico, e que combinado com o contato do solo, pode ter acarretado um resultado insatisfatório para a resistência da argamassa, indicando a não viabilidade do traço com substituição de 25% do

agregado natural. Os ensaios realizados foram similares aqueles realizados pelos outros autores.

Considerando a necessidade de suprir a demanda por agregados naturais na indústria da construção civil e dar um fim nobre para a quantidade significativa de resíduos gerados no setor, mais estudos como esse são necessários para a consolidação de informações que possam contribuir para a mitigação do pré-conceito quanto ao uso do RCC na composição de materiais de construção e balizar normas técnicas para seu uso.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado integralmente por meio de pesquisa experimental. Foram produzidos diferentes traços de argamassa sem e com a substituição do agregado miúdo natural (areia natural) por agregado reciclado (areia reciclada), para a avaliação de seus desempenhos físico e mecânico.

O agregado reciclado utilizado foi obtido a partir de resíduos de concreto, provenientes da indústria de pré-moldados, e doado pela construtora Leonardi Construção Industrializada. O resíduo chegou em forma de pedregulho e foi britado e moído para atingir a dimensão de agregado miúdo (Figura 1 (a) e (b)).

Figura 1: Agregado de RCC.

(a) (b)

Fonte: (a) Mathias, Amparado, Gonçalves e Franzin (2022); (b) Os autores (2022).

Para a caracterização física dos agregados (natural e reciclado) foram realizados ensaios de granulometria e determinação da massa específica.

O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento, para avaliação do tamanho das partículas dos agregados miúdos, conforme a norma ABNT NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Para a análise do módulo de finura (MF) foi utilizada a equação (1) e para determinação da dimensão máxima característica foi adotado conforme a norma ABNT NBR

NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS, 2003) o valor com porcentagem inferior a 5%.

$$MF = \frac{\sum porcentagens\ retidas\ acumuladas}{100} \quad (1)$$

A determinação da massa específica foi realizada pelo método de do frasco de Chapman, de acordo com a norma ABNT NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Para o traço de referência adotado, foi utilizado uma parte de cimento, para três partes de agregado e relação água/cimento (a/c) 0,58, baseando-se em Pimentel (2018) que apresenta uma variedade de autores que estudaram o mesmo traço. O cimento utilizado foi o CP II F, ideal para uso em revestimentos externos em argamassa.

Foram dosados três traços, um sem o uso do RCC (traço de referência), e outros dois com os teores de 25% e 50% de substituição da areia natural por areia reciclada, denominados traços 1, 2 e 3, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Traços e quantidades de materiais utilizados.

	Traço	**Agregado natural (%)**	**Agregado reciclado (%)**	**Massa de cimento (kg)**	**Massa de agregado natural (kg)**	**Massa de agregado reciclado (kg)**	**Massa total de agregado (kg)**
1	1:3:0,58	100	0	6,00	18,00	0,00	18,00
2	1:3:0,58	75	25	6,00	13,50	4,50	18,00
3	1:3:0,58	50	50	6,00	9,00	9,00	18,00

Fonte: Os autores (2022).

A fim de se analisar a trabalhabilidade da argamassa foi realizado o ensaio de índice de consistência, definido na norma ABNT NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Para cada traço foram moldados 14 corpos de prova cilíndricos de dimensões 5cm×10cm e 3 corpos de prova prismáticos, de dimensões 4cm×4cm×16cm, conforme as normas ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e ABNT NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), respectivamente.

A resistência mecânica foi avaliada por meio dos ensaios de resistência à compressão e de resistência à tração na flexão, ambos conforme a norma ABNT NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Para os ensaios de resistência à compressão foram utilizados os corpos de prova cilíndricos, enquanto para os ensaios de resistência à tração na flexão foram utilizados os corpos de prova prismáticos.

Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados 2 corpos de prova cilíndricos para o traço de referência (traço 1) e 4 corpos de prova cilíndricos para cada um dos traços com o agregado reciclado (traços 2 e 3), nas idades 7 e 28 dias.

Já para o ensaio de resistência à tração na flexão foram utilizados os corpos de prova prismáticos, sendo 3 para o traço 1 e 3 para cada um dos traços 2 e 3. Foi realizado o ensaio com um corpo de prova para o ensaio na idade de 7 dias, e com dois corpos de prova para a idade de 28 dias, para cada traço.

Para os corpos de prova cilíndricos foram realizados também, ensaios para a determinação da massa específica do material, ensaio de absorção de água por capilaridade e ensaio de ultrassom. Os ensaios de ultrassom foram feitos para os corpos de prova nas idades 7 e 28 dias, enquanto a determinação da massa específica e o ensaio de capilaridade foram realizados apenas para os corpos de prova de 28 dias de idade, para cada traço.

O ensaio para a determinação da massa específica foi feito segundo a norma ABNT NBR 13280 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), o ensaio de capilaridade foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 9779, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e o ensaio de ultrassom, para verificação da homogeneidade e compacidade da argamassa, foi realizado segundo a norma ABNT NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Além dos ensaios para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais citados acima, foi feito o ensaio de resistência potencial de aderência à tração para todos os traços. Para isso, foi construída uma parede de dimensões 2,0m×0,8m×0,2m, tendo como substrato reboco, que foi produzido com o agregado natural na proporção de 1:5, e sobre o qual foi executado o revestimento das argamassas. No ensaio, foram coletados 12 corpos de prova por meio de arrancamento, para cada traço, conforme as especificações da norma ABNT NBR 15258 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de caracterização do agregado miúdo, bem como dos ensaios realizados para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas do traço de argamassa de referência e com as substituições do agregado natural pelo agregado reciclado são apresentados a seguir.

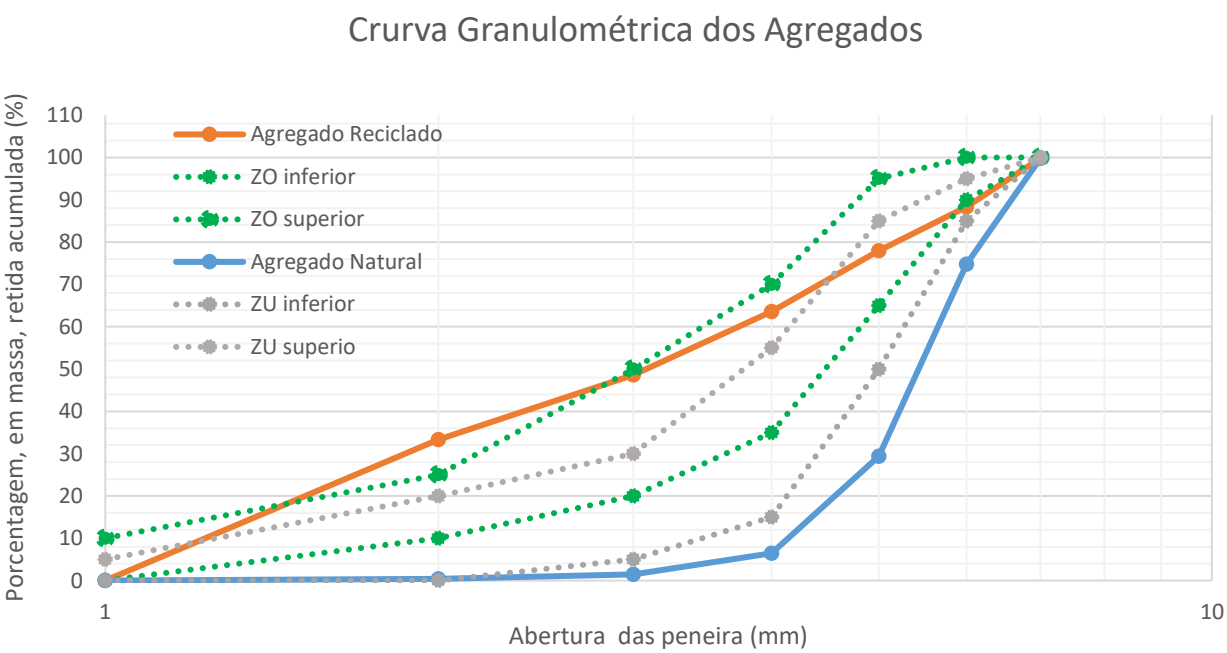
Os resultados da caracterização granulométrica do agregado natural e do agregado reciclado são apresentados na Tabela 2 e no Gráfico 1, assim como o Módulo de Finura (MF) e a Dimensão Máxima Característica (DMC).

Tabela 2: Análise granulométrica dos agregados natural e reciclado.

Abertura das peneiras (mm)	**Porcentagem retida acumulada (%)**	
	Agregado Natural	**Agregado Reciclado**
4,75	0,03	0,00
2,36	0,38	33,32
1,18	1,48	48,57
0,6	6,49	63,55
0,3	29,37	77,98
0,15	74,81	88,33
Fundo < 0,15	99,83	99,86
MF	1,13	3,12
DMC	1,18 mm	4,75 mm

Fonte: Os autores (2022).

Gráfico 1: Curva granulométrica dos agregados natural e reciclado.



Fonte: Os autores (2022).

No Gráfico 1 estão apresentadas as curvas granulométricas para os agregados natural e reciclado utilizados neste trabalho, assim como as curvas obtidas a partir dos dados definidos na norma ABNT NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), para as zonas ótima e utilizável para agregados miúdos. De acordo com a norma, o agregado pode ser utilizado na construção civil, desde que todos os pontos da curva de granulometria do respectivo agregado estejam dentro da zona utilizável. Como pode ser

observado no gráfico, a areia natural utilizada neste trabalho está reprovada para uso na construção civil, uma vez que todos os pontos da curva estão fora da região utilizável. Já para a areia reciclada, observa-se que apenas um dos pontos está fora da região, enquanto outro ponto está no limite da zona ótima superior.

Analisando-se o módulo de finura (MF) dos agregados (Tabela 2), é possível observar que o módulo de finura do agregado reciclado é cerca de 2,8 vezes maior que o do agregado natural. O agregado reciclado apresenta uma granulometria de areia média, enquanto o agregado natural está com granulometria de areia fina.

Com relação à dimensão máxima característica (DMC), os resultados também são diferentes (Tabela 2). Considerando os resultados apresentados para o agregado reciclado, observa-se que praticamente 33% dos grãos ficaram retidos na peneira de 4,75 mm, ou seja, cerca de 1/3 dos grãos apresentaram esta granulometria, explicando o fato do ponto estar fora da região utilizável da respectiva curva do Gráfico 1 e indicando que o material deveria ter sido submetido a um processo de moagem, após a britagem. Os resultados mostram que a granulometria dos dois agregados é diferente, quando para fins de substituição, deveriam ter sido semelhantes.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da massa específica dos agregados miúdos.

Tabela 3: Massa específica dos agregados

Tipo de agregado	**Massa específica (g/cm³)**
Agregado Natural	2,450
Agregado Reciclado	2,640

Fonte: Os autores (2022

Observa-se que a massa específica do agregado reciclado é 7% maior que a do natural, fato que não concorda com os resultados de outros autores da literatura como Rocha (2018) e Carasek (2018). Vale ressaltar que tal parâmetro deve estar relacionado com a composição do material que constitui o agregado reciclado, entre outros. Para um maior entendimento, no entanto, novos ensaios precisam ser realizados.

Os resultados para o índice de consistências das argamassas, que refletem a trabalhabilidade dos materiais em seu estado fresco são apresentados na Tabela 4. O valor apresentado para cada traço representa a média de três medidas, de acordo com a norma ABNT NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Tabela 4: Índice de consistência na mesa

Traço	Média (mm)
1	260 ± 1
2	265 ± 1
3	270 ± 1

Fonte: Os autores (2022).

Pimentel (2018) e Souza e Leite (2020) apresentam como índice ideal para a consistência de uma argamassa de revestimento o valor médio de (260 ± 5) mm. Analisando os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que a consistência da argamassa de revestimento do traço 1 ficou dentro do índice apresentado pelos autores, o índice do traço 2 encontra-se no limite, considerando a margem de incerteza, enquanto o traço 3 mostra uma consistência acima da faixa considerada como ideal. Valores baixos do índice estão associados a materiais mais fluidos, enquanto altos índices, resultam em um revestimento mais rijo, que necessita de um teor maior de água. No entanto, neste trabalho o teor de água utilizado nos traços de estudo foi mantido fixo para efeitos de comparação.

Os valores de massa específica dos traços de argamassa no estado endurecido são apresentados na Tabela 5. Observa-se que os traços 2 e 3 apresentam valores superiores em relação ao traço 1.

Tabela 5: Massa especifica no estado endurecido.

Traço	Massa específica (kg/m^3)
1	1890
2	1930
3	1920

Fonte: Os autores (2022).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas obtidos para os corpos de prova cilíndricos, de cada traço nas idades 7 e 28 dias de idade.

Tabela 6: Velocidades de propagação de onda ultrassônicas.

Traço	Velocidade com 7 dias (m/s)	Velocidade com 28 dias (m/s)
1	2881	2916
2	3305	3744
3	3509	3361

Fonte: Os autores (2022).

As velocidades de propagação da onda ultrassônica no material contribuem para a avaliação de sua qualidade e homogeneidade. Para a análise desses resultados utilizou-se a classificação de qualidade de Bauer (2019, p.391, v.1) e mostrada no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação de qualidade segundo a velocidade da onda.

Velocidade da Onda Ultrassônica (m/s)	**Qualidade do Concreto**
V > 4500	EXCELENTE
3500 < V < 4500	ÓTIMO
3000 < V < 3500	BOM
2000 < V < 3000	REGULAR
V < 2000	RUIM

Fonte: Bauer, L.A. (2019, p.391, v.1).

De acordo com esse critério de classificação, o traço 1 apresentou qualidade ruim, enquanto os traços 2 e 3 apresentaram qualidade ótima e boa, respectivamente.

Bauer (2019, p.392, v.1) relata que os resultados do ultrassom estão correlacionados com a massa específica do material, de forma que quanto mais denso o material em estudo maior é a velocidade de propagação da onda de ultrassom. É possível observar, então, que para os resultados mostrados neste trabalho, essa correlação é observada. O traço para o qual a classificação foi ótima, foi também o traço para o qual se observou a maior massa específica para a idade de 28 dias.

Para os traços 1 e 2 foi observado aumento da velocidade de propagação para os corpos de prova de 28 dias de idade, em relação aos de 7 dias, como esperado, devido ao corpo ter passado pelo processo de cura por um maior tempo, se tornando mais homogêneo. Para o traço 3, a velocidade registrada na idade de 28 dias foi menor, podendo ser justificada pelo ensaio não ter sido realizado com o mesmo corpo de prova de 7 dias, e por falhas de compactação do corpo de prova de 28 dias, na hora da moldagem.

Os resultados de absorção de água são mostrados na Tabela 7. A capilaridade ocorre quando existe contato de líquido com o substrato, isto é, quando a base do corpo de prova permanece em contato com água. Em nível microscópico, são originadas interfaces curvas de contato entre a água e os poros, essa interação gera a pressão capilar e a quantidade de água que será absorvida por esse poro é função dessa pressão de sucção capilar (Santana e Aleixo, 2017).

Tabela 7: Absorção de água.

Traço	**Absorção (g/cm^2)**
1	1,96
2	1,56
3	1,97

Fonte: Os autores (2022)

Observa-se que os valores de absorção dos traços 1 (traço de referência) e 3 (traço com 50% de agregado reciclado) são equivalentes, enquanto o traço 2 (com 25% de agregado reciclado) apresentou menor valor. Em geral, traços com agregado reciclado apresentam valores maiores de absorção, uma vez que esses materiais são mais porosos que os agregados naturais, como apontado nos estudos de Carasek (2018) e Santana (2020). Neste trabalho, no entanto, os resultados não se mostram coerentes com o que tem se observado na literatura, uma vez que é possível observar que o traço com maior quantidade de agregado reciclado obteve um valor de absorção equivalente ao traço de referência.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e de resistência potencial de aderência à tração, para a análise das propriedades mecânicas das argamassas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resistências das argamassas com agregado natural e com agregado reciclado.

Traço	**Resistência à tração**		**Resistência à compressão**		**Resistência potencial de aderência à tração**
	7 dias (MPa)	**28 dias (MPa)**	**7 dias (MPa)**	**28 dias (MPa)**	**(MPa)**
1	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	12,57 ± 2,84	14,14 ± 1,36	0,25
2	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	6,57 ± 0,79	16,09 ± 0,09	0,41
3	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	10,41 ± 0,44	17,68 ± 0,18	0,25

Fonte: Os autores (2022)

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado nos traços provocou um aumento na resistência a compressão do material aos 28 dias, ao contrário do que ocorre normalmente, de acordo com outros resultados da literatura. Isso pode ter ocorrido em função do agregado reciclado estar com uma granulometria não compatível com a granulometria da areia utilizada no traço da argamassa de referência.

Os resultados das resistências à tração estão coerentes com os estudos de Pimentel (2018) e Rocha (2019), que variam entre 0,1 e 0,2 MPa. Para a resistência à tração ambos os estudos obtiveram com o agregado natural, maior resistência comparado ao reciclado. Neste estudo, no entanto, observa-se que todos os traços, sem e com o agregado reciclado, apresentaram os mesmos valores para essa resistência. Para a resistência potencial de aderência à tração, os resultados deste trabalho estão um pouco superiores àqueles apresentados pelos autores, cujos valores encontram-se na faixa de 0,19 e 0,20 MPa.

Além da resistência potencial de aderência à tração, outro ponto é observado no ensaio normatizado pela ABNT NBR 15258 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021), a forma da ruptura na aderência superficial. A norma apresenta 4 formas de ruptura na aderência superficial, os resultados do presente estudo, apresentaram 10% de corpos de provas cujas rupturas ocorreram na interface, isso é, no momento do arranque o

aparelho solta sem a superfície de argamassa ou base, indicando assim falha na colagem. No restante da análise foi predominante a ruptura no interior do revestimento, ou seja, no momento do arranque a argamassa se rompe em seu interior, conforme deveria acontecer, segundo a norma referida anteriormente. A Figura 2 mostra a parede e alguns corpos de prova gerados no ensaio de arrancamento.

Figura 2: (a) Parede onde foi realizado o ensaio de resistência potencial de aderência à tração; (b) corpos de prova pós arrancamento.

(a) (b)

Fonte: Os autores (2022).

Diante dos ensaios realizados e de seus resultados, além de outros estudos observados na literatura, é possível perceber que o agregado reciclado de concreto é um potencial substituto para o agregado natural em argamassas de revestimento, no entanto, é necessário se realizar uma análise granulométrica mais precisa dos agregados, antes de se produzir as argamassas de referência e com o material reciclado. Para uma comparação mais efetiva das propriedades das argamassas estudadas, a granulometria dos agregados deveria ter sido parecida e, ambas, estarem dentro dos padrões utilizáveis para a construção civil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento físico e mecânico de uma argamassa de revestimento com a substituição do agregado natural (areia) pelo agregado de resíduo de construção civil (areia reciclada a partir de concreto da indústria de pré-moldado).

A primeira parte dos ensaios, consistiu na caracterização física dos agregados. Foi constatado, que o agregado reciclado não apresentou características granulométricas semelhantes às do agregado natural, o que não deveria ocorrer considerando a substituição. Além disso, a areia natural não apresentou granulometria dentro da zona utilizável para agregado miúdo. Esses fatos apontam para a necessidade de se fazer um estudo

granulométrico mais preciso de ambos os tipos de agregados para a produção das argamassas.

Na segunda parte, foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas das argamassas de revestimento produzidas sem e com a substituição do agregado natural pelo reciclado. As densidades dos traços com o agregado reciclado se mostraram superiores, assim como os índices de consistência, que estão relacionados com a trabalhabilidade das argamassas. Observou-se que na medida em que se incorpora o RCC, a trabalhabilidade diminui o que dificulta o manuseio da argamassa, indicando a necessidade de um maior teor de água. Como esperado, a argamassa com maior teor de agregado reciclado (50%) apresentou maior índice de consistência. Em propriedades como absorção e homogeneidade da argamassa de revestimento, a substituição pelo agregado reciclado trouxe resultados melhores do que com agregado natural.

Analisando as propriedades mecânicas, a substituição pelo agregado reciclado aumentou a resistência à compressão e a resistência potencial de aderência à tração. Com relação à resistência à tração, os resultados foram equivalentes para os três traços. Vale ressaltar, no entanto, que para resistências altas, a rigidez da argamassa de revestimento se torna alta, o que pode comprometer sua utilização.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que a substituição do agregado natural pelo agregado proveniente de Resíduos de Construção Civil (RCC) da indústria de pré-moldado se mostra viável. O traço 2 (com 25% de agregado reciclado) apresenta os melhores resultados neste trabalho, porém é necessário um estudo mais refinado para a indicação do teor ótimo de substituição. Assim, para trabalhos futuros indica-se:

a) um estudo granulométrico refinado dos agregados, para posterior produção dos traços de argamassa de revestimento;

b) adequação do teor de água em função do teor de substituição dos agregados para ajuste da trabalhabilidade da argamassa a condições mínimas de aplicabilidade;

c) realização de outros ensaios, além daqueles realizados neste estudo, como a capacidade de retenção de água e teor de ar incorporado, fatores que influenciam a viscosidade do material e consequentemente sua trabalhabilidade;

d) uma análise química a partir de ensaios de resistência a sulfatos para verificar a sua durabilidade mediante ao ataque desses materiais.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020.** São Paulo: ABRELPE, v. 5, n. 1, 2020. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama/. Acesso em: 3 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR9779**: ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS — Determinação da absorção de água por capilaridade. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. 2 ed. Rio De Janeiro, 2005. 7 P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 2: Aderência ao substrato. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - requisitos e métodos de ensaios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2021. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 5 p.9

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado Miúdo - Determinação De Massa Específica E Massa Específica Aparente. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Entulho mercado**. São Paulo: ABRECON, 2020. Disponível em: https://abrecon.org.br/entulho/mercado/. Acesso em: 03 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (Brasil) (org.). **Mercado de agregados – Perspectivas para 2022**. Disponível em: https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregadosperspectivaspara2022#:~:text=A%20perspectiva%20para%202022%20%C3%A9, em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20ano%20passado.Acesso em: 17 ago. 2022.

BRASIL. Decreto-lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, P. 2. 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, 5 de julho de 2002.** Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONAMA – Conselho Nacional do meio Ambiente.

BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 542 p. 1v.

CARASEK, H. *et al*. **Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento**. 2018. 13 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano; Instituto Federal de Goiás., Goiás, 2018.

FREITAS, LINO DE**.** Belo Horizonte: **Dom Total**, 05 jun. 2018. Disponível em: https://domtotal.com/noticias/index.jsp?id=1262733. Acesso em: 17 ago. 2022.

JESUS, Emanuel Fernando Reis de. A importância do estudo das chuvas acidas no contexto da abordagem climatológica. **Sitientibus**, Feira de Santana, v. 1, n. 14, p. 143-153, jan. 1996.

NASCIMENTO, Laecio Guedes do *et al*. Influência da variação de temperatura da água de emassamento na dosagem do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 61., 2019, Fortaleza. **Anais** [...]. Timon: Ibracon, 2019. p. 1-13.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de. **Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE**, Brasil., Fortaleza, v. 1, n. 41, p. 21-34, jun. 2011.

PIMENTEL, Lia Lorena *et al*. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 1, 5 mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0305.

PINTO, Rebeca Mochnacs; FONTANINI, Patricia Stella Pucharelli. Caracterização de argamassas de revestimento com agregado reciclado (cinza). In: Congresso De Iniciação Cientifica UNICAMP, 26., 2019, Campinas. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2019. v. 26.

ROCHA, Jordania dos Santos et al. Efeitos da incorporação de resíduos de construção e demolição na aderência de argamassas de revestimento. In: ENGINEERING SCIENCES, 7., 2019, Tocantins**. Engineering Sciences**. Tocantins: Companhia Brasileira de Produção Cientifica, 2019. p. 305-318.

SANTANA, Bruna Vieira de; ALEIXO, Isabella Venâncio. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. 2017. 62 f. Monografia (Especialização) - Curso de Construção Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília - Uniceub, Brasília, 2017.

SOUZA, Juliane Santos; LEITE, Mônica Batista. Avaliação da produção e comportamento de argamassas com agregados reciclados de resíduo da construção e demolição / evaluation of production and behavior of mortars with recycled aggregates from construction and demolition waste. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 6, n. 10, p. 79872-79887, 2020. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n10-421.

Contatos: claudiags42@hotmail.com e roberta.franzin@mackenzie.br