

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO NO CONCRETO: UMA ANÁLISE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Mariana Felberk de Almeida Silva (Centro Universitário Estácio Unijipa) E-mail: marianafelberk@hotmail.com

Diego Rodrigues Bonifácio (Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES) E-mail: diego.bonifacio@universo.univates.br

Resumo: Um dos setores que mais consome os recursos naturais do mundo, com grande responsabilidade na crise ambiental deste século, é o setor da construção civil. Por isso, a comunidade global busca meios mais eficientes e sustentáveis para extração e utilização dos recursos naturais. A mais recente conscientização quanto à destinação de materiais não degradáveis, como o vidro, é tema recorrente na construção civil, eis que a extração desenfreada da areia para sua produção, e o descarte sem consciência ecológica do produto fabricado na natureza, são responsáveis por diversos impactos ambientais negativos. Nesse contexto, visando a produção de concreto mais sustentável, surge a utilização do resíduo de vidro moído como possível agregado miúdo, para substituição da areia nos fins estruturais. Considerando esse fator, a presente pesquisa teve como objetivo o estudo da viabilização do resíduo de vidro moído coletado do descarte no município de Ji-Paraná/RO, em substituição parcial do agregado miúdo no concreto estrutural de 25 MPa. Para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa, foram executados ensaios laboratoriais e uma análise comparativa entre o concreto convencional de traço 1:2,11:3,14:0,586 (cimento: areia: brita: a/c) e o concreto com adição de resíduo de vidro moído em substituição parcial de 50% do agregado miúdo natural. Para tal substituição, o material foi moído e peneirado até que se obtivesse a granulometria semelhante à da areia natural fina. Por fim, foi possível constatar que o concreto sustentável de substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro moído não atinge os 25 Mpa.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Concreto sustentável. Agregado miúdo. Vidro.

PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE BY GROUNDED GLASS RESIDUE IN CONCRETE: AN ANALYSIS ON AXIAL COMPRESSION RESISTANCE

Abstract: One of the sectors that most consumed natural resources in the world, with great responsibility for the environmental crisis of this century, is the civil construction sector. Therefore, the global community seeks more efficient and sustainable ways to extract and use natural resources. The most recent awareness regarding the destination of non-degradable materials, such as glass, is a recurring theme in civil construction, as the unbridled extraction of sand for its production, and the disposal without ecological awareness of the product manufactured in nature, are responsible for several negative environmental impacts. In this context, aiming at the production of more sustainable concrete, the use of ground glass waste appears as a possible fine aggregate, to replace sand for structural purposes. Considering this factor, the present research aimed to study the viability of ground glass waste collected from disposal in the city of Ji-Paraná/RO, in partial replacement of fine aggregate in structural concrete of 25 MPa. In order to reach the objectives proposed by the research, laboratory tests were carried out and a comparative analysis was carried out between conventional concrete with a ratio of 1:2,11:3,14:0,586 (cement: sand: gravel: w/c) and concrete with the addition of ground glass residue in partial replacement of 50% of the fine natural aggregate. For such replacement, the material was ground and sieved until a granulometry similar to that of fine natural sand was obtained. Finally, it was possible to verify that the sustainable concrete of partial replacement of sand by ground glass waste does not reach 25 Mpa.

Keywords: Sustainability. Sustainable concrete. Small aggregate. Glass.

1. Introdução

Sabe-se que a construção civil está diretamente relacionada com o desenvolvimento urbano e, neste sentido, a engenharia anseia por novos métodos e metodologias que alavanquem este crescimento. A busca por materiais mais resistentes, duráveis e mais sustentáveis tem sido objeto de muitos pesquisadores. Além dos materiais inovadores, a investigação de novos procedimentos e métodos construtivos que aperfeiçoem a construção e mitiguem danos ao

meio ambiente é fundamental para o progresso das construções.

Os impactos ambientais estão ligados à maneira que a sociedade vive e a forma com que fazem o uso do ambiente. O descarte do vidro incorretamente ocasiona diversos problemas ambientais, como: aumento da extração de recursos naturais, acúmulo de resíduos nas áreas urbanas, aumento do consumo de matérias primas retiradas da natureza, aumento do volume do lixo e conseqüentemente a diminuição da vida útil dos aterros sanitários. Assim, surgem diversos estudos que buscam reciclar os diferentes tipos de vidro e reduzir os impactos ambientais (BACKER, 2007).

A areia, também objeto de estudo deste trabalho, atualmente é um material usado em larga escala pela indústria da construção civil, se enquadra como um dos componentes primordiais na composição do concreto. O seu ponto fraco é de fato ser um recurso natural, causando danos críticos à fauna e flora no espaço utilizado para a sua extração, atingindo diretamente o bem-estar do meio ambiente. Levando em consideração que a construção civil é uma das principais responsáveis pela degradação do meio ambiente, haja visto que é uma das maiores geradoras de resíduos sólidos no mundo, faz-se necessário averiguar possibilidades da criação de materiais mais sustentáveis. Neste sentido, este artigo analisa o comportamento do concreto na resistência à compressão axial com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro moído.

2 Referencial teórico

O vidro é amplamente empregado no cotidiano das pessoas, trata-se de um material utilizado na composição de diversos aparelhos e utensílios da atualidade (ALUCCI, 2001). Na construção civil, a sua utilização é amplamente explorada (LIOTTO e SANTANA, 2020). O vidro é uma substância inorgânica com características do estado líquido, mas que, quando resfriado, alcança um grau de viscosidade tão alto que se torna rígido para todos os usos práticos. Assim, visto sob o aspecto científico, o vidro é um líquido, mas com viscosidade tão elevada que, do ponto de vista prático, parece um sólido (CRQ, 2011).

Em seu aspecto puro, o vidro é considerado óxido metálico frio, de alta dureza, substância inorgânica, homogênea e não cristalina. Suas características são a transparência, ter baixa porosidade, ser inerte, inativo biologicamente, com baixa condução térmico-acústica, baixa dilatação térmica, resistente a pressões de até 10.800 quilogramas por centímetro quadrado. Com 75% de dióxido de silício (SiO_2) na forma de sílica que é oriunda do quartzo, possui também carbonato de sódio (Na_2CO_3), carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma de calcário, entre outros materiais que são adicionados para facilitar a moldagem ou conferir cor específica, como Magnésio (MgO), Alumina (Al_2O_3) e Potássio (K_2O), que se forma a mistura vitrificável. Tal mistura é fundida e posteriormente resfriada dando origem ao vidro (AKERMAN, 2014).

Santos (2013) afirma que a Austrália é o país que mais utiliza vidro proveniente de reciclagem como substituto da areia no concreto e na argamassa, utilizados em taxas de 10% a 20% para composição estrutural, como vigas, lajes e pilares, e em até 50% de substituição de peças não estruturais. Diligentes na área de ciência dos materiais examinam a influência da substituição do agregado miúdo pelo vidro na formulação de concreto. A substituição parcial de agregados miúdos por resíduos de vidro moído é capaz de proporcionar economia para o setor da construção civil quando atestado por experimentação, garantindo a segurança e não reduzindo a vida útil das obras.

De acordo com o Panorama Abravidro (2023), no Brasil, a capacidade de manufatura de vidro em 2021, foi em torno 7.530 t/dia. Embora seja possível que o vidro tenha capacidade de ser reciclado inúmeras vezes sem perder suas características, a reciclagem tem percentual de

apenas 50% (ABRIVIDRO, 2019). Também é importante salientar que se trata de um resíduo sólido cujo tempo de decomposição é extenso, sendo assim, é extremamente relevante desenvolver soluções ecológicas capazes de promover o descarte desse material.

A utilização de materiais recicláveis na construção civil é um importante meio de mitigar a poluição do meio ambiente proveniente dos resíduos urbanos de edificações, ademais, uma forma de reduzir custos, uma vez que o concreto é o material de maior consumo na construção civil. Já o vidro é produzido em larga escala e não sendo biodegradável, associado ao que foi pontuado, é válido ponderar o vidro como um insumo com grande potencial a ser explorado na composição do concreto. Com base nisso, sucede uma possível destinação ao vidro, reaproveitando-o na produção do concreto, e garantindo as propriedades deste.

A areia é o agrupamento de partículas de rocha desagregadas, e é produzida na superfície da Terra por fragmentos de rochas que sofreram erosão, classificada por tamanhos de 0,06 mm até 2,00 mm. A areia é um elemento originalmente mineralógica dividida em grânulos, composta principalmente por quartzo (dióxido de silício: SiO) (PETRUCCI, 2005). O bom desempenho do concreto está relacionado à qualidade dos agregados empregados, como o agregado miúdo (areia natural), composta por sua maioria em quartzo, com presença de mica, anatósio e agregados de caulinita e ferro. De acordo com a NBR 7211:2005 a curva granulométrica progride entre os limites inferiores e superiores, sendo esses limites que definem os fusos granulométricos.

A NBR 7211:2005, que discorre sobre os agregados para o concreto, correlaciona as areias em quatro faixas, como muito fina, fina, média e grossa. Essas listas de classificação se modificam pelas diferentes porcentagens de tamanhos dos grãos. De acordo com Neville e Brooks (2014) a atribuição dos agregados na resistência do concreto é prescindível do ponto de vista das propriedades. Entretanto, o agregado com granulometria apropriada beneficia o ganho na trabalhabilidade, como também no ganho de resistência diminuindo a quantidade de vazios aumentando também a durabilidade do concreto. A fração entre a quantidade de brita e areia, também modificam a trabalhabilidade uma vez que, para uma quantidade maior de agregado graúdo em relação a quantidade de agregado miúdo, intensificam as possibilidades de o concreto segregar o que pode ocasionar uma perda de trabalhabilidade e qualidade. O composto com mais finos traz a mistura mais eficiência e maior trabalhabilidade, contudo a demasia de areia ocasiona concretos menos duráveis.

As primeiras utilizações de estruturas de concreto datam de meados do século XVIII, na Inglaterra. Entre 1756 e 1774 John Smeaton fez experiências com calcários argilosos e cimentos, chegando a construir um farol em Eddystone. Em 1824, Joseph Aspdin estabilizou o processo de fabricação do que ficou conhecido como cimento Portland, isto é, uma mistura de calcário pulverizado com argila, tratada a altas temperaturas que produz um cimento capaz de endurecer dentro d'água, também chamado clincker. Tal como o aço, o concreto começa a ganhar expressão como material construtivo em meados do século XIX, justamente quando a industrialização chega à construção civil (SANTOS, 2008).

O concreto se caracteriza como um material da construção civil, conceituado como uma mistura variada e heterogênea, resultante da combinação de um aglomerante hidráulico, agregados graúdos, agregados miúdos e água. O aglomerante hidráulico comumente utilizado é conhecido como cimento Portland, que é formado a partir da mistura de calcário pulverizado com argila, após um tratamento em altas temperaturas se gera um cimento que endurece sob água, conhecido como clínquer, que a partir da sua moagem forma o cimento Portland (SANTOS, 2008).

A compressão acontece quando um corpo é submetido a ações de forças externas, buscando a redução de uma das suas dimensões e diminuição do seu volume. A tração age de forma

contrária, buscando esticar, alongar o corpo em uma de suas dimensões até a ruptura. O concreto é o material mais utilizado na construção civil, por apresentar uma boa resistência à compressão. Todavia, há determinados fatores que interferem nas características do concreto, evidencia abaixo os fatores que influenciam de forma direta nas propriedades do concreto: tipo e quantidade de cimento, presença de aditivos e adições, tipos de agregados, granulometria, idade do concreto, relação agregado-cimento, condições e duração de transporte e lançamento procedimento e tempo de mistura, condições de adensamento e de cura, forma e dimensões dos corpos de prova, temperatura, qualidade de água e relação água cimento, controle de umidade, entre outros (NEVILLE, 1997). Portanto, a resistência e durabilidade do concreto estão diretamente relacionadas à relação água/cimento.

3 Metodologia

A metodologia empregada neste artigo baseou-se na avaliação da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro moído no concreto. Foram produzidos dois traços para um estudo comparativo de concreto com agregado miúdo natural e o de vidro. O material cimentício utilizado foi o Cimento Portland V-ARI MAX, este foi caracterizado a partir da determinação de sua massa específica, obtendo-se o valor de $3,12 \text{ g/cm}^3$. Ao que tange aos vidros, coletou-se material gerado pela própria construção civil oriundo de esquadrias naturalmente fraturadas, obtendo elementos de diferentes colorações e espessuras. Para possibilitar o uso do vidro como agregado miúdo foi necessário triturar, peneirar e remover contaminantes do material. Para a trituração do vidro, empregou-se o processo de abrasão de Los Angeles (Figura 1), posteriormente realizou-se o peneiramento, selecionando os grãos passantes na peneira 4,75 mm e retidos na peneira 150 μm (Figura 2), equivalente às dimensões da areia fina utilizada no concreto produzido com agregados naturais.



Figura 1 - Material no equipamento Abrasão de Los Angeles



Figura 2 - Separação por peneiramento da amostra

Para se efetivar a dosagem do concreto, foram realizados os ensaios de caracterização física dos materiais utilizados. O primeiro ensaio realizado foi à determinação da composição granulométrica dos materiais, tanto dos agregados naturais miúdos e graúdos, quanto para o resíduo de vidro. Segundo a NBR NM 248/2003 a definição do Módulo de Finura do agregado miúdo é a soma das porcentagens retidas acumuladas das amostras nas peneiras e a

Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo é dada pela dimensão máxima da peneira, na qual apresenta uma porcentagem igual ou inferior a 5% da amostra retida pelas peneiras.



Figura 3 – (a) Agitador mecânico (b) Ensaio granulométrico da brita

Os equipamentos empregados, seguindo a NBR NM 248/2003 foram balança, peneiras, agitador mecânico, bandejas, escova e pincel. As amostras foram previamente secas em estufa. O procedimento iniciou-se com a montagem do equipamento, logo após colocou-se a amostra nas peneiras e agitou-se com o agitador mecânico. Na sequência, pesaram-se as massas retidas em cada peneira e com o auxílio da escova ou pincel juntou-se o material retido. Calculou-se o Módulo de Finura do agregado miúdo e de Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo, sendo realizado ensaio granulométrico da brita.

Realizou-se a determinação de massa unitária dos agregados miúdos, areia natural e areia com adição de 50% de resíduo de vidro moído. Para esse ensaio foram necessários os seguintes equipamentos: balança, haste de adensamento, recipiente e pá. Seguindo a NBR 16972:2021, preparou-se a amostra mantendo-a constituída por aproximadamente 150% da quantidade de material necessária para preencher o recipiente. A amostra foi manipulada com cuidado para evitar segregação e foi seca. No recipiente, preencheu-se 1/3 de seu volume, adensando-o com 25 golpes, repetindo-se o mesmo procedimento para 2/3 e para o preenchimento completo do recipiente. Para a determinação de massa específica aparente, seguiram-se as diretrizes da NBR 16916/2021 e NBR 16917/2021 que definem a massa específica aparente como a relação entre a massa seca do agregado e o seu volume, incluindo os espaços vazios. Os materiais empregados na realização do ensaio foram balança e frasco com tampa de 500 cm³. Para realizar o ensaio pesou-se o agregado miúdo seco e depois o colocou no frasco, pensando-o novamente. Na sequência, o recipiente foi preenchido com água. Após se passarem 1h, foi aferida sua massa. A Figura 4 ilustra o ensaio dos agregados miúdos em seus respectivos frascos.

Conforme a NBR 16916/2021 os materiais necessários para a realização do ensaio são balança, cesto de arame, tanque de água e peneiras. Devem-se seguir as recomendações da norma sobre a massa mínima de amostragem para o ensaio em relação à dimensão nominal do agregado graúdo. O procedimento inicia-se com a lavagem da amostra sobre a peneira e em água corrente, o objetivo é a retirada de pó ou outros materiais da superfície. Em seguida, espalha-se a amostra na bandeja, cobrindo-a com água potável, ficando submersa por 24 horas. Retira-se a amostra da água, nessa etapa se garante a condição de saturada superficialmente seca. Logo após, pesa-se novamente para registrar a massa nesta condição.



Figura 4 - Ensaio de massa específica aparente

Após, colocou-se a amostra no cesto de arame, submergindo-a em água e determinou-se sua massa. Por último, secou-se a amostra em estufa por 24h. Na Figura 4, é possível observar o ensaio realizado com a amostra submersa em água com o auxílio do cesto. A pesquisa baseou-se na comparação de um concreto referencial, produzido com agregado natural e concreto com adição de vidro a partir da substituição de 50% do agregado miúdo natural. Para este experimento foram confeccionados 16 corpos de prova (NBR 5738/2003) cilíndricos de dimensões 10 cm por 20 cm, totalizando um volume de 14.137,20 cm³. Para a produção do traço foi definido: um traço referência com agregado natural e um traço com substituição agregado miúdo.

A dosagem experimental foi realizada pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), por meio do qual se obteve um traço inicial de 1: 2,11: 3,14: 0,586 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: a/c). Este mesmo traço foi utilizado para a produção do concreto de referência e do concreto com resíduo de vidro moído. O Quadro 1 apresenta a quantidade de material empregada para a produção de 8 corpos de prova para cada concreto mencionado. Sendo que o objetivo é realizar um concreto para fins estruturais, logo estes traços foram realizados para um FCK de 25 Mpa.

Quadro 1 - Quantidade material por traço de concreto

Cimento (Kg)	Agregado Miúdo (Kg)	Resíduo de Vidro Moído (Kg)	Agregado Graúdo (Kg)	Fator água/cimento (Kg)
4,882	11,211	0	15,347	2,861
4,882	5,1475	5,1475	15,347	2,861

Fonte: Autores (2023).

Na produção dos concretos foi realizada a mistura de forma manual para garantir a homogeneização e evitar que os materiais se espalhassem. O agregado miúdo com vidro reciclado foi devidamente selecionado para que somente fosse utilizado o material com as características granulométricas correspondente da areia fina. Após todos os componentes devidamente separados, os materiais foram misturados gradualmente. Conforme estes eram misturados, foi-se adicionando a medida de água em pequenas camadas. Com o concreto ainda em seu estado fresco se faz necessário à realização do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, este possibilita que tenha um controle tecnológico do concreto. A norma NBR 16889/2020 determina o ensaio da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test). O procedimento iniciou-se colocando a placa de base em uma superfície rígida e que estivesse livre de vibrações. Na sequência, umedeceu-se a placa e o molde, sendo colocado sobre a placa de base. Preencheu-se o cone com o auxílio da concha U.

Para a retirada do molde, levantou-o cuidadosamente na vertical, evitando torção lateral, esta

etapa não deveria levar mais de 6 segundos. Todo o ensaio teve duração máxima de 10 minutos, contando o tempo desde a coleta da amostra até o desmolde. Depois da retirada completa do molde, mediu-se o abatimento sofrido pelo concreto com o auxílio de uma trena metálica, determinando a diferença entre a altura do molde e altura corpo de prova, esta diferença correspondeu à altura média. A Figura 5 demonstra o ensaio realizado. Após a realização do ensaio com os concretos em estado fresco realizou-se a moldagem dos corpos de prova segundo a NBR 5738:2015. Foi necessário para a moldagem os seguintes aparelhos: molde de corpo de prova plástico de 100 mm por 200 mm, haste de socamento e concha. Após o preparo das amostras, os moldes foram colocados em um local nivelado e iniciou-se o preenchimento dele. O molde utilizado foi do tipo cilíndrico, com adensamento do tipo manual e a dimensão básica era de 100 mm. Logo, foi necessário que o preenchimento fosse realizado em duas camadas e deferidos 15 golpes por camada.



Figura 5 – (a) (b) Slump Test concreto sustentável (c) Corpos de prova moldados

Com todos os corpos de prova moldados, esses foram deixados em um local coberto de superfície lisa para a cura inicial de 24 horas. Após decorridas as 24 horas, os corpos de prova foram transferidos para o tanque com água (Figura 6) para completar a cura de três, sete, quatorze e vinte e oito dias. Foram realizados os ensaios de concreto no estado endurecido a partir da moldagem de corpos de prova segundo a NBR 5738/2003. Para o ensaio resistência à compressão foram feitos 16 corpos de provas, sendo oito de concreto referencial com agregados naturais e oito de concreto com adição de vidro moído. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo a NBR 5739:2018 com o objetivo de determinar a resistência à compressão do concreto dosado com resíduos de vidro moído. O procedimento do ensaio consistiu em romper os corpos de prova nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias, sendo duas amostras para cada idade.



Figura 6 – (a) Corpos de prova no tanque para cura (b) Ensaio de compressão axial

4 Resultados e discussão

Foram realizados dois tipos de concreto, sendo um deles utilizando agregado miúdo reciclado de vidro moído e um convencional, utilizando agregado miúdo natural. Os dois concretos foram confeccionados em laboratório, com quantidade específica para que os ensaios fossem realizados, ou seja, todos foram produzidos segundo a mesma metodologia. O ensaio de análise granulométrica foi realizado com vidro moído e com os materiais naturais para determinar a dimensão máxima característica e seu correspondente módulo de finura. A quantidade de material ensaiado foi seguida pela norma NBR NM 248:2003 na qual é baseada na dimensão máxima característica do material, e a abertura das peneiras foi seguida pela NBR NM ISO 3010-1.

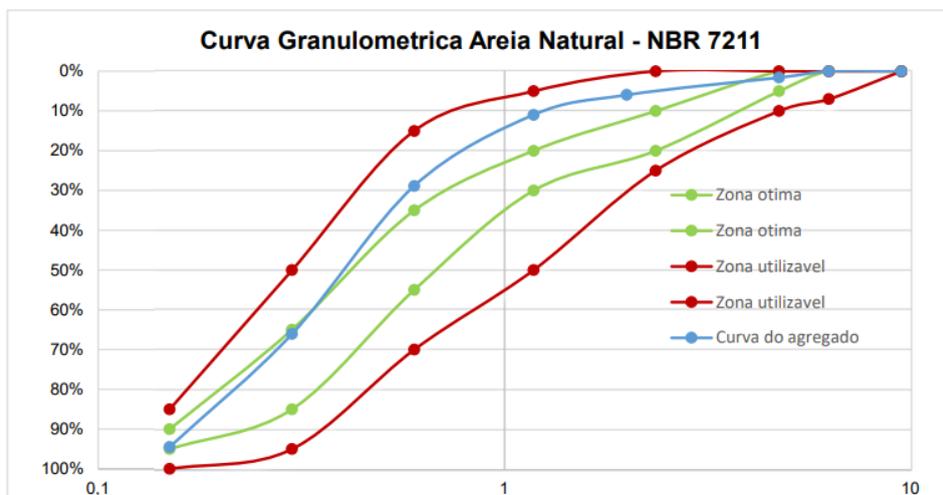


Gráfico 1 - Curva Granulométrica da areia natural

Com o ensaio realizado pode-se determinar a dimensão máxima característica do material que é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal da peneira (NBR NM 248:2003). Portanto, a dimensão máxima da areia natural ensaiada foi de 4,75 mm. Para o módulo de finura, calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por cem, foi encontrado um valor de 2,08. Dado ao seu módulo e as porcentagens atingidas por peneira, está foi considerada uma areia fina, ideal para ser utilizada em concreto estrutural. A curva mostra que 38% da amostra ensaiada estava composta por material fino, ou seja, retido pela peneira de 0,3 mm. A faixa usada para a seleção do material para a fabricação do concreto foi entre as peneiras de 4,75 mm e 0,15 mm.

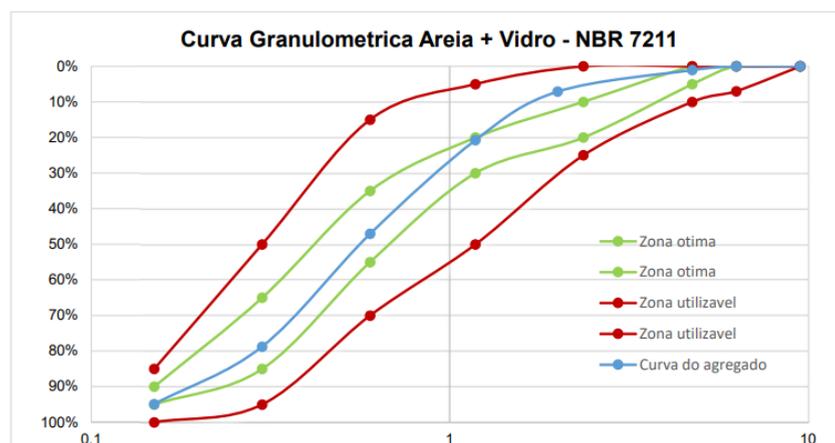


Gráfico 2: Curva Granulométrica da areia com adição de vidro

Analisando a curva granulométrica da areia ensaiada, pode-se observar que este material é propício para a utilização em concretos, sendo classificado na zona utilizável, no limite superior, mas seu módulo de finura não alcançou o mínimo aceitável para esta zona ficando na zona utilizável inferior. Com o ensaio realizado, pode-se determinar a dimensão máxima característica do material. Portanto, a dimensão máxima da areia natural com adição de vidro ensaiada é de 4,75 mm. Já o módulo de finura encontrado foi de 2,50. Dado ao seu módulo e as porcentagens atingidas por peneira, está foi considerada uma areia média. A curva mostra que aproximadamente 32% da amostra ensaiada é composta por material fino, ou seja, retido pela peneira de 0,3 mm. E 27% ficam retidos na peneira de 0,6 mm, o que causa um resultado diferente no tamanho dos grãos da areia. Realizando a análise da curva granulométrica da areia natural com adição de vidro moído, é possível afirmar que se enquadraram em partes da curva em zona ótima, com um ponto em zona utilizável com limite superior. Seu módulo de finura a enquadraram na zona ótima variável, segundo a NBR 7211:2009.

A resistência à compressão no concreto estrutural é uma das partes mais importantes a ser avaliada, sabendo que a resistência está ligada à capacidade dos materiais sofrerem cargas sem que ocorra ruptura. Para esta pesquisa foram elaborados dois tipos diferentes de concretos, em relação aos materiais utilizados e ao traço. O concreto referencial foi elaborado com os materiais naturais, com o traço pré-determinado, no concreto com adição de vidro moído, seguiu-se os mesmos passos do Tipo 01 para fins de comparação, mas com agregados naturais e adição do resíduo. Todos os concretos foram confeccionados com o mesmo diâmetro do agregado graúdo, o qual correspondeu ao da brita nº 01 e o mesmo tipo de cimento CP V-ARI. Neste trabalho o desvio padrão da dosagem não foi utilizado, porém considerando que a condição de preparo de todos os concretos se enquadraram na condição A, onde o cimento e os agregados estão medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa e é corrigida em função da umidade dos agregados, para a utilização nos cálculos do F_{ck} foi utilizado o desvio padrão de 4 MPa. O concreto referencial foi elaborado com um traço que é usualmente usado em construções, somente foram adequadas às medidas de materiais para fabricação do concreto em uma quantidade exata para a moldagem dos corpos de prova. O traço do concreto convencional em massa (Kg) foi 1: 2,30: 3,14: 0,586.

Observando a Quadro 2 pode-se deduzir que o concreto ensaiado conseguiu alcançar a resistência esperada de 25 MPa em seus 28 dias, mas a sua resistência característica (F_{ck}) foi de 18,54 MPa sendo 25,4% abaixo do esperado, devendo ser considerado, para o cálculo em um projeto, como um concreto de 20 MPa. O módulo de elasticidade calculado pela fórmula da norma NBR 6118:2007 teve resultados satisfatórios, estando condizente com os resultados de concretos convencionais.

Quadro 2 - Dados de ensaio a compressão do concreto sustentável

CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL						
Dias	Data	Carga de Ruptura (KN)	Fc (MPa)	Média	Fck (MPa)	Eci (GPa)
3 DIAS	24/10/2023	79,448	10,12	10,43	4,18	18,35
		84,386	10,74			
7 DIAS	28/10/2023	129,858	16,53	14,63	9,97	22,768
		100,01	12,73			
14 DIAS	04/11/2023	115,929	14,76	15,1	8,88	22,005
		121,235	15,44			
28 DIAS	18/11/2023	178,942	22,78	20,23	16,22	26,728
		138,849	17,68			

Fonte: Autores (2023).

O concreto sustentável com substituição parcial do agregado miúdo foi elaborado com um traço que é usualmente usado em construções. Para este foram adequadas as medidas do agregado miúdo em conjunto com o resíduo de vidro moído, onde foram utilizados 50% de cada, conforme os resultados de granulometria e massa específica aparente encontrada nos estudos laboratoriais. Também foram adequadas as medidas de materiais para fabricação do concreto em uma quantidade exata para a moldagem dos corpos de prova. O traço do concreto com substituição parcial do agregado miúdo em massa (Kg) é 1: 2,11: 3,14: 0,586.

Pode-se deduzir que o concreto ensaiado não conseguiu a resistência esperada de 25 MPa em seus 28 dias, sua resistência característica (Fck) foi de 16,22 MPa sendo 35,12% abaixo do esperado. O módulo de elasticidade calculado pela fórmula da norma NBR 6118:2007 não atingiu os resultados satisfatórios. Os resultados do concreto referencial (Cref) e concreto com substituição parcial do agregado miúdo em 50% (C 50%) estão apresentados no Gráfico 3.

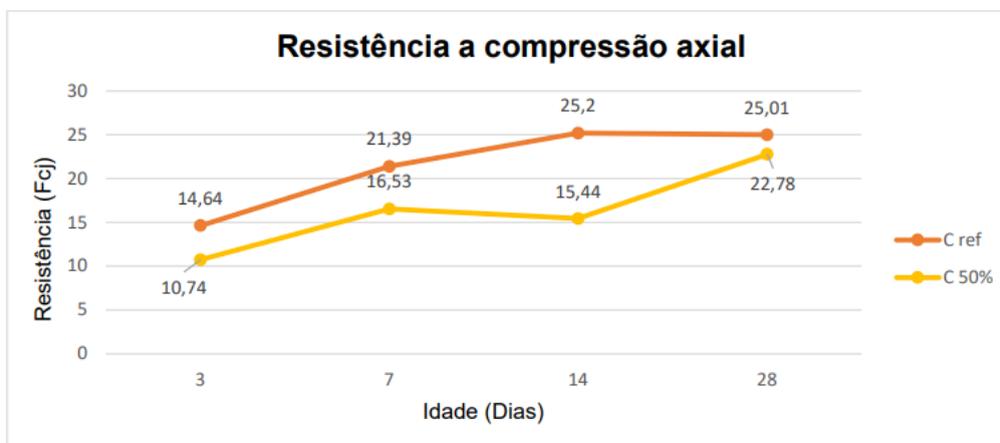


Gráfico 3 - Resultado comparativo das resistências à compressão axial

O Gráfico 4, apresenta a evolução das resistências dos concretos, em relação à idade. No terceiro dia de cura foi possível observar que havia uma diferença de resistência entre os dois concretos de 3,9 MPa, já no sétimo dia de cura havia uma diferença de 4,86 MPa. Seguindo para o décimo quarto dia ocorreu um problema com a prensa utilizada o que ocasionou uma quebra no parâmetro de modo que este dado foi comprometido e excluído. Com 28 dias de cura evidenciou-se que a diferença entre os dois concretos diminuiu bruscamente, passando de quase 5 Mpa para aproximadamente 2,42 Mpa, deste modo pode-se dizer que ocorreu uma redução de quase 50% na diferença entre o concreto estrutural convencional e o concreto estrutural experimental com reciclado de vidro. Como o Fck não foi atingido, o traço pode ser modificado, para um Fck de 20 MPa, assim este concreto sustentável poderá ser utilizado,

tendo a capacidade de suportar cargas consideráveis, mas deve-se atentar para a sua trabalhabilidade, durabilidade e módulo de elasticidade.

O concreto de referência e o com adição de vidro moído não atingiram a resistência característica $F_{ck} = 25$ MPa, ficando 25,4% e 35,12% abaixo, respectivamente. Estes valores ultrapassam os 5% a mais ou a menos aceitáveis, devendo ser reconsiderado o valor do F_{ck} de projeto. Destacando que, conforme Leal (2012), o módulo de elasticidade longitudinal de um material define o grau de deformação longitudinal deste material sob uma tensão axial imposta. Os módulos de elasticidade dos concretos ensaiados foram calculados de forma empírica com base na norma NBR 6118:2007. Os valores apresentados pela equação para a idade de 28 dias são relativamente próximos para os concretos.

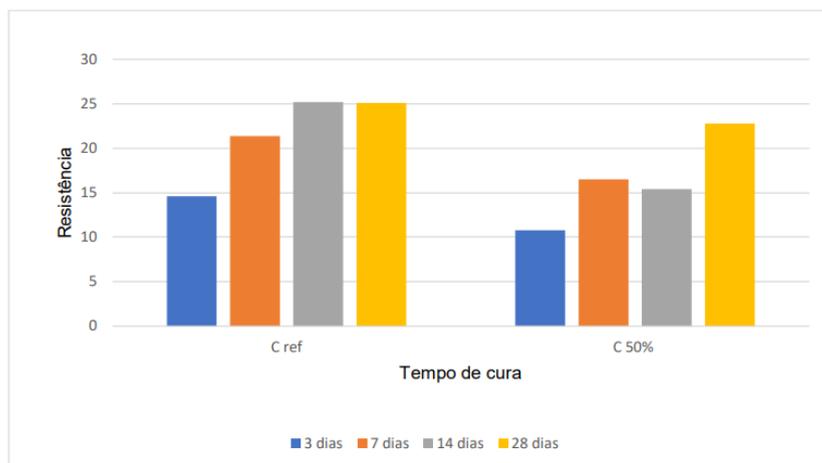


Gráfico 4 - Comparativo das resistências a compressão

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dos concretos em estudo. Pode-se observar os módulos de elasticidade e que estes estão diretamente relacionados com a resistência axial do concreto. Os módulos de elasticidade dos concretos foram semelhantes, havendo uma variação de 4,92% aos 28 dias.

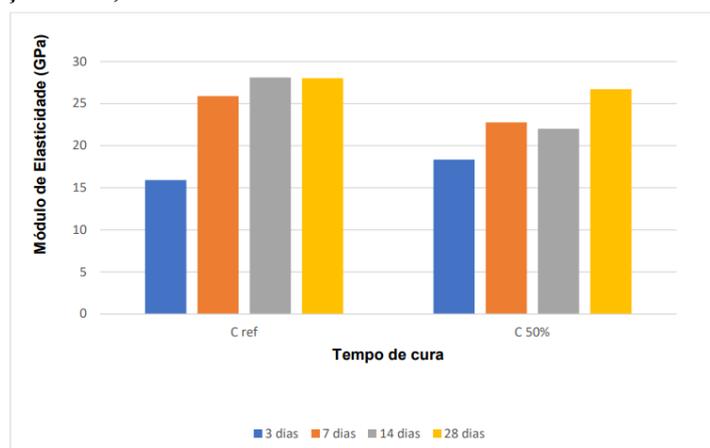


Gráfico 5 - Módulo de Elasticidade (E_{ci}) dos concretos Cref e C50%

5 Considerações finais

Considerando que o objetivo do artigo foi à substituição do agregado miúdo convencional pelo agregado de vidro para a confecção de um concreto, foram realizados os ensaios de caracterização do vidro e os ensaios para a análise das características deste novo concreto com um traço padrão. A partir dos resultados obtidos pelo programa experimental apresentado nesta pesquisa conclui-se que na análise granulométrica, do agregado miúdo de vidro

apresentou uma melhoria nas proporções dos grãos da areia natural, o que possibilita uma curva granulométrica em zona ótima de utilização e um módulo de finura dentro dos parâmetros ideais. Percebe-se que todos os concretos não atingiram o seu f_{ck} estimado aos 28 dias de 25 MPa, ficando abaixo 35,12% o concreto sustentável e 25,4% o concreto convencional. Mesmo com este resultado do concreto com adição de vidro moído, obteve-se resultado satisfatório atingindo a resistência de 25,2 Mpa para o concreto convencional.

Observa-se que o módulo de elasticidade para os concretos foi calculado de forma empírica pela norma NBR 6118:2007, em que relaciona o módulo de elasticidade com a resistência à compressão axial do concreto, os resultados foram positivos, obtendo um E_{ci} de 28,12 GPa para o concreto convencional e 26,73 GPa para o com adição e vidro moído, havendo uma variação de 4,92% entre os concretos. Este é um indicativo de os concretos com adição possuem um módulo de elasticidade compatível com os concretos já fabricados. Nota-se que o foco da sustentabilidade é buscar o equilíbrio entre a sociedade, a economia e a preservação do meio ambiente, foi necessária comprovação, que por meio da fabricação do concreto com material reciclado ocorre esta integração. Utilizando o resíduo de vidro moído é evidente o aproveitamento de um material que seria descartado em lixões e aterros sanitários. Assim, a uma redução de recebimento de resíduos, a criação de novos empregos que possam atuar neste ramo.

Evidencia-se que é possível afirmar que o uso de agregados reciclados para a fabricação de concretos é totalmente viável em relação às propriedades mecânicas estudadas nesta pesquisa. No entanto, deve-se atentar para o abatimento do concreto que, de acordo com um dos traços estudados, não foi satisfatório, havendo a necessidade de modificá-lo. Também é feita a sugestão de que este seja utilizado em concretos que não necessitem de elevada resistência à compressão. Por fim, é importante que mais estudos sejam realizados nesta área tendo em vista a utilização destes concretos para fins estruturais, atentando para diferentes propriedades do concreto com adição de vidro moído e que normas sejam elaboradas para que haja uma padronização do uso do concreto proposto nesta pesquisa.

Referências

ABNT. *NBR 16889 Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone.* Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT. *NBR 16916 Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água.* Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT. *NBR 16917 Agregado graúdo: Determinação da densidade e da absorção de água.* Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. *NBR 5738 Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.* Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. *NBR 5739 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.* Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. *NBR 6118 projetos de estruturas de concreto: Procedimento.* Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. *NBR 7211 Agregados para concreto: Especificação.* Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. *NBR NM 248 Agregados: Determinação da composição granulométrica.* Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BACKER, B. K. *Dilemas e desafios do desenvolvimento sustentável no Brasil.* Rio de Janeiro: Garamond, 2007.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento portland*. Porto Alegre: Globo, 1978.

SANTOS, R. E. *A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia*. Repositório institucional da UFMG. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FAEC-84KQ4X/1/2000000140.pdf>. Acesso em: 20 Jun. 2023.