

UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO NATURAL REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO ¹

USE OF RECYCLED AGGREGATE TO REPLACE AGGREGATE NATURAL REINFORCED WITH STEEL FIBER

Vitor Lucas da Cunha Carneiro ²

Natasha Cristina da Silva Costa ³

RESUMO: O presente trabalho tem como ênfase a pesquisa e utilização de agregado reciclado a partir da utilização de RCD (resíduos de construção e demolição) para substituição parcial de agregado graúdo natural na fabricação de concreto para possível utilização estrutural. As substituições parciais se deram de 10% e 20% de agregado reciclado. A relevância do trabalho se dá pela fabricação de concreto com agregado reciclado e reforçado com fibra de aço, uma vez que o agregado reciclado tende a influenciar no comportamento mecânico do concreto. Foram confeccionados seis grupos experimentais, sendo dois de referência e quatro de comparação. Cada grupo compreendeu oito corpos de prova cilíndricos (dimensões de 100 mm x 200 mm) e uma vigota (dimensões de 150 mm x 150 mm x 600 mm). Os resultados indicaram a viabilidade da substituição de até 20% de agregado natural por agregado reciclado, conforme os procedimentos de beneficiamento delineados neste estudo, particularmente em relação às propriedades de compressão. Além disso, foi constatada a validade da substituição de até 10% para avaliações de resistência à tração na compressão, evidenciando um comportamento análogo entre as amostras correspondentes.

Palavras-chave: agregado; concreto; fibra; RCD.

ABSTRACT: This work focuses on the research and use of recycled aggregate from the use of RCD (construction and demolition waste) for partial replacement of natural coarse aggregate in the manufacture of concrete for possible structural use. Partial replacements were made with 10% and 20% recycled aggregate. The relevance of the work is due to the manufacture of concrete with recycled aggregate and reinforced with steel fiber, since recycled aggregate tends to influence the mechanical behavior of concrete. Six experimental groups were created, two for reference and four for comparison. Each group comprised eight cylindrical specimens (dimensions of 100 mm x 200 mm) and a beam (dimensions of 150 mm x 150 mm x 600 mm). The results indicated the feasibility of replacing up to 20% of natural aggregate with recycled aggregate, according to the processing procedures outlined in this study, particularly in relation to compression properties. Furthermore, the validity of substitution of up to 10% for evaluations of tensile strength in compression was verified, showing an analogous behavior between the corresponding samples.

Keywords: aggregate; concrete; fiber; CDW.

Data de Aprovação: 19 / 12 / 2023

¹ Artigo apresentado ao curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Processos Construtivos Residenciais do Instituto Federal do Amapá como requisito para a obtenção do título de Especialista em Processos Construtivos Residenciais.

² Discente do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* Em Processos Construtivos Residenciais – IFAP. Contato: vitorcunhaa16@gmail.com

³ Orientadora, Doutora em Engenharia Civil. Docente do EBTT da Área da Construção Civil - IFAP. Contato: natasha.costa@ifap.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil gera impactos ambientais adversos desde a extração de matéria-prima, abrangendo a produção de materiais, realização das obras e a gestão dos resíduos, resultando na formação de áreas degradadas como consequência. A Resolução 307/2022 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais, definindo as especificações de resíduos da construção civil.

O setor de construção civil atua como importante instrumento no desenvolvimento do país no que diz respeito aos enfoques sociais e econômicos, pois possibilita melhorias na qualidade de vida dos cidadãos, enquanto setor que oferta moradia e disponibiliza oportunidades de trabalho em suas obras. Graças à intervenção do governo federal com planos de financiamento que possibilitaram a um número maior de pessoas o acesso à casa própria, como o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) que instituiu o Minha Casa, Minha Vida, aumentando o volume dos recursos investidos na construção civil e em novas tecnologias para o setor e fomentando a incorporação imobiliária. No setor da construção civil no período de 2004 até 2014 com ênfase em 2010, onde o setor de materiais de construção também comemorou o desempenho no ano, com alta na produção de 12,89% nos 10 primeiros meses deste mesmo ano, o Brasil apresentou uma evolução econômica consistente, representando um marco inédito nos últimos 25 anos de sua história econômica, conforme indicado no relatório da Construção Civil – Análises e Perspectivas da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2010).

Mesmo que com oscilações de curto prazo, ao longo prazo, o setor da construção imobiliária cresce constantemente, devido a demanda por moradia. O aumento dos insumos (materiais) para construção civil, por outro lado, passou a gerar um passivo ambiental de custo elevado para a indústria da construção e em pequenas reformas, este novo cenário, levou as políticas criarem legislações que organizam ou classificam esses insumos, tais como a Norma Brasileira - NBR 10.004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2004), que trata dos resíduos sólidos quanto sua classificação, onde a mesma faz referência aos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, seu manuseio, descarte e reaproveitamento destes, além da NBR 15.114 (ABNT, 2004), que trata sobre os resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Sendo assim, o desenvolvimento sustentável poderia também ser chamado de desenvolvimento responsável, onde o Estado e a sociedade civil organizada imponham limites sociais às estruturas econômicas, de modo que a evolução extrativista ou transformadora atenda a ética de uma função social do progresso que preserve os recursos naturais para as gerações futuras e diminuam o índice de resíduos inaproveitáveis no ciclo econômico (Donato; Barbosa; Barbosa, 2015).

A substituição de agregado natural por agregado reciclado na construção civil emerge como uma estratégia promissora em prol da sustentabilidade, visando a redução de resíduos e a preservação de recursos naturais. Contudo, a carência de uma compreensão abrangente sobre os impactos dessa substituição no desempenho mecânico, na durabilidade e nas características sustentáveis dos materiais de construção constitui um desafio significativo para a efetiva implementação dessa prática inovadora. A aceleração do processo de urbanização e a estabilização da economia nos últimos anos colocaram em evidência o enorme volume de resíduos de construção e demolição que vem sendo gerado nas cidades brasileiras, à semelhança do que já era observado em regiões densamente povoadas de outros países e demonstraram que

as municipalidades não estão estruturadas para o gerenciamento de volume tão significativo de resíduos, e para o gerenciamento dos inúmeros problemas por eles criados (Pinto, 1999).

O objetivo deste trabalho é analisar a relação entre engenharia e meio ambiente, concentrando-se na viabilidade do reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado na produção de concreto. Essa abordagem responde diretamente à demanda crescente por métodos construtivos mais sustentáveis. Ao integrar princípios de engenharia ambiental, o estudo não apenas busca a otimização das propriedades do concreto, mas também endereçar a preocupação ambiental associada à geração de resíduos na indústria da construção. Essa perspectiva interdisciplinar reflete o compromisso com a harmonização do desenvolvimento urbano, aprimorando a eficiência estrutural e minimizando o impacto ambiental, delineando assim um caminho para uma construção mais sustentável.

O estudo centralizou-se na investigação da utilização e produção de agregado reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD) e fibra de aço, visando substituir parcialmente o agregado natural na composição do concreto para possível aplicação estrutural. A metodologia adotada abrange substituições de 10% e 20% de agregado reciclado, com e sem reforço de fibra de aço, como variáveis de interesse. Além disso, objetiva-se explorar novas alternativas de construção. As etapas metodológicas incluem coleta e beneficiamento do RCD, formulação de misturas, preparação de amostras e corpos de prova, realização de ensaios de resistência, análise estatística e discussão dos resultados. Esta abordagem busca não apenas avaliar o impacto da substituição de agregados, mas também contribuir para o desenvolvimento de novas práticas construtivas sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um passo no controle de emissões e resíduos foi o Programa de Prevenção à Poluição, lançado pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency* - EPA) no ano de 1990, dos Estados Unidos. Essa iniciativa visava reduzir a poluição por meio de esforços cooperativos entre indústrias e agências governamentais, com base na troca de informações e na oferta de incentivos (Giannetti, 2008). Conforme a EPA, um programa de prevenção à poluição deve considerar: A redução ou total eliminação de materiais tóxicos, pela substituição de materiais no processo de produção, pela formulação do produto e/ou pela instalação ou modificação de equipamentos de processo, implantação de ciclos fechados de reciclagem e desenvolvimento de novas técnicas que auxiliem na implantação de programas de prevenção à poluição.

O rejeito de construção e demolição (RCD) é um material inevitável devido sua geração, por se tratar de uma resultante da transformação na indústria da construção civil. As carências de tecnologias assistivas e técnicas para seu reaproveitamento no próprio local da obra, não deixa outra alternativa senão apenas a disposição em aterros sanitários. Várias são as pesquisas voltadas para o reaproveitamento do RCD no Sul Brasil, Europa, e América do Norte. No Brasil, em Porto Alegre, Rio de Janeiro e São Paulo já existem algumas centrais de tratamento do RCD com planta piloto, onde o reaproveitamento visa apenas a recuperação de brita, metais, e madeira usando equipamentos da mineração, como britador, moinhos, jiques e peneiras. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição ABRECON, em São Paulo o custo de deposição do RCD pode chegar a 54% mais caro que o custo de compra da matéria prima do concreto, tijolo, telha, ou pasta de cimento. Este alto valor está relacionado aos valores praticados pelo frete, locação de tira entulhos, e aterros sanitários. Uma solução passiva ao problema em tela seria a afinidade de tecnologias já existentes que viabilize a recuperação desse material com um custo inferior ao da sua deposição em aterros.

Conforme a Resolução CONAMA 307 e considerando a expressiva representatividade dos resíduos da construção civil no panorama dos resíduos sólidos urbanos, é pertinente ressaltar que esses materiais possuem potencial para reutilização e reciclagem. Na pesquisa em análise, os resíduos obtidos foram classificados e caracterizados como classe A, sendo esses reutilizáveis, recicláveis, e aptos a serem empregados como agregados em diversas aplicações. Conforme apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos sólidos.

Classificação do Resíduo	Tipo	Material
A	I	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto.
B	II	Plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
C	III	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
D	IV	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Resolução do CONAMA nº 307 de 05/07/2002.

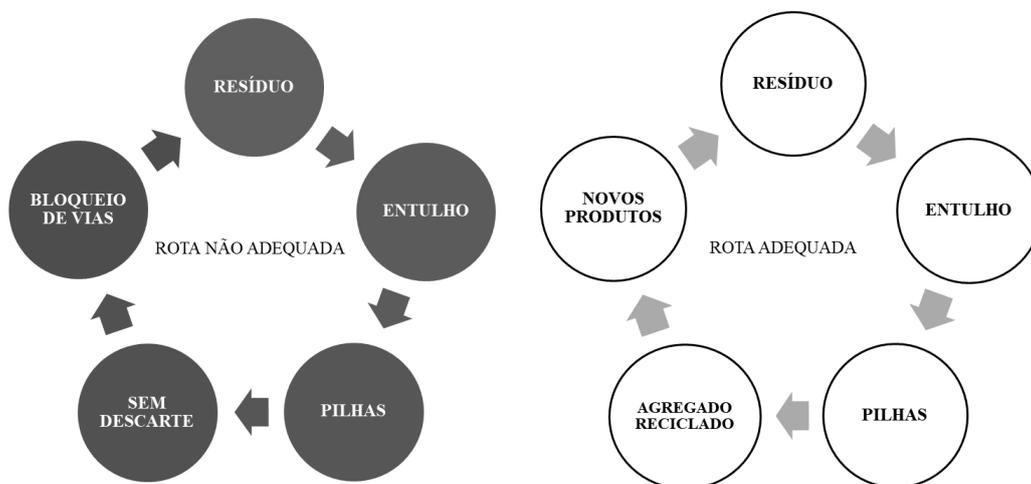
É notório que, tanto no município de Macapá quanto no estado do Amapá, a inexistência de um plano de atuação ativo e metas definidas para a redução e reciclagem de resíduos de construção civil é evidente, mesmo diante das resoluções vigentes, como o Plano de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil (PGRCC) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos, fundamentada na Lei Federal nº 12.305/2010. Este cenário destaca a necessidade de implementação de uma rota de processo dentro das empresas, visando não apenas à redução de custos na construção civil, mas também contribuindo para a preservação do meio ambiente. Esta proposta busca influenciar a implementação de práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos e, simultaneamente, estabelecer uma rota de processo que busque reduzir custos na construção civil.

Conforme, Pinto (1999) Cabendo aos municípios proverem sobre a limpeza urbana, a remoção e destinação do conjunto dos resíduos, é de sua competência, como se viu, regular e ordenar as ações dos agentes privados envolvidos no fluxo dos RCD. Esse papel regulador é necessário, inclusive, para a regulamentação da atividade dos agentes coletores, licenciando-os, definindo procedimentos e o destino final dos resíduos coletados e é o motivador para a adoção da Gestão Diferenciada dos RCD enquanto novo serviço público destinado ao cumprimento dos compromissos com a limpeza urbana e a preservação do meio ambiente.

Segundo a Associação Nacional das Entidades De Produtores de Agregados para Construção- ANEPAC (2022), no Brasil, o setor de agregados teve um crescimento no ano de 2020 com um consumo de 605 milhões de toneladas, um aumento de 13%, em relação a 2019. Para 2022, foi prevista uma demanda de 692 milhões, o que gera um consumo per capita de 3,45 toneladas/habitante/ano. Uma estratégia eficaz para atenuar os impactos decorrentes do acúmulo de resíduos consiste na adoção de práticas de reciclagem.

Em alguns países, já são implementadas alternativas viáveis, como a produção de novos agregados reciclados em substituição aos naturais, bem como a incorporação de resíduos de construção em diversas aplicações, incluindo concretos, argamassas, pavimentos, contenções, aterros, solos reforçados, entre outras. O reuso de resíduos de construção e demolição não apenas contribui de maneira significativa para a preservação ambiental, mas também se revela uma opção economicamente vantajosa. Essa abordagem possibilita a criação de novos materiais, reduzindo, assim, a dependência da exploração de recursos naturais. O Fluxograma 1 delinea a sequência de etapas envolvidas no processamento, oferecendo uma representação visual da condução operacional como aceitável ou inadequada de uma rota de reaproveitamento.

Fluxograma 1 - Representação visual da condução operacional como aceitável ou inadequada de uma rota de reaproveitamento.

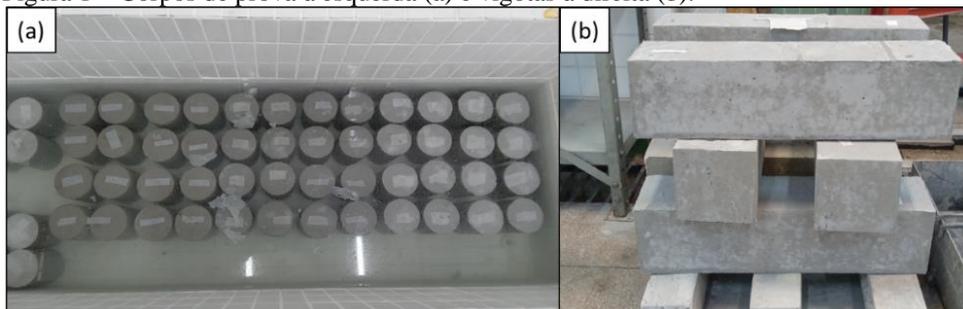


Fonte: Autores (2023).

3 METODOLOGIA

Na elaboração da pesquisa, foram desenvolvidos 48 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 6 vigotas de 150 cm x 150 cm x 600 mm, conforme a Figura 1, que foram dosados com as substituições de 0% (modelos de referência), 10% e 20% de agregado natural por reciclado, com e sem reforço de fibra de aço, todos os modelos e ensaios foram realizados no Laboratório de Edificações (LABED) do Instituto Federal do Amapá (IFAP) – campus Macapá. A pesquisa foi desenvolvida a partir das seguintes etapas metodológicas: a) coleta de materiais (resíduos de construção civil); b) processamento de materiais; c) classificação de materiais; d) análise granulométrica; e) concretagem; f) ensaio de compressão e flexão.

Figura 1 – Corpos de prova à esquerda (a) e vigotas à direita (b).



Fonte: Autores (2023).

3.1 Coleta de Materiais

O resíduo que posteriormente seria utilizado e fabricado como agregado reciclado foi obtido a partir de uma obra residencial localizada na zona norte da cidade de Macapá. O material provinha de atividades de demolição e estava disposto de forma inadequada em via pública conforme ilustrado na Figura 2. Após a coleta manual, o material também foi manualmente separado e classificado para identificar a composição do “entulho” obtido.

Figura 2 – Disposição do resíduo de construção em via pública (a) e classificação manual (b) e (c).



Fonte: Autores (2023).

3.2 Processamento de Materiais

O material foi preparado com o objetivo de obter agregados com tamanho equivalente à brita 1, aproximadamente 12,5 mm (conforme ABNT NBR 7211: Agregados Para Concreto – Especificação). A conformidade com as diretrizes da Caracterização Mineralógica de Minérios do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), foi crucial nesse contexto, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento do processo e na elaboração do fluxograma para o processamento da brita reciclada, como evidenciado no Fluxograma 2, considerando que existe a proposta de uma simplificação de rota de processo de fabricação da brita para que realização do produto e execução de trabalho seja realizado possivelmente durante a execução de uma obra.

Fluxograma 2 – Processamento do RCD.



Fonte: Autores (2023).

Conforme estabelecido na Tabela 1, a classificação dos materiais fundamentou-se em atributos físicos e visuais, visando otimizar a alocação e destinação dos materiais gerados no processo. Além disso, buscou-se compreender a composição dos materiais destinados à produção de agregado reciclado. Esse aprimoramento procedimental desempenhou um papel crucial na elevação da eficiência e qualidade do produto final.

Tabela 1 - Catalogação e levantamento do RCD coletado em campo.

Item	Material	Peso (Kg)	(%) Simples de Material
1	Concreto: Argamassa + Seixo	29,6	23,7
2	Concreto: Argamassa + Brita	10,3	8,2
3	Argamassa	21,4	17,1
4	Bloco Cerâmico (Tijolo 6 Furos)	6,1	4,9
5	Revestimento + Argamassa	7,9	6,3
6	Argamassa + Bloco Cerâmico	44,9	35,9
7	Conglomerado	4,9	3,9
Total		125,0	100

Fonte: Autores (2023).

Após a separação e classificação manual, seguiu a etapa de processamento (britagem do material), onde foi realizada a etapa crucial para obtenção do material de granulometria do tipo brita 1, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Materiais após britagem para brita tipo 1: (a) bloco cerâmico e argamassa, (b) argamassa, (c) revestimento cerâmico e (d) bloco cerâmico de seis furos.



Fonte: Autores (2023).

A classificação sistemática após o processamento é um passo determinante para assegurar que os materiais atendam precisamente aos requisitos e padrões estabelecidos para sua aplicação subsequente. O material que continha brita natural e seixo em sua composição foi descartado, com o objetivo de analisar as propriedades dos agregados reciclados já apresentados anteriormente na figura 3.

3.3 Análise Granulométrica

Na fase inicial do processo de manufatura, é conduzida a análise granulométrica para avaliação dos resultados provenientes dos experimentos envolvidos na produção de concreto empregando agregado reciclado. Antecedendo, vale ainda apresentar os dados de massa unitária dos materiais, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de massa específica dos agregados.

Material	Massa específica (g/cm ³)
Agregado Reciclado	2,27 g/cm ³
Agregado Natural	2,08 g/cm ³
Areia Seca	1,28 g/cm ³

Fonte: Autores (2023).

Observa-se proximidade nos valores de massa específica entre o agregado graúdo natural (brita tipo 1) e o agregado reciclado.

As Tabelas 3 e 4 exibem os resultados dos ensaios granulométricos realizados tanto agregado reciclado quanto do agregado natural.

Tabela 3 - Peneiramento de agregado reciclado via seco - massa de ~3 Kg.

Alíquota	Abertura (mm)	Mesh (#)	Massa (g)	(%) Simples Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
1	25	1"	0,000	0,0	0,0	100,0
2	19	3/4"	0,004	0,1	0,1	99,9
3	12,5	1/2"	0,108	3,6	3,7	96,3
4	9,5	3/8"	0,380	12,7	16,4	83,6
5	6,3	1/4"	1,726	57,5	73,9	26,1
6	4,75	4"	0,602	20,1	94,0	6,0
7	Fundo	-4	0,180	6,0	100,0	0,0
Total	-	-	3,000	100,00	-	-

Fonte: Autores (2023).

Tabela 4 - Peneiramento de brita natural via seco - massa de ~3 Kg.

Alíquota	Abertura (mm)	Mesh (#)	Massa (g)	(%) Simples Retido	(%) Acumulado	(%) Passante
1	25	1"	0,000	0,0	0,0	100,0
2	19	3/4"	0,010	0,3	0,3	99,7
3	12,5	1/2"	0,090	3,0	3,4	96,6
4	9,5	3/8"	0,556	18,6	22,0	78,0
5	6,3	1/4"	1,304	43,7	65,7	34,3
6	4,75	4"	0,502	16,8	82,6	17,4
7	Fundo	-4	0,520	17,4	100,0	0,0
Total	-	-	3,000	100,00	-	-

Fonte: Autores (2023).

É crucial ressaltar que, para a condução do ensaio de análise granulométrica, foi executado um processo de “mistura”, consistindo na completa homogeneização, em equipamento do tipo homogeneizador tipo “V” de todos os materiais britados para a formulação do agregado reciclado conforme Figura 4, sendo que a totalidade do material proveniente da trituração foi empregada nesse procedimento os materiais de bloco cerâmico, argamassa e revestimento, sem interesse ou percentual de quantitativos de material. A análise permite otimizar o processo de produção, garantindo que os materiais atendam às especificações desejadas, avaliando a britagem.

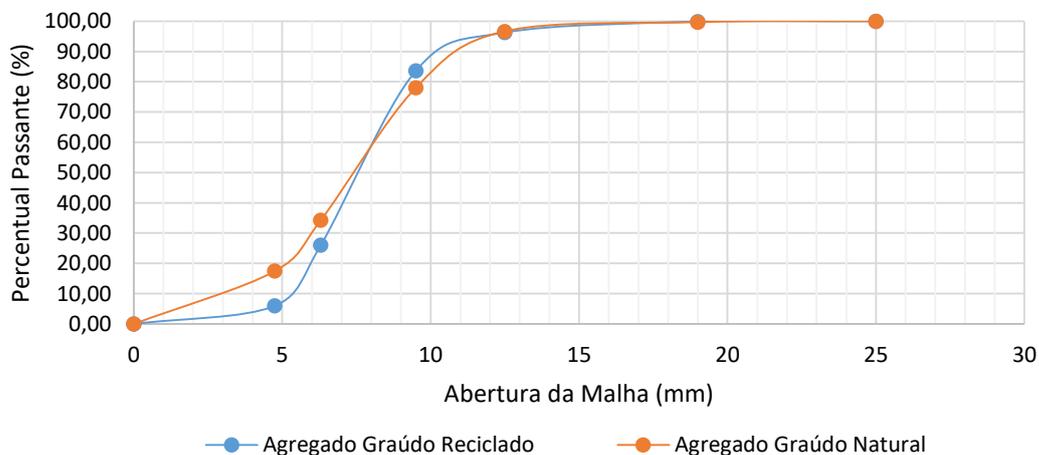
Figura 4 – Agregado reciclado após homogeneização.



Fonte: Autores (2023).

Na análise granulométrica como mostra o Gráfico 1, constatou-se que a brita reciclada produzida apresentou propriedades comparáveis ao agregado graúdo de origem natural.

Gráfico 1 – Análise da granulométrica do agregado graúdo reciclado e natural.



Fonte: Autores (2023).

3.4 Fibra de Aço

O excelente desempenho mecânico sob compressão, a trabalhabilidade e a durabilidade são características associadas ao concreto. Entretanto, o comportamento frágil, a baixa capacidade de deformação e a baixa resistência à tração são limitações importantes e que podem ser contornadas com a incorporação de fibras (Gazoni,2022). Neste trabalho, a incorporação de fibras de aço foi realizada à razão de 25 kg/m³ de concreto, esta medida foi determinada com base em um volume mínimo de fibras suficiente para preservar a resistência da matriz após a ocorrência de fissuras. Conforme a ABNT NBR 15530 de 2019 (Fibras de Aço Para Concreto – Especificações) em relação à forma, as fibras podem apresentar conformações diversas como: lisa, ancoragem em gancho e corrugadas, o uso das fibras de aço-carbono regulares como material de reforço para o concreto é adequado pois o aço possui módulo de elasticidade ao mínimo cinco vezes maior que o do concreto e demanda temperaturas acima de 370° C para que se deformem com o calor. A fibra adotada no trabalho pertence ao tipo gancho, cujo aspecto é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Fibra de aço do tipo gancho utilizada na elaboração da pesquisa.



Fonte: Autores (2023).

Quando as propriedades desta fibra, podemos ver na descrição da Tabela 5.

Tabela 5 - Características da fibra de aço utilizada.

Característica	Tipo da fibra
Fabricante	Dramix
Formato	Fibra com ancoragem em gancho
Material	Fio de aço trefilado
Comprimento (mm)	60
Diâmetro (mm)	0,90
Fator de forma (mm/mm)	65

Fonte: Adaptado de Dramix (2018).

3.5 Concretagem

A dosagem de concreto constitui um procedimento crítico que determina a precisa proporção de cimento, agregados, água, aditivos e adições. Essa etapa exerce influência direta sobre a resistência, durabilidade e demais propriedades do concreto. Uma dosagem apropriada é imperativa para evitar possíveis falhas na estrutura e assegurar sua integridade. Adicionalmente, a avaliação por meio de testes, como ensaio de compressão e tração na flexão, é essencial para certificar a conformidade do concreto com as especificações do projeto.

Para a realização do processo de concretagem das peças, foram empregados os seguintes materiais: cimento CP II Z – 32 (Cimento Portland com Adição de Material Pozolânico), areia natural e brita natural do tipo 1, todos adquiridos na cidade de Macapá, juntamente com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow. Na Tabela 6, são apresentadas as quantidades

específicas de cada componente utilizadas na mistura, seguindo a proporção de 1: 1,4: 2,4: 0,5. Este traço foi aplicado durante a moldagem dos grupos testados, compostos por 8 corpos de prova e 1 vigota cada.

Tabela 6 – Preparação e dosagem de material de concretagem.

Material e Famílias	REF – I	REF – II	SFCAR10%	CFCAR10%	SFCAR20%	CFCAR20%
Cimento	13,39 Kg					
Areia	18,75 Kg					
Agregado Natural	32,14 Kg	32,14 Kg	28,9 Kg	28,9 Kg	25,71 Kg	25,71 Kg
Fibra de Aço	-	0,775 Kg	-	0,775 Kg	-	0,775 Kg
Água	6,70 Kg					
Aditivo	40,17 g	40,17 g	40,17 g	40,17 g	60,17 g	60,17 g
Agregado Reciclado	-	-	3,21 Kg	3,21 Kg	6,43 Kg	6,43 Kg

REF I – Modelo de Referência Sem Fibra de Aço

REF II – Modelo de Referência Com Fibra de Aço

SFCAR10% - Modelo Sem Fibra de Aço e Agregado Reciclado em 10%

CFCAR10% - Modelo Com Fibra de Aço e Agregado Reciclado em 10%

SFCAR20% - Modelo Sem Fibra de Aço e Agregado Reciclado em 20%

CFCAR20% - Modelo Com Fibra de Aço e Agregado Reciclado em 20%

Fonte: Autores (2023).

Em todas as concretagens dos grupos de análise realizou-se o ensaio de *slump test* (NBR NM 67 - concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone), que avalia a trabalhabilidade ou fluidez do concreto, e que resultou em valores de abatimento entre 5 cm até 11 cm conforme apresentado na Figura 6, ideal para a construções feitas com o lançamento manual.

Figura 6 – Ensaio e teste de fluidez do concreto: (a) REF-I, (b) CFCAR10%, (c) SFCAR20% e (d) CFCAR20%.



Fonte: Autores (2023).

Seguindo o ensaio de *slump test* para confirmar a trabalhabilidade do concreto, procediam-se, em seguida, às fases de concretagem das vigotas e à moldagem dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Concretagem dos corpos de prova e vigotas.



Fonte: Autores (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de Compressão

Considerando os estudos e critérios aplicados, o estado limite último (ELU) emerge como um fator crítico, relacionado ao colapso ou a qualquer forma de ruína estrutural que resulte na interrupção do uso da estrutura. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118: 2003, o valor mínimo admissível para a resistência do concreto é $f_{ck} = 20$ MPa. Nas Tabelas de 7 até 12, avalia-se a resistência à compressão dos concretos dosados para este trabalho experimental. Este ensaio foi realizado em todos os grupos de concreto confeccionadas, nas idades de 28 dias.

Tabela 7 - Ensaio de compressão com o modelo REF I – modelo de referência sem fibra de aço.

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	163	20,79	27,3	1,1	4,05
CP 2	156	19,87			
CP 3	181	23,00			
CP 4	192	24,47			
CP 5	171	21,74			
CP 6*	215	27,34			
CP 7*	223	28,37			
CP 8*	205	26,16			

Fonte: Autores (2023).

Tabela 8 - Ensaio de compressão com o modelo REF II – modelo de referência com fibra de aço.

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	168	21,35	25,4	1,5	5,9
CP 2	170	21,68			
CP 3	183	23,34			
CP 4	152	19,31			
CP 5	186	23,67			
CP 6*	212	26,94			
CP 7*	198	25,21			
CP 8*	188	23,96			

Fonte: Autores (2023).

Tabela 9 - Ensaio de compressão com o modelo SFCAR10% - sem fibra e agregado reciclado em 10%.

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	210	26,73	26,9	1,1	4,23
CP 2	217	27,62			
CP 3	208	26,51			
CP 4*	213	27,11			
CP 5*	211	26,82			
CP 6*	224	28,57			
CP 7*	200	25,4			
CP 8*	209	26,6			

Fonte: Autores (2023).

Tabela 10 - Ensaio de compressão com o modelo CFCAR10% - com fibra e agregado reciclado em 10%.

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	230	29,24	31,3	2,6	8,38
CP 2	225	28,71			
CP 3	270	34,32			
CP 4	225	28,59			
CP 5	238	30,34			
CP 6	231	29,48			
CP 7	269	34,31			
CP 8	275	35,07			

Fonte: Autores (2023).

Tabela 11 – Ensaio de compressão com o modelo SFCAR20% - sem fibra e agregado reciclado em 20%.

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	277	35,25	31,8	2,9	9,10
CP 2	247	31,5			
CP 3	240	30,59			
CP 4	230	29,23			
CP 5	282	35,9			
CP 6	235	29,92			
CP 7	273	34,76			
CP 8	216	27,56			

Fonte: Autores (2023).

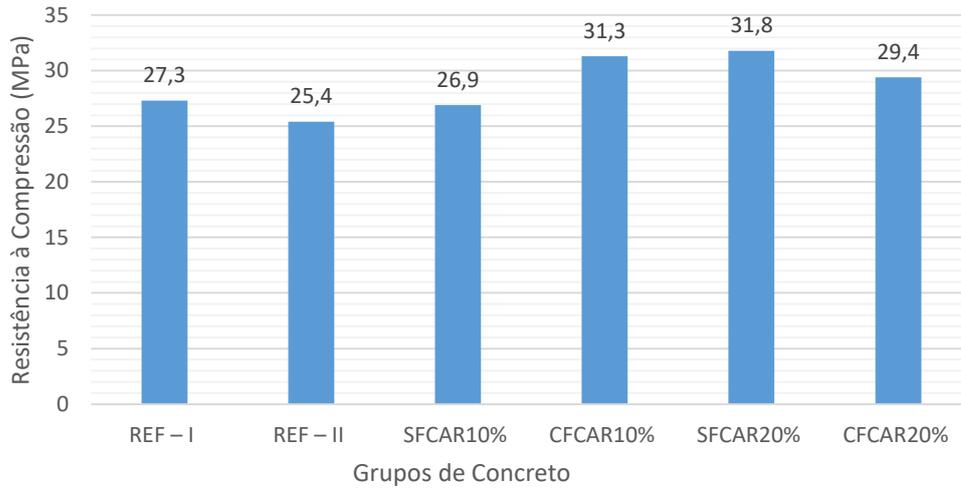
Tabela 12 - Ensaio de compressão com o modelo CFCAR20% - com fibra e agregado reciclado em 20%

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (COV %)
CP 1	229	29,17	29,4	1,1	3,67
CP 2	232	29,48			
CP 3	225	28,71			
CP 4	243	30,98			
CP 5	231	29,36			
CP 6	234	29,77			
CP 7	214	27,28			
CP 8	241	30,69			

Fonte: Autores (2023).

Destaca-se que em alguns corpos de prova dos grupos REF-I (CPs 1,2,3,4, e 5), REF-II (CPs 1,2,3,4, e 5) e SFCAR10% (CPs 1,2 e 3), os ensaios de compressão foram conduzidos com inadequações no capeamento, por este motivo, para o cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação foram utilizados os CPs com asterisco (*) identificados nas tabelas anteriores de 7, 8 e 9. Adicionalmente, apresentamos informações relativas aos grupo de concreto de concreto, proporcionando uma visão mais abrangente do desempenho dos materiais, conforme evidenciado na média dos resultados apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Comparativo de resistência média à compressão dos corpos de prova.

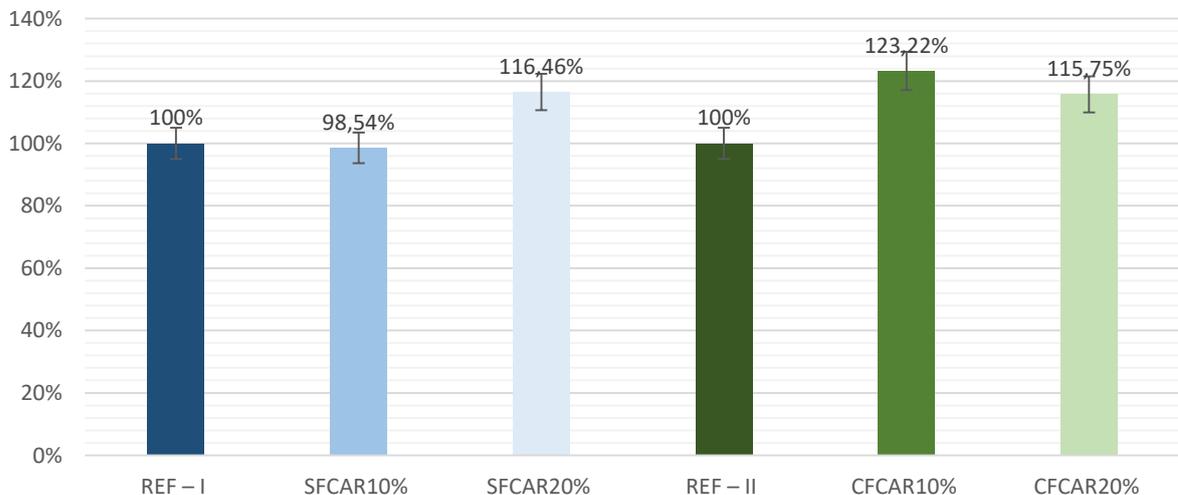


Fonte: Autores (2023).

Observa-se no Gráfico 3 que a variação da resistência à compressão entre os grupos de referência sem fibra apresenta uma variabilidade significativa. Comparando com o grupo de referência sem fibra (REF-I), a substituição com apenas 10% de agregado reciclado (SFCAR10%) resultou em uma queda de aproximadamente 1,46%, enquanto a substituição com 20% (SFCAR20%) mostrou um aumento considerável de 16,48% no ensaio à compressão. Com os dados plotados e seguindo as definições e classes da ABNT NBR 8953 de 2015, podemos afirmar que o grupo pertence à mesma classe de resistência, uma vez que o grupo varia de cerca de 27 MPa até 31 MPa, uma variação de 5 MPa. Portanto, analisamos que a substituição de até 20% sem fibra de aço é válida.

No que avalia-se ao grupo com fibra e no perfil da referência com fibra (REF-II), a substituição com 10% de agregado reciclado e fibra de aço (CFCAR10%) resultou em um aumento significativo de aproximadamente 23,22%, enquanto a substituição com 20% de agregado reciclado e fibra de aço (CFCAR20%) também apresentou um aumento, mas de 15,75% no ensaio de compressão. Portanto, concluímos que a substituição de 10% e 20% com fibra é válida, com ênfase na substituição de 10% com fibra.

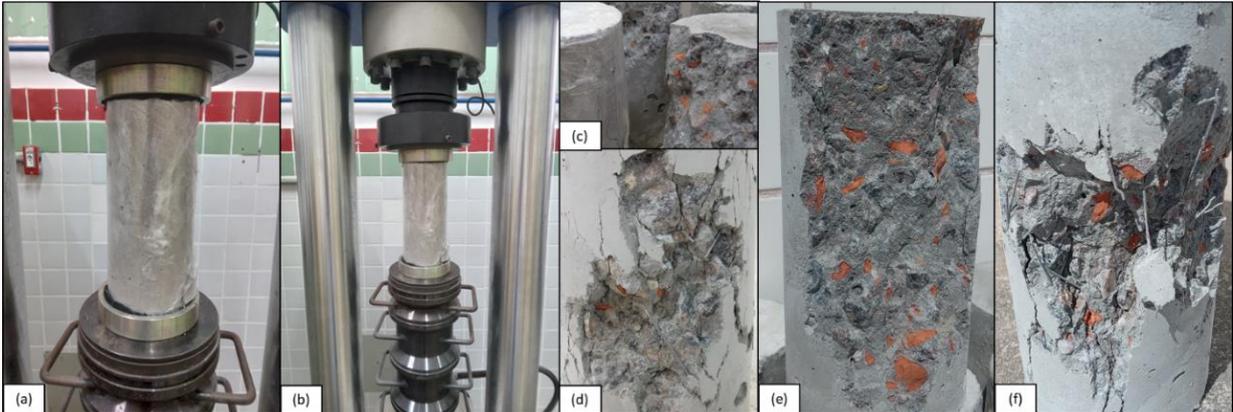
Gráfico 3 – Comparativos de variação de resistência dos grupos de concreto em relação à compressão.



Fonte: Autores (2023).

Na Figura 8 observa-se o aspecto de alguns CPs após a ruptura. Observa-se que as resistências dos grupos de concreto CFCAR10% além das outras composições com agregado reciclado com e sem fibra apresentaram desempenho significativamente superior em relação aos modelos de referência. A durabilidade do concreto está diretamente associada a propriedades como porosidade, massa específica, forma e textura dos grãos, resistência, módulo de elasticidade, absorção e teor de impurezas.

Figura 8 – Corpos de prova após ruptura e em ensaio de compressão: (a) e (b) em teste, (c) SFCAR10%, (d) CFCAR10%, (e) SFCAR20% e (f) CFCAR20%.



Fonte: Autores (2023).

4.2 Ensaio de Tração na Flexão

Dando continuidade, os ensaios foram conduzidos para avaliar a resistência das vigotas. Este processo de avaliação segue as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 12142 (Concreto - Determinação da Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos), utilizando o método de ensaio de tração por flexão em corpos de prova de concreto. O princípio adotado é o da viga simplesmente apoiada, com a aplicação de duas forças concentradas nos terços do vão, conforme preconizado pela norma, proporcionando uma abordagem padronizada e confiável na obtenção dos resultados, sendo demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Vigota em ensaio de tração na flexão em equipamento EMIC.



Fonte: Autores (2023).

4.2.1 Resistência à Tração na Flexão

Conforme a ABNT NBR 12142:2010 resistência à tração na flexão deve ser calculada de acordo com a seguinte equação exemplificada pela Equação 1:

$$f_{ct, f} = F \cdot l / b \cdot d^2 \quad \text{Equação 1}$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5%, calcular a resistência à tração na flexão pela expressão vista na Equação 2:

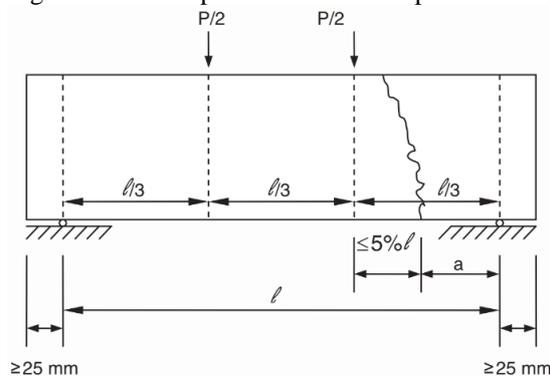
$$f_{ct, f} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- “ $f_{ct, f}$ ” é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);
- “ F ” é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);
- “ l ” é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);
- “ b ” é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- “ d ” é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- “ a ” é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

Para compreender o comportamento estrutural e derivar a equação correspondente, a Figura 10 ilustra de maneira exemplar o detalhamento da vigota.

Figura 10 – Exemplo de modelo de ruptura fora do terço médio.



Fonte: ABNT NBR 12142 (2010).

Com base na explicação do procedimento de flexão e nas orientações, os resultados dos testes realizados nas vigotas pertencentes aos diversos grupos de concreto estão apresentados na Tabela 13, ressaltando que as vigotas possuíam idade de 28 dias.

Tabela 13 - Ensaio de flexão à tração.

Grupo	Identificação	b (mm)	d (mm)	l (mm)	F (N)	a (mm)	$f_{ct, f}$ (MPa)
REF – I	V1	150	150	450	20264	-	2,70
REF – II	V2	150	150	450	20797	140	2,59
SFCAR10%	V3	150	150	450	23344	115	2,39
CFCAR10%	V4	150	150	450	13969	-	1,86
SFCAR20%	V5	150	150	450	21089	-	2,81
CFCAR20%	V6	150	150	450	19356	-	2,58

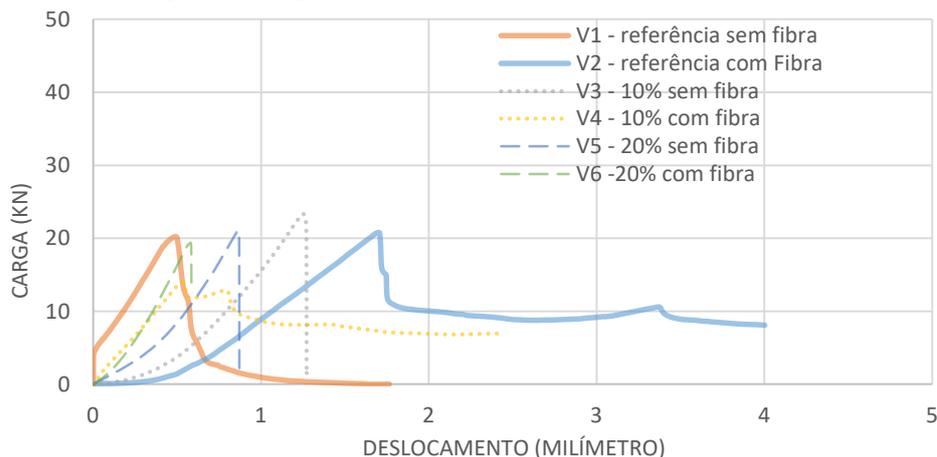
Fonte: Autores (2023).

Os grupos REF-II e SFCAR10% obtiveram suas rupturas fora do terço médio. Para Gazoni (2022) as propriedades mecânicas do concreto, a tenacidade à flexão é a mais influenciada pela presença das fibras no concreto. Sabendo que a tenacidade de um material pode ser descrita como a capacidade de absorver energia até sua ruptura, a tenacidade do concreto reforçado com fibras é significativamente melhorada; há mudança no modo de falha, passando da ruptura frágil para ruptura dúctil. Em razão dessas especificidades, o concreto reciclado tende a apresentar redução em algumas de suas propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

4.2.2 Carga x Deslocamento

Em macro escala, a incorporação de fibras de aço ao concreto reciclado pode reduzir parte dos efeitos causados pelo uso dos agregados reciclados. A adição de fibras controla a fissuração da matriz e modifica o comportamento frágil do concreto para pseudo dúctil como mostrado separadamente nos Gráficos 4, 5 e 6 apresentam os dados obtidos no ensaio das vigotas relacionando o deslocamento obtido no ensaio para a carga que gerou a rotação.

Gráfico 4 – Comportamento geral das vigotas de resistência à flexão.



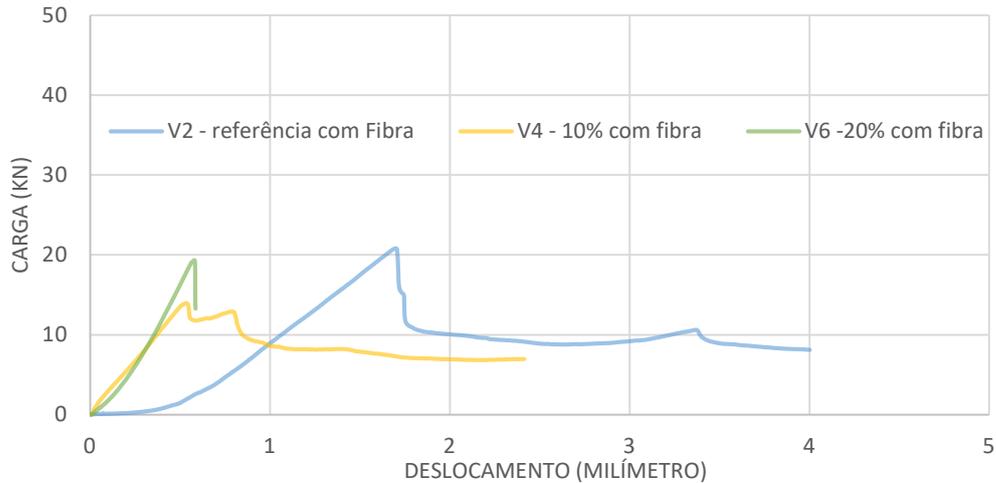
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 5 – Comportamento geral das vigotas sem fibra de resistência à flexão.



Fonte: Autores (2023).

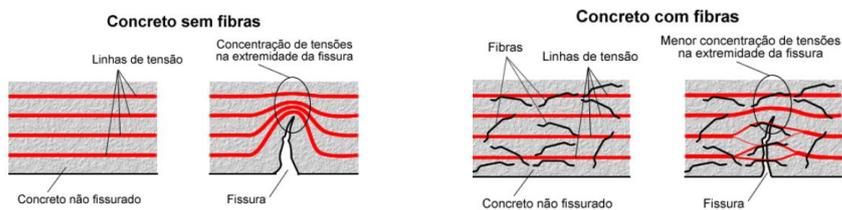
Gráfico 6 – Comportamento geral das vigotas com fibra de resistência à flexão.



Fonte: Autores (2023).

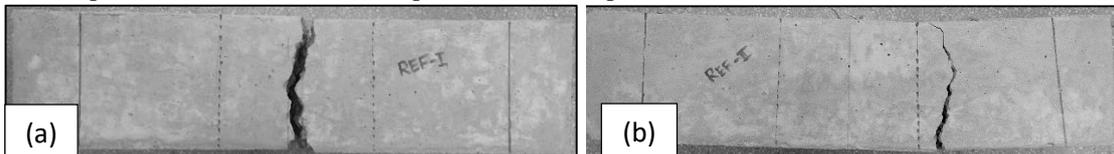
Assim, a combinação das fibras de aço com o concreto reciclado dá origem ao concreto reciclado reforçado com fibras de aço (Gazoni, 2022). No contexto da resistência, é relevante observar que todos os materiais com a inclusão de fibras demonstraram mesma resistência. Vale ressaltar que a adição de fibras não desempenha um papel estrutural direto, mas contribui para conferir um comportamento mais tenaz, proporcionando um período prolongado de resistência à ruptura conforme uma análise feita por Barros (2009) apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Representação de concreto com e sem fibra de aço.



Fonte: Barros, 2009, p.48.

Figura 12 – Vigotas do grupo de referência após rompimento do ensaio de flexão à tração: (a) V1 após ensaio com ruptura no vão médio e (b) V2 após ensaio com ruptura à direita.



Fonte: Autores (2023).

Figura 13 – Vigotas do grupo de 10% após rompimento do ensaio de flexão à tração.

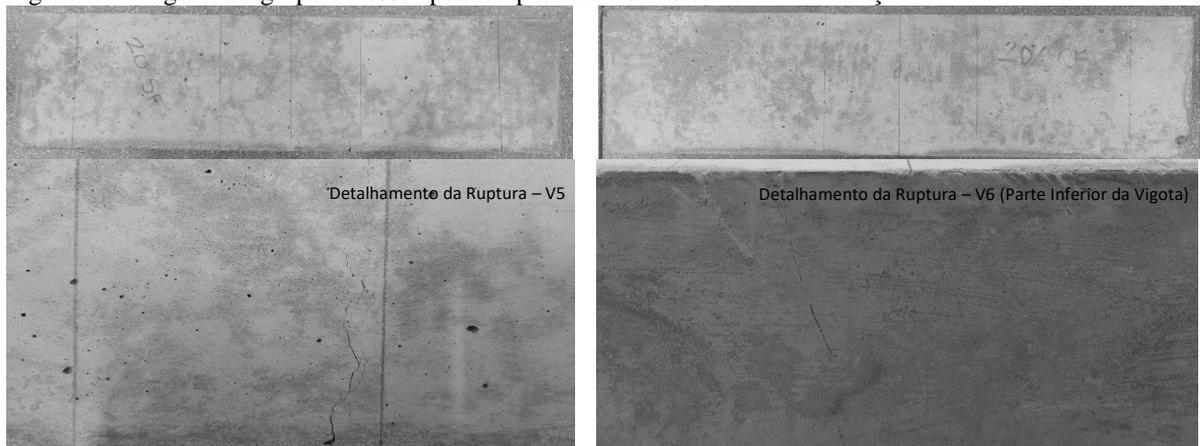


(a) V3 após ensaio com ruptura (fissura) à direita

(b) V4 após ensaio com ruptura no vão médio

Fonte: Autores (2023).

Figura 14 – Vigotas do grupo de 20% após rompimento do ensaio de flexão à tração.



(d) V5 após ensaio com ruptura no vão médio

(e) V6 após ensaio com ruptura no vão médio

Fonte: Autores (2023).

5 CONCLUSÃO

No âmbito deste trabalho, intitulado como Utilização de Agregado Reciclado em Substituição de Agregado Natural Reforçado com Fibra De Aço, constata-se que a substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado em concretos estruturais é uma prática válida. O objetivo primordial desta pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica da reutilização de resíduos de construção civil como substitutos parciais na composição de agregado graúdo em concreto convencional, com foco especial na análise de sua influência nas características mecânicas do concreto, principalmente no que diz respeito à compressão e tração na flexão. Quanto aos CPs ensaiados em relação de resistência à compressão os valores substitutos com agregado reciclado com e sem fibra de aço são aptos para utilização em concreto estrutural, visto que, em comparação com o grupo REF-I (sem fibra), a substituição com apenas 10% de agregado reciclado (SFCAR10%) resultou em uma queda de aproximadamente 1,46%, enquanto a substituição com 20% (SFCAR20%) mostrou um aumento considerável de 16,48%. A queda é desprezível. E para composição com fibra, em comparação com o modelo de referencia (REF-II), a substituição com 10% de agregado

reciclado e fibra de aço (CFCAR10%) resultou em um aumento significativo de aproximadamente 23,22%, enquanto a substituição com 20% de agregado reciclado e fibra de aço (CFCAR20%) obteve-se um índice de 15,75% no ensaio de compressão. Conclui-se portanto que a substituição é válida.

Ao analisar os resultados do ensaio de resistência à tração e flexão nas vigotas, constatamos que a adição de fibra de aço representa uma contribuição positiva. Os gráficos revelaram um notável aumento na tenacidade quando comparado aos modelos desprovidos de fibra. Apesar de a resistência em se manter constante com cerca de carga de aproximadamente 20 kN, em todos os grupos, destaca-se a influência significativa da inserção da fibra quanto ao fator tenacidade, validando assim sua aplicação para aprimorar o desempenho estrutural no concreto.

Como orientações para dar seguimento à pesquisa e com o intuito de aprimorar a compreensão dos fenômenos e das alterações resultantes da substituição do agregado natural pelo reciclado podemos avaliar ainda:

- Avaliação da influência e comportamento de absorção de água, considerando a presença de blocos cerâmicos nos agregados, cuja composição inclui argila;
- Realização do ensaio de Ultrassom em concreto, para avaliar a composição e mostrar indicativos de durabilidade.
- Avaliação de outras proporções de substituição de agregado natural por agregado reciclado, bem como outras proporções de mistura de fibra de aço e outros tipos de fibra de aço.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. D.; BARBOSA, M. F. N.; BARBOSA, E. M. Reciclagem: o caminho para o desenvolvimento sustentável. **Polêm!ca**. Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 023–034, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.114**: Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142/2010**: Concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530**: Fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Mercado de agregados – perspectivas para 2022**. São Paulo,

2022. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022>. Acesso em: 12 jun. 2023.

BARROS, A.R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Construção Civil: Análises e Perspectivas**. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://cbic.org.br/2010-foi-ano-de-destaque-para-setor-da-construcao/>. Acesso em 13 jun. 2023.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B.; SAMPAIO, J.A. **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº. 307**: 5 de julho de 2022. Diário Oficial da União. Brasília: Imprensa Oficial. 2002.

DRAMIX. **Aços Longos**. Bahia, 2018. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/dramix>. Acesso em 16 jun. 2023.

FONSECA, D. S. **Avaliação de Aspectos e Impactos Ambientais em Canteiros de Obras em Salvador**. 2011. 103f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2011.

GAZONI, M. H. **Concreto com Agregado Reciclado Reforçado com Fibras de Aço: Revisão da Literatura e Avaliação de Modelos Analíticos**. 2022. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2022.

GIANNETTI, B.; ALMEIDA, C. **Engenharia e Meio Ambiente**. Material de aula, apostila, Pesquisadores do LaPROMA – Laboratório de Produção de Meio Ambiente, Universidade Paulista, São Paulo, 2008. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/disciplinas/arquivos/notasdeaula_ema.pdf. Acesso em 20 nov. 2023.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da Substituição do Agregado Miúdo Natural por Agregado Reciclado Fino em Propriedades de Argamassas e Concretos**. 2008, 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2008.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.