PUCRS / ESCOLA POLITÉCNICA / ENGENHARIA CIVIL
TCC 2024/2

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONCRETO CONVENCIONAL VERSUS CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO QUANTO AO CONSUMO DE MATERIAIS.

Autor: Jeferson Marques Alves (j.marques@edu.pucrs.br)
Orientador: Prof. Me. Paulo Schmeling Kunzler (paulo.schmeling@pucrs.br)

Resumo

Este estudo explora o Concreto de Alto Desempenho (CAD), destacando suas qualidades em resistência mecânica e durabilidade em relação ao concreto convencional, e sua relevância em construções de grande altura e ambientes agressivos. O objetivo deste estudo é apresentar um comparativo de consumo de concreto e aço, entre o concreto convencional e o CAD. Foram utilizados métodos comparativos ente o concreto convencional e o CAD, através de tabelas e ensaios, analisando o consumo de aço e concreto. Os resultados indicam que, em determinadas situações, a utilização do CAD pode resultar em uma economia no consumo de aço ou de concreto. Apesar de o CAD se mostrar uma solução viável para a construção civil, sua superioridade em resistência não se mostra tão eficaz a ponto de gerar uma grande economia no consumo de aço. O CAD apresenta benefícios substanciais em termos de durabilidade e sustentabilidade, embora sua aplicação ainda seja limitada no Brasil.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho, resistência mecânica, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O concreto de alto desempenho (CAD) emergiu como uma solução avançada na engenharia civil, destacando-se por suas propriedades superiores de resistência mecânica e durabilidade, em comparação ao concreto convencional. Esse tipo de concreto se caracteriza por uma baixa proporção água/aglomerante, resultando em uma estrutura densa e menos permeável, ideal para aplicações que exigem alta performance estrutural e longevidade. Com o avanço da tecnologia do concreto, o CAD tem sido amplamente estudado e aplicado em países com intensa urbanização vertical, como Estados Unidos, Canadá, França e Noruega. No entanto, no Brasil, seu uso ainda é restrito a algumas grandes cidades, devido ao conhecimento limitado sobre suas propriedades e técnicas de aplicação.

O principal desafio relacionado ao CAD no Brasil é a falta de conhecimento técnico e científico, o que impede sua ampla adoção e reduz os benefícios potenciais para a construção civil nacional. A compreensão inadequada sobre a seleção de materiais, dosagem e métodos de aplicação impede que construtores e engenheiros aproveitem plenamente as vantagens do CAD, como a construção de estruturas mais leves, esbeltas e duráveis.

A relevância do CAD para a construção civil é especialmente destacada em um contexto de urbanização crescente e necessidade de edificações mais altas e duráveis. O CAD não apenas melhora a resistência e durabilidade das estruturas, mas também contribui para a sustentabilidade, reduzindo a necessidade de manutenção e prolongando a vida útil das construções. Sua aplicação tem o potencial de transformar a forma como as estruturas são projetadas e construídas, oferecendo economia de materiais, maior eficiência na construção e menor impacto ambiental (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

Diante disso, justifica-se a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o CAD e suas aplicações no Brasil, visto que a ausência de estudos detalhados sobre as propriedades e métodos de dosagem do CAD é uma barreira significativa para sua adoção. Ao abordar essas lacunas, espera-se promover uma compreensão mais ampla e incentivar o uso do CAD na construção civil, beneficiando o setor de maneira geral.

A NBR 6118 – norma brasileira que estabelece os critérios para projeto de estruturas de concreto – já inclui parâmetros técnicos sobre o concreto de alto desempenho (CAD). Isso significa que a norma fornece orientações sobre o uso e especificações desse tipo de concreto, o que pode influenciar a abordagem e o desenvolvimento do estudo. É importante incorporar essa perspectiva no contexto da análise comparativa entre o CAD e o concreto convencional, enfatizando o papel da NBR 6118 como uma base regulatória que ajuda a orientar a aplicação do CAD no Brasil.

Nesse cenário, o objetivo deste estudo inclui um comparativo de consumo de concreto e aço de vigas, utilizando o CAD e o concreto convencional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento das estruturas de concreto trouxe consigo a necessidade de avaliar certas características mecânicas do material, como resistência e durabilidade. Essas propriedades são essenciais para garantir que as estruturas de concreto, amplamente aceitas na indústria da construção, apresentem um bom desempenho e exijam menos manutenção. Para que o concreto

atinja um alto nível de qualidade e desempenho, é fundamental que o processo de produção seja executado corretamente, o que inclui o estudo da proporção dos componentes, bem como a dosagem, manuseio e cura adequados. Quando esses procedimentos não são seguidos corretamente, surgem problemas que precisam ser solucionados com técnicas, produtos e mão de obra especializada (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

Na década de 1960, a produção de concreto com resistência à compressão de 30 MPa exigia um consumo elevado de cimento, variando entre 400 e 500 kg/m³. Contudo, com o aumento da construção civil, a partir dos anos 1970, e o surgimento do concreto pré-moldado, houve uma busca por traços mais eficientes, que permitissem concretos mais resistentes com menor quantidade de cimento (FERREIRA, 2000).

No Brasil, o estudo do concreto de alto desempenho (CAD) ganhou destaque somente em 2014, após diversas pesquisas demonstrarem sua eficácia. O desenvolvimento de aditivos químicos que aprimoram algumas das propriedades do concreto e o uso de materiais pozolânicos, inclusive rejeitos industriais, reduziram os custos e o consumo de energia, favorecendo a preservação ambiental. Entretanto, a utilização do CAD enfrentou desafios, como o conservadorismo de engenheiros e arquitetos, limitações nos códigos de construção e o conhecimento limitado sobre seu comportamento a longo prazo. Atualmente, o CAD é utilizado em várias aplicações no Brasil, como pilares de edifícios, pontes, pavimentos e na recuperação estrutural (BACCIN; PINHEIRO, 1997).

2.1. O Concreto de Alto Desempenho (CAD)

Trata-se de um material que apresenta propriedades superiores em comparação ao concreto comum, oferecendo um desempenho mais elevado nas construções. Isso significa que o CAD evoluiu ao longo dos anos para atender de maneira mais eficaz às demandas de proprietários e usuários, conforme projetado por engenheiros estruturais. O conceito de desempenho no CAD vai além da simples resistência mecânica, abrangendo aspectos como trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e, principalmente, durabilidade a abrasões (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019).

De acordo com Cordeiro (2001), o que anteriormente era chamado de concreto de alta resistência, na década de 1970, passou a ser definido não apenas pela sua elevada resistência, mas também por apresentar características como menor permeabilidade, maior resistência ao desgaste e abrasão, resultando em maior durabilidade. Mehta e Monteiro (1994) indicam que a

durabilidade é uma prioridade em cerca de 75% das obras que utilizam concreto de alta resistência.

O American Concrete Institute (ACI), por meio do Comitê 201 (1994), define a durabilidade do concreto como sua capacidade de resistir a fatores como condições atmosféricas, ataques químicos, abrasão e outros processos de deterioração. As condições atmosféricas incluem, por exemplo, a exposição a ciclos de molhagem e secagem, além de congelamento e descongelamento. Já a deterioração química abrange ataques de substâncias ácidas e reações expansivas, como as reações aos sulfatos, reações álcali-agregados e corrosão de armaduras de aço no concreto.

2.2. Comparação entre o Concreto CAD com o Convencional

Pode-se argumentar que o concreto de alto desempenho (CAD) não é algo completamente distinto do concreto convencional. O termo "concreto de alto desempenho" surgiu, em parte, como uma forma de divulgar um novo produto, apesar de os ingredientes básicos serem os mesmos usados no concreto tradicional. O CAD evoluiu gradualmente ao longo dos últimos 15 anos, especialmente no que diz respeito à sua produção, com resistências que chegam a 80, 90, 100, 120 MPa, e em alguns casos até mais (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019).

Embora o CAD e o concreto convencional utilizem os mesmos ingredientes básicos, eles não são idênticos, pois existem diferenças marcantes entre os dois tipos. Primeiramente, o CAD geralmente contém sílica ativa, enquanto o concreto convencional, em sua maioria, não. Além disso, o CAD frequentemente incorpora cinza volante ou escória granulada de alto-forno, ou até ambos, o que não é uma prática comum no concreto convencional. Outra diferença importante está no tamanho dos agregados: no CAD, o tamanho máximo das partículas de agregado costuma ser de 10 a 14 mm, enquanto no concreto convencional os agregados são normalmente maiores. Isso ocorre porque agregados menores são mais resistentes, já que o processo de trituração da rocha remove as grandes imperfeições, que, de outra forma, afetariam a resistência do material (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

Conforme mencionado anteriormente, os concretos de alto desempenho (CAD) são concretos que, além de possuírem resistências superiores (variando entre 400 e 1000 Kgf/cm²), apresentam características especiais, como elevada trabalhabilidade, alta impermeabilidade, durabilidade e resistência à agressividade química, obtidas por meio da adição de aditivos minerais e fibras. Portanto, as principais vantagens do CAD em comparação ao concreto convencional incluem (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019):

- Prolonga a vida útil da estrutura;
- Permite o design de seções estruturais menores, otimizando o espaço de construção;
- Aumenta a eficiência na execução de obras;
- Exige pouca ou nenhuma compactação;
- Facilita a construção de edifícios mais altos, possibilitando a aplicação de maiores cargas nas estruturas e fundações (NEVILLE; BROOKS, 2013);
- Na construção de pontes, possibilita a redução do número de vigas necessárias (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.3 Aplicações do CAD

Os concretos de alto desempenho (CAD) possuem um vasto campo de aplicações em praticamente todos os ramos da engenharia. Em cada um desses ramos, o CAD é utilizado em uma variedade de projetos que demandam as suas qualidades específicas. A seguir, são exploradas algumas áreas da engenharia e as atividades nas quais o uso de concreto de alto desempenho é altamente valorizado e justificado, evidenciando a necessidade de sua implementação (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

Figura 1: Barragem Hidroelétrica

(fonte: Sobradinho Notícias, 2016)

A figura 1 demonstra uma barragem hidrelétrica, um exemplo clássico de aplicação do concreto de alto desempenho. Nesse tipo de estrutura, o CAD é utilizado devido às suas características de alta resistência, durabilidade e impermeabilidade. A barragem precisa suportar enormes pressões de água e resistir a condições ambientais adversas, como ciclos de molhagem e secagem, além de possíveis ataques químicos e abrasões (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019).

O CAD se destaca, nesse contexto, por oferecer benefícios como: alta durabilidade, garantindo uma vida útil mais longa para a estrutura, reduzindo os custos de manutenção; baixa permeabilidade, fundamental para evitar infiltrações que poderiam comprometer a integridade da barragem; e resistência a ambientes agressivos, como o contato constante com água e variações de temperatura. Essas propriedades são cruciais para garantir a segurança e o desempenho eficiente das barragens hidrelétricas, que operam sob condições extremas e são vitais para a geração de energia limpa (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011). A figura 2, por sua vez, mostra um exemplo típico de uma estrutura de contenção construída com concreto.

Figura 2: Estrutura de Contenção

(fonte: Almeida, 2013)

Tais estruturas, conforme mostra a imagem, são amplamente utilizadas em obras de engenharia civil para suportar e estabilizar massas de solo, evitando deslizamentos e erosões, especialmente em áreas inclinadas ou de declives acentuados. O uso de concreto em estruturas de contenção é altamente vantajoso devido às seguintes propriedades:

1. Resistência à compressão: O concreto é ideal para suportar as grandes pressões exercidas pela massa de terra ou rocha, garantindo a integridade estrutural da obra.
2. Durabilidade: Estruturas de contenção feitas de concreto são projetadas para suportar longos períodos de uso sem comprometer a sua funcionalidade, resistindo à ação de fatores ambientais como umidade, temperatura e variações climáticas.
3. Impermeabilidade: O concreto de alto desempenho (CAD) utilizado nessas estruturas também é valorizado por sua baixa permeabilidade, que evita a infiltração de água e reduz

o risco de danos à estrutura, especialmente em regiões sujeitas a chuvas intensas ou umidade constante.

2.3.1 Princípio Fundamental

O princípio fundamental do CAD está na redução da porosidade do concreto, alcançada pela modificação da estrutura dos poros, abrangendo o tipo, o tamanho e a distribuição deles. Para atingir esse objetivo, algumas ações são essenciais, como: a) redução da relação água/aglomerante e do volume total de água por metro cúbico, o que pode ser feito com o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes; b) otimização da granulometria dos agregados para aumentar a compacidade do material, utilizando-se agregados graúdos com diâmetro máximo menor e uma adequada composição granulométrica dos finos; c) reforço das ligações químicas entre as partículas por meio da adição de materiais minerais, que ajudam a refinar a porosidade e os grãos, em especial o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Essas ações resultam em uma microestrutura mais densa, com poros menores e menos conectados, dificultando a passagem de fluidos e aumentando a capacidade de reter agentes dissolvidos. Isso contribui para uma melhoria na compacidade, resistência mecânica e durabilidade do concreto (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011). Para densificar ainda mais o concreto, são incorporadas partículas finas, muitas vezes menores que o próprio cimento. Essas partículas, conhecidas como superpozolanas, incluem materiais como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – adições fundamentais para conferir coesão e uma microestrutura densa ao CAD.

Além disso, a seleção cuidadosa dos agregados, especialmente os graúdos, é crucial, pois à medida que a resistência do concreto aumenta, os agregados podem se tornar a parte mais frágil da mistura, limitando o desempenho final do compósito (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011). Sendo assim, para transformar um concreto convencional em um CAD, além do uso de aditivos químicos e adições minerais, é necessário utilizar agregados de alta qualidade e estudar detalhadamente as três fases da mistura: a pasta de cimento hidratada, a zona de transição e os agregados. Embora essas fases interajam entre si, para fins didáticos, são tratadas separadamente, a fim de facilitar o entendimento do processo (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019).

Na fase de pasta de cimento hidratada, para Tutikian, Isaia e Helene (2011) poros com diâmetro superior a 50 ηm são considerados grandes e representam um dos principais fatores que comprometem a obtenção de concretos compactos e resistentes, especialmente quando estão

concentrados na interface entre o agregado e a pasta. Segundo o autor, a redução da porosidade na pasta exige a diminuição tanto da quantidade de água quanto do ar aprisionado na mistura.
A resistência da pasta depende também do grau de hidratação dos compostos do cimento, como o C-S-H primário, e da progressão das reações pozolânicas, que reagem com o hidróxido de cálcio para formar silicatos de cálcio secundários. Assim, a resistência mecânica da pasta está diretamente relacionada à relação água/cimento (a/c) ou água/aglomerante (a/ag), que controlam a porosidade e a compacidade. Além disso, o grau de maturidade da pasta, ou seja, a quantidade de compostos hidratados ao longo do tempo, influencia a resistência e é afetado pela idade do concreto e pelas condições de temperatura durante a cura (CORDEIRO, 2001).
As características da pasta cimentícia também são influenciadas pela presença de adições minerais, como sílica ativa, cinza volante e metacaulim, entre outras. Esses materiais têm vários efeitos benéficos, como: a) melhorar as propriedades reológicas da pasta, como a coesão, fluidez, viscosidade plástica e resistência à segregação, devido à alta finura das partículas; b) reduzir a exsudação ao fragmentar os canais de fluxo de água; c) refinar os vazios com a formação de C-S-H secundário, que reduz a interconexão dos poros; d) refinar os cristais de hidróxido de cálcio resultantes das reações pozolânicas (QUISSANGA; PIMENTEL, 2019).

2.3.2 Dosagem

A produção do concreto de alto desempenho é significativamente mais complexa e sensível do que a de concretos convencionais, devido às propriedades superiores do material. Por conter mais componentes e formar peças estruturais de maior importância para a concepção de uma edificação, a produção do CAD deve seguir procedimentos detalhados e rigorosos, para garantir que a dosagem de laboratório seja replicada corretamente na obra (CORDEIRO, 2001).
O primeiro passo em uma construção que utiliza CAD é definir, no projeto, os elementos estruturais que irão maximizar as vantagens do concreto. Após a escolha criteriosa dos componentes, conforme descrito anteriormente, a etapa seguinte é a dosagem do concreto. Os desafios na determinação da melhor proporção dos componentes no CAD são ainda maiores. Isso se deve ao fato de que, além de haver mais componentes no CAD do que no concreto convencional, as misturas podem incluir até sete constituintes: cimento, sílica ativa ou metacaulim, areia, brita 0, brita 1, aditivos plastificantes e superplastificantes. Em alguns casos, fibras, pigmentos ou outros materiais finos podem ser adicionados simultaneamente.
Os métodos de dosagem mais utilizados para o CAD incluem o Mehta-Aïtcin (1990), o Aïtcin (2000), o Nawy (1996) e o método IBRACON, que também se aplica a essas misturas. Outros

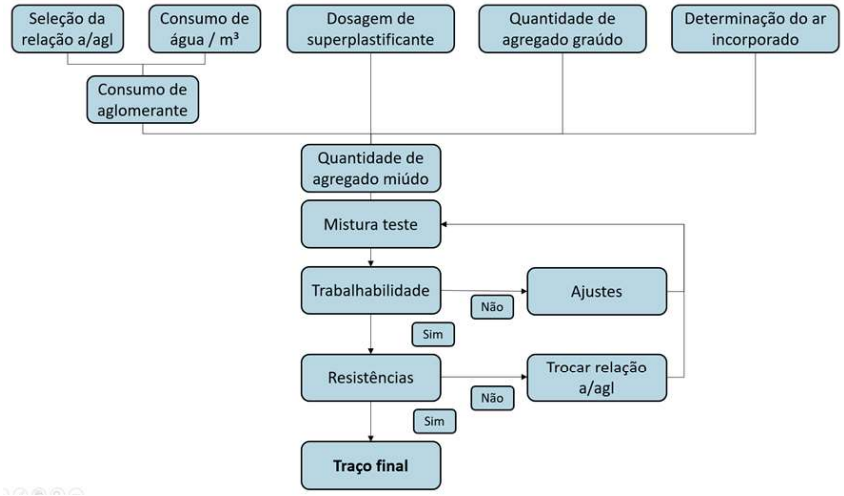
métodos conhecidos são os de De Larrard (1990), Torrales Carbonari (1996) e O'Reilly (1998). Os três últimos, assim como o método Mehta-Aïtcin (1990), baseiam-se na otimização do esqueleto granular, preenchendo os vazios com cimento ou pasta. Já os métodos de Nawy (1996) e Aïtcin (2000) seguem o critério de volume absoluto, em que a quantidade de agregado graúdo, cimento e água é determinada, e o que faltar para completar um metro cúbico é compensado com areia.

Apesar disso, o único método experimental que se baseia em fundamentos científicos é o método IBRACON. Diversos estudos comparativos foram realizados no Brasil, como os de Alves (2000) e Pinto (2003), que analisam os métodos de dosagem do CAD. Contudo, os autores frequentemente chegam a conclusões divergentes e indefinidas sobre qual método é o mais econômico e eficiente para atingir as propriedades desejadas, já que os resultados dependem muito dos materiais locais utilizados.

Entre os métodos mais relevantes estão o Método de Aïtcin (2000), que segue o critério de volume absoluto; o Método de O'Reilly (1998), que se baseia no conceito de esqueleto granular; e uma combinação dos Métodos de O'Reilly e IBRACON, que se aproximam de uma abordagem científica e experimental para a dosagem do CAD.

O Método de Aïtcin (2000) combina resultados empíricos com cálculos matemáticos, tornando-o relativamente simples de aplicar. No entanto, não há uma garantia absoluta de que as propriedades desejadas sejam atingidas com precisão. O processo seguido por esse método é representado por um fluxograma, conforme mostra a figura 3.

Figura 3: Fluxograma do Método de Aïtcin

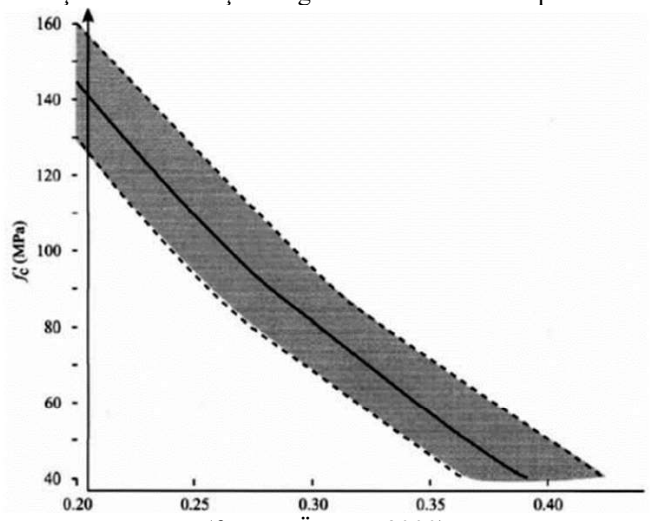


(fonte: AÏTCIN, 2000)

O primeiro passo do método consiste em determinar a relação água/aglomerante (a/ag) necessária para atingir a resistência à compressão especificada. O autor apresenta uma curva

teórica, mostrada na figura 4, que permite estimar essa relação. A curva correlaciona a relação a/ag com a resistência à compressão após 28 dias, baseando-se em uma série de resultados obtidos em pesquisas anteriores (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

Figura 4: Relação entre a relação a/ag e a resistência à compressão aos 28 dias



(fonte: AÏTCIN, 2000)

No segundo passo do método, o consumo de água da mistura é determinado utilizando-se o Quadro 1, proposto pelo autor. Esse quadro faz a correlação entre a dosagem de água e o ponto de saturação do aditivo superplastificante, auxiliando no ajuste adequado da quantidade de água na mistura.

Tabela 1: Relação entre o ponto de saturação do aditivo (%) e a quantidade de água (kg/m³)

Ponto de saturação do aditivo (%)	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,2**	**1,4**
Água (kg/m³)	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165

(fonte: AÏTCIN, 2000)

Sabe-se que, quanto maior a quantidade de água utilizada, menor será a resistência à compressão do concreto. O método indica que, caso o ponto de saturação do aditivo superplastificante não seja conhecido, pode-se iniciar uma mistura experimental utilizando 1% de aditivo e 145 kg/m³ de água – embora isso seja relativamente incerto.

No terceiro passo, deve-se determinar o teor de saturação do aditivo. A recomendação inicial é partir com 1% na mistura experimental e realizar ajustes conforme necessário, caso o resultado não seja satisfatório. O quarto passo envolve a determinação da quantidade de agregado graúdo, com base, principalmente, na forma das partículas. Sugere-se começar com 1000 kg/m³ e, a partir disso, fazer os ajustes necessários. No quinto passo, é feita a determinação

do ar incorporado na mistura, com uma sugestão inicial de 1,5% como ponto de partida (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, que busca comparar o concreto de alto desempenho (CAD) e o concreto convencional (CC) em termos de custos.

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa e experimental, com o objetivo de comparar o consumo de materiais entre o CAD e o CC em diferentes tipos de projetos de construção. O levantamento de dados foi realizado por meio de uma análise documental, revisão das normas técnicas, que regulamentam os métodos construtivos.

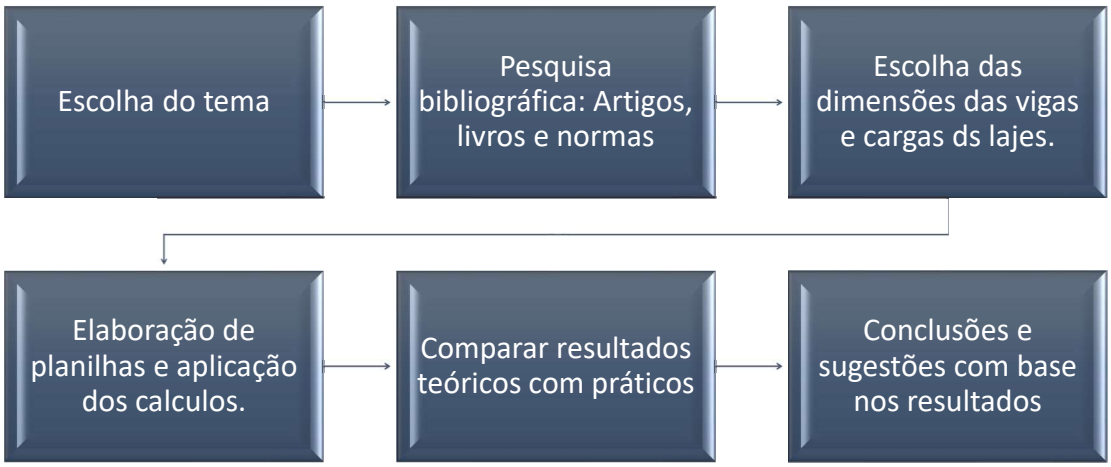
A pesquisa inclui cálculos comparativos práticos entre concreto convencional (CC) e concreto de alto desempenho (CAD), conforme exposto a seguir. É realizada a análise de diferentes resistências características do concreto a compressão (fck), uma para o concreto convencional e outras para o CAD. Essa comparação tem como objetivo analisar diferenças em termos de proporções de materiais. Além disso, é aplicado um passo-a-passo para elaborar ambos os traços, permitindo uma análise detalhada do desempenho esperado para cada tipo de concreto.

Também são calculados elementos estruturais – vigas – para comparar o consumo de materiais. Para cada viga, são realizados três cálculos: o primeiro cálculo utiliza concreto convencional, com uma geometria padrão como referência, para analisar o consumo de concreto e o comportamento estrutural esperado. A partir disso, são feitos dois cálculos com o CAD: o primeiro mantém a mesma geometria de referência do concreto convencional para verificar a economia de aço e o ganho de resistência proporcionado pelo CAD. Já o segundo cálculo emprega uma geometria otimizada ou reduzida, ajustada para aproveitar ao máximo a maior resistência do CAD, a fim de comparar a economia de concreto e aço proporcionada por essa modificação estrutural.

Essas comparações quantitativas entre os dois tipos de concreto e geometrias diferentes permitem uma análise aprofundada dos benefícios do CAD em termos de economia de materiais, eficiência estrutural e custo-benefício. Dessa forma, é possível explorar tanto a economia direta, em termos de consumo de concreto e aço, quanto os potenciais ganhos de desempenho estrutural, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada sobre a

adoção do CAD em projetos de construção. A figura 5 apresentou o fluxograma adotado para a realização das etapas do trabalho.

Figura 5: Estrutura do trabalho



(fonte: AUTOR, 2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do estudo e ensaios realizados, foram compilados e descritos nos próximos itens desse capítulo, analises e discussões complementaram o mesmo.

4.1 Desempenho e Características Gerais

O concreto de alto desempenho (CAD) destaca-se por suas elevadas propriedades mecânicas e sua resistência aprimorada, em comparação ao concreto convencional. Essas características são obtidas por meio de uma composição ajustada, que inclui aditivos como sílica ativa e superplastificantes, e uma menor relação água/cimento (a/c) – fatores que promovem uma mistura mais densa e menos porosa, resultando em um material mais robusto. Conforme Araújo (2023), a resistência à compressão do CAD pode variar entre 50 e 100 MPa, dependendo da dosagem e da qualidade dos agregados utilizados. A resistência à compressão, um dos principais indicadores de desempenho do CAD, é calculada pela equação 1:

(equação 1)

$$fc = \frac{P}{A}$$

Onde:

- Fc = resistência à compressão (em MPa)
- P = carga máxima suportada pelo corpo de prova (em N)
- A = área da seção transversal do corpo de prova (em mm²)

Para um CAD típico com resistência à compressão de 60 MPa, o valor de fc demonstra a robustez da estrutura em suportar cargas intensas sem deformações críticas. O módulo de elasticidade do CAD, que mede a rigidez do material, é calculado pela equação 2:

(equação 2)

$$E_c = \alpha \mathrm{E} \times 21500 \times \left(\frac{fcm}{10}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Onde:

- Ec = o módulo de elasticidade (MPa)
- fcm = resistência média à compressão

Para um CAD com fc=60 MPa, o módulo de elasticidade resulta em aproximadamente 44.100 MPa, conferindo-lhe alta rigidez e menor propensão à deformação. A durabilidade também é significativamente melhorada devido à baixa permeabilidade da mistura, reduzindo a entrada de agentes corrosivos e ampliando a vida útil da estrutura (ARAÚJO, 2023). Embora o CAD ofereça grandes vantagens estruturais, ele também apresenta desafios notáveis. Uma das principais limitações é a suscetibilidade a microfissuras devido à alta rigidez da matriz, o que exige o uso de fibras para aumentar a tenacidade e evitar a propagação de fissuras iniciais. Essa adição de fibras, contudo, eleva o custo e a complexidade de produção do material. Além disso, o controle da mistura e a dosagem dos componentes precisam ser precisos, requerendo mão de obra especializada e equipamentos adequados para garantir a qualidade.

Neste sentido, a produção desse material inclui aditivos específicos, como a sílica ativa, um subproduto da indústria de ferrossilício, que envolve um alto consumo de energia. Segundo Araújo (2023), a elevada demanda energética e a dependência de materiais industrializados dificultam a sustentabilidade do CAD em larga escala, especialmente em regiões onde esses materiais são importados, aumentando o custo de produção e o impacto ambiental.

4.2 Dimensionamento Estrutural e Deformações Específicas no CAD

No estudo do concreto de alto desempenho (CAD), o dimensionamento das seções estruturais depende de parâmetros técnicos específicos que garantem a segurança e eficiência das estruturas. Um desses parâmetros é a profundidade limite da linha neutra (x_lim), um fator essencial para assegurar que a distribuição de tensões na seção comprimida do concreto suporte adequadamente as cargas aplicadas, sem comprometer a integridade estrutural. No contexto dos concretos de alta resistência, como o CAD, essa análise é de suma importância, pois as altas tensões de compressão exigem controle rigoroso para evitar falhas estruturais. A determinação de x_lim é realizada a partir de uma deformação máxima de compressão de εc=2,6, que relaciona a deformação do concreto com a da armadura de aço. Essa relação geométrica garante que a capacidade da seção de resistir aos esforços de flexão seja suficiente para atender aos requisitos de projeto, possibilitando o uso de seções mais eficientes e reduzidas, sem perda de segurança (ARAÚJO, 2023).

Outro aspecto crítico no dimensionamento do CAD é a determinação da força de compressão máxima suportada pela seção de concreto, expressa pela resultante de dimensionamento R_(CClim). Essa força pode ser calculada pela expressão R_(CClim)=0,8 ×b ×x_(limf_{O})×fcd, que leva em consideração a largura da seção (b), a profundidade limite da linha neutra ($x$lim) e a resistência de cálculo do concreto ($f$cd). No caso do CAD, que apresenta resistências à compressão significativamente mais elevadas que o concreto convencional, essa fórmula é essencial para avaliar a capacidade de carga da seção comprimida, explorando seu potencial de uso em seções estruturais menores. Tal abordagem permite a otimização do uso de materiais e a redução de custos, mantendo a estabilidade e durabilidade da estrutura ao longo do tempo, o que representa uma vantagem significativa na comparação com o concreto convencional (ARAÚJO, 2023).

Além dos aspectos de resistência e capacidade de carga, o estudo das deformações específicas para concretos de alta resistência torna-se fundamental para garantir a segurança e durabilidade das estruturas em CAD. Concretos de resistência superior a 50 MPa requerem ajustes nos limites de deformação, definidos por fórmulas que consideram a resistência característica do material. Esses ajustes asseguram que o concreto responda adequadamente às tensões aplicadas, minimizando o risco de fissuração e colapso prematuro. O CAD, caracterizado por uma menor porosidade e maior densidade em comparação ao concreto convencional, exige limites de deformação específicos para que suas propriedades sejam devidamente dimensionadas. Esses valores de deformação ajustados não apenas contribuem para a segurança estrutural, mas

também reforçam a durabilidade das construções, assegurando que as estruturas projetadas com CAD mantenham desempenho adequado ao longo de sua vida útil, além de reduzir a necessidade de manutenção (ARAÚJO, 2023).

Neste sentido, para concretos de diferentes classes de resistência, os valores de deformação são ajustados conforme fórmulas específicas, de forma a refletir o comportamento mecânico dos concretos de alta resistência. Para concretos de classe até C50, o limite de deformação $\varepsilon c2$ é fixado em 2,0‰. Em concretos de classes C55 até C90, esse limite é ajustado pela equação 3:

(equação 3)

$$\varepsilon_{c2} = 2{,}0‰ + 0{,}085‰ \times (f_{ck} - 50)^{0{,}53}$$

Para o cálculo da deformação última do concreto comprimido (ϵcu), foi utilizada a equação 4, fornecida pela norma que leva em consideração a resistência característica do concreto (fck).

(equação 4)

$$\epsilon_{cu} = 2{,}6‰ + 35‰ \times \left(\frac{(90 - f_{ck})}{100}\right)^4$$

A expressão utilizada para calcular a deformação última do concreto comprimido (εcu) leva em consideração a resistência característica do concreto (fck). Nesta formulação, o valor de εcu é obtido através da soma de uma constante base (2,6‰) com o produto de um coeficiente (35‰) multiplicado por uma função exponencial que considera a diferença entre um valor fixo (90) e a resistência do concreto (fck), divididos por 100 e elevados à quarta potência. Essa abordagem é específica para concretos de alta resistência, permitindo ajustar o limite de deformação para garantir a segurança e durabilidade das estruturas.

No cálculo fornecido, substitui-se fck=60MPa na equação. Isso resulta em uma deformação específica última (εcu) de 2,88%, quando utilizou-se fck=90MPa, resultou em uma deformação especifica última (εcu) de 2,60%. Esse ajuste é fundamental para estruturas que requerem maior controle de deformações devido à alta carga aplicada, pois permite que o concreto de alta resistência responda adequadamente, sem comprometimentos estruturais.

Essas expressões permitem uma caracterização detalhada do desempenho estrutural do CAD, fornecendo parâmetros que garantem a confiabilidade das estruturas mesmo sob condições de carga elevadas e exposição a ambientes agressivos. Tais ajustes são fundamentais para o dimensionamento detalhado das seções estruturais, assegurando que o CAD responda

adequadamente às exigências de resistência e deformação, promovendo a segurança e longevidade das construções em concreto de alta resistência (ARAÚJO, 2023).

Com esse novo valor de εcu para os concretos com fck acima de 55 MPa, pode-se calcular o valor de ξlim, com a expressão 5:

(equação 5)

$$\xi\text{lim} = \varepsilon\text{cu} \times \left(\frac{\varepsilon\text{cu}}{\varepsilon\text{cu} + \varepsilon\text{yd}}\right)$$

Para determinar a deformação de escoamento do aço (εyd), foi utilizada a seguinte equação 6:

(equação 6)

$$\varepsilon\text{yd} = \left(\frac{\text{fyd}}{\text{Es}}\right)$$

Sendo Es, o módulo de elasticidade e fyd a tensão de escoamento de cálculo do aço. Neste estudo adotou-se Es = 21000 kN/cm². (Araújo, 2023).

Para a determinação do μlim foi utilizado a expressão 7:

(equação 7)

$$\mu\text{lim} = 0{,}8 \times \xi\text{lim} \times (1 - 0{,}4 \times \xi\,\text{lim})$$

4.3. Análise comparativa do consumo de aço e desempenho

A análise do consumo de aço em estruturas de concreto armado é um aspecto central na busca por soluções estruturais mais eficientes e economicamente viáveis. A escolha do concreto a ser utilizado, seja ele convencional ou de alto desempenho (CAD), influencia diretamente as necessidades de armaduras longitudinais e, consequentemente, os custos e a sustentabilidade dos projetos. Assim, este subcapítulo aborda o processo de comparação entre diferentes dimensões de vigas e tipos de concreto, com foco na avaliação do impacto dessas escolhas no consumo de materiais.

A figura 5, apresentada abaixo, apresenta o esquema das vigas analisadas, destacando as dimensões e as configurações estruturais utilizadas no estudo. A figura ilustra a uniformidade do comprimento das vigas (5 m, 7,5 m e 10 m) e as lajes (5x5 m2, 7,5x7,5 m2 e 10x7,5 m2), que refletem cenários típicos em projetos estruturais. Para desenvolvimento dos cálculos, foi adotada uma carga acidental (qac.) de 3 kN/m² e uma carga permanente (qperm.) de 1,2 kN/m².

O momento máximo de uma viga contínua pode ser calculado pela equação 8:

(equação 8)

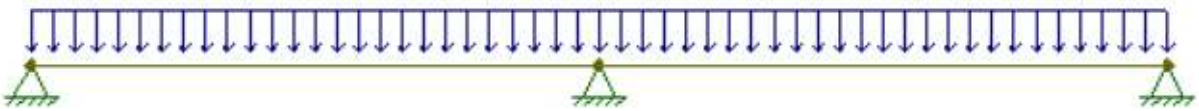
$$\text{Mmáx} = \left(\frac{\text{q} \times l^2}{8}\right)$$

Onde:

- Mmáx: momento máximo (kNm);
- q: carga distribuída ao longo da viga (kN/m)
- l: comprimento do vão (m).

Essa contextualização inicial oferece uma visão clara do objeto de estudo, servindo como base para os dados que são apresentados e discutidos nos subcapítulos subsequentes. A figura 6 expressa a condição da viga para dimensionamento.

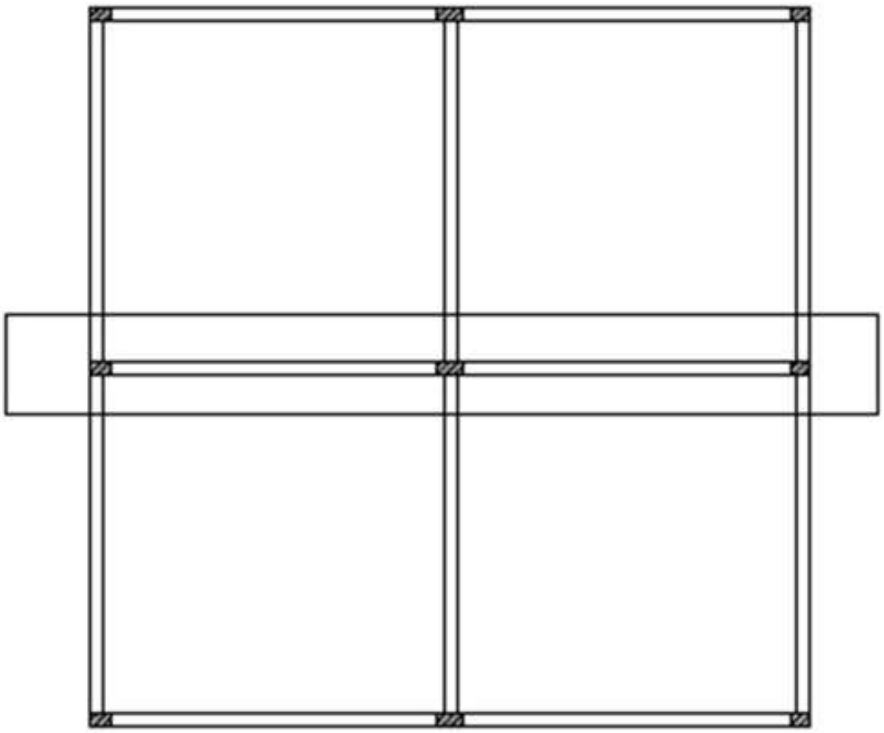
Figura 6: Análise dos apoios da viga e distribuição de carga



(fonte: AUTOR, 2024)

Dessa maneira, pode-se calcular o valor do Carga de peso próprio que irá variar conforme a geometria da viga, a qual é expressa pela equação: base da viga x altura da viga x peso específico (B * H *P esp.). A figura 7 apresenta a disposição da viga analisada no estudo.

Figura 7: Disposição da Viga Analisada



(fonte: AUTOR, 2024)

O estudo foi estruturado para abranger três dimensões distintas de vigas, permitindo uma análise abrangente das condições de consumo de aço em diferentes configurações geométricas. Cada dimensão foi submetida a cálculos específicos para determinar as áreas de armadura necessárias, considerando resistências características do concreto (fck) de 30 MPa, 60 MPa e 90 Mpa, permitindo uma avaliação detalhada do impacto do tipo de concreto no consumo de aço. Foi dimensionado apenas o momento fletor negativo da viga, pois se trata do maior momento atuante sobre ela.

A metodologia aplicada reflete a importância de considerar tanto as propriedades do concreto quanto as características geométricas das vigas no dimensionamento de armaduras. O uso de CAD, em especial, possibilita avanços significativos na eficiência estrutural, mas sua aplicação exige rigor técnico e análise criteriosa, aspectos que são detalhados nos subcapítulos subsequentes.

4.4.1. Comparativo 1

Conforme o dimensionamento realizado por esse comparativo, buscou-se analisar a economia das áreas de aço (AS) para cada fck adotado, mantendo a mesma geometria para o mesmo comprimento de viga, e respeitando o limite mínimo da altura da viga como L/12.

Neste sentido, a Tabela 4 apresenta os valores detalhados das áreas de aço (AS) determinadas para a vigas de 5, 7,5 e 10 metros. Esses dados foram obtidos com base em análises estruturais, considerando as condições de carregamento e os parâmetros geométricos da viga. A tabela 2 ilustra a relação entre o fck e o consumo de aço, permitindo uma avaliação quantitativa das economias potenciais proporcionadas pelo uso do CAD.

Tabela 2: Comparativo de consumo de aço

B		H		L Viga		AS		μ/μlim	FCK	
15	cm	42	cm	5	m	7,10	cm2	0,67	30,00	MPa
15	cm	42	cm	5	m	6,48	cm2	0,35	60,00	MPa
15	cm	42	cm	5	m	6,32	cm2	0,24	90,00	MPa
20	cm	63	cm	7,5	m	16,03	cm2	0,72	30,00	MPa
20	cm	63	cm	7,5	m	14,50	cm2	0,38	60,00	MPa
20	cm	63	cm	7,5	m	14,10	cm2	0,26	90,00	MPa
25	cm	83	cm	10	m	16,28	cm2	0,47	30,00	MPa
25	cm	83	cm	10	m	15,39	cm2	0,25	60,00	MPa
25	cm	83	cm	10	m	15,14	cm2	0,17	90,00	MPa

(fonte: AUTOR, 2024)

A redução no consumo de aço proporcionada pelo CAD decorre de suas propriedades superiores e de sua maior resistência. Entretanto, é importante destacar que o uso do CAD em vigas não expressou uma considerável diminuição no consumo de aço. A redução ocorreu por uma alteração do ponto da linha neutra da estrutura analisada, que promoveu uma possível diminuição no consumo de aço. A tabela 3 apresenta a porcentagem de redução de aço, para cada comprimento de viga e tipo de fck utilizado em sua composição.

Tabela 3: Consumo e reduções

L Vigas	FCK	Redução AS
5 m	30 MPa	
5 m	60 MPa	-9%
5 m	90 MPa	-11%
7,5 m	30 MPa	
7,5 m	60 MPa	-10%
7,5 m	90 MPa	-12%
10 m	30 MPa	
10 m	60 MPa	-5%
10 m	90 MPa	-7%

(fonte: AUTOR, 2024)

Os resultados expressos na tabela 3 demonstram que a maior economia foi obtida nas vigas de 7,5 metros, enquanto a menor economia aconteceu nas vigas de 10 metros. Outro ponto interessante dessa análise é a relação μ/μlim: quando utilizado o CAD, a sua relação diminui gradualmente, conforme o aumento do fck, o que possibilita um carregamento maior para as vigas analisadas.

4.5.2. Comparativo 2

Conforme análise anterior, é possível perceber uma redução na relação μ/μlim quando utilizado o CAD. Com base nesses resultados, é realizada uma nova análise, que leva em conta o parâmetro μ/μlim.

Sendo assim, a análise seguinte demonstra como o fck influência o dimensionamento da estrutura através da sua resistência. Fixando o valor de μ/μlim a 80%, observam-se alterações na geometria, consumo de aço e no volume de concreto. As análises realizadas têm apenas a intenção de demonstrar uma possível diminuição no volume de concreto. Contudo, com as seguintes alturas abaixo da altura mínima estabelecida (L/12), deve-se verificar a sua segurança por outros fatores não abordados no estudo. A tabela 4 apresenta os dados obtidos para essa

análise, destacando as diferenças nas áreas de aço calculadas para cada tipo de concreto e a geometria da estrutura.

Tabela 4: Consumo de AS e dimensionamento das vigas

B		H		L Viga		AS		μ/μlim	FCK	
15	cm	38,74	cm	5	m	8,06	cm2	0,80	30,00	MPa
15	cm	29,01	cm	5	m	10,86	cm2	0,80	60,00	MPa
15	cm	24,67	cm	5	m	12,94	cm2	0,80	90,00	MPa
20	cm	59,95	cm	7,5	m	17,30	cm2	0,80	30,00	MPa
20	cm	44,13	cm	7,5	m	23,24	cm2	0,80	60,00	MPa
20	cm	37,11	cm	7,5	m	27,64	cm2	0,80	90,00	MPa
25	cm	63,33	cm	10	m	22,94	cm2	0,80	30,00	MPa
25	cm	46,21	cm	10	m	30,55	cm2	0,80	60,00	MPa
25	cm	38,70	cm	10	m	36,21	cm2	0,80	90,00	MPa

(fonte: AUTOR, 2024)

Fixando o parâmetro μ/μlim, verifica-se uma redução na altura das vigas, que é proporcional ao aumento do fck. A tabela 5 expressa a redução das alturas em porcentagem.

Tabela 5: Consumo de materias

L Vigas	FCK	Redução Volume	Aumento AS
5 m	30 MPa		
5 m	60 MPa	-25%	35%
5 m	90 MPa	-39%	71%
7,5 m	30 MPa		
7,5 m	60 MPa	-26%	34%
7,5 m	90 MPa	-38%	60%
10 m	30 MPa		
10 m	60 MPa	-40%	98%
10 m	90 MPa	-41%	68%

(fonte: AUTOR, 2024)

Observa-se, assim, uma redução considerável no volume de concreto, quando utilizado o CAD, que acompanha o aumento do fck e o comprimento da viga. Entretanto, quando analisado o consumo de AS, verifica-se um aumento significativo, chegando a 98% de aumento de área de aço para vãos com 10 m de comprimento, o que pode afetar consideravelmente o custo.

4.5.3. Comparativo 3

O objetivo desse comparativo é avaliar o valor que a viga com dimensões que respeitem os parâmetros da NBR 6118 – que, para esse ensaio, foi utilizado (L/12) – suporta. Se manteve o parâmetro μ/μlim fixo em 80%. Além disso, a análise manteve a geometria da peça e μ/μlim com valores definidos, possibilitando chegar ao valor máximo de momento na viga para diferentes tipos de fck. A tabela 6 apresenta os dados obtidos para essa análise, destacando as diferenças nas áreas de aço calculadas e o momento.

Tabela 6: Consumo de AS e aumento do momento

B		H		L Viga		AS		μ/μlim	FCK		momento	
15	cm	42	cm	5	m	8,82	cm2	0,80	30,00	MPa	84,84	kN.m
15	cm	42	cm	5	m	16,50	cm2	0,80	60,00	MPa	161,07	kN.m
15	cm	42	cm	5	m	23,79	cm2	0,80	90,00	MPa	234,13	kN.m
20	cm	63	cm	7,5	m	18,25	cm2	0,80	30,00	MPa	272,69	kN.m
20	cm	63	cm	7,5	m	34,15	cm2	0,80	60,00	MPa	517,72	kN.m
20	cm	63	cm	7,5	m	49,25	cm2	0,80	90,00	MPa	752,56	kN.m
25	cm	83	cm	10	m	30,55	cm2	0,80	30,00	MPa	611,13	kN.m
25	cm	83	cm	10	m	57,17	cm2	0,80	60,00	MPa	1160,26	kN.m
25	cm	83	cm	10	m	82,43	cm2	0,80	90,00	MPa	1686,55	kN.m

(fonte: AUTOR, 2024)

Fixando o parâmetro μ/μlim e a geometria da viga, observa-se o aumento nas áreas de aço e o aumento do momento quando utilizado o CAD. A tabela 7 expressa esses respectivos aumentos em porcentagem.

Tabela 7: Relação do consumo de AS e momento.

L Vigas	FCK	Aumento AS	Aumento do momento
5 m	30 MPa		
5 m	60 MPa	87,13%	89,86%
5 m	90 MPa	169,83%	175,97%
7,5 m	30 MPa		
7,5 m	60 MPa	87,13%	89,86%
7,5 m	90 MPa	169,83%	175,97%
10 m	30 MPa		
10 m	60 MPa	87,13%	89,86%
10 m	90 MPa	169,83%	175,97%

(fonte: AUTOR, 2024)

Os resultados evidenciam que, mesmo o CAD tendo uma resistência superior ao concreto convencional, ele não representa uma economia de AS nas vigas. Assim, o estudo revela que, quanto maior o fck, maior será a área de aço necessária para o dimensionamento da seção e

mais carregada pode ser a viga, quando levados em conta os parâmetros previamente estabelecidos para esse comparativo. O consumo de aço para o fck de 90 MPa chegou a 169,83% e para ser atingida a relação μ/μlim em 80%, o momento foi elevado a 175,97%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou as características e aplicações do concreto de alto desempenho (CAD) e do concreto convencional, enfatizando as diferenças em termos de resistência mecânica, durabilidade, eficiência estrutural e impacto econômico. A pesquisa reforçou a importância do CAD como uma alternativa viável para projetos que exigem maior desempenho estrutural e alinhamento às diretrizes de sustentabilidade na construção civil.

Os resultados obtidos demonstram que o CAD, ao incorporar adições pozolânicas, como a sílica ativa e métodos de dosagem específicos, apresenta propriedades mecânicas superiores. Essas características possibilitam a construção de estruturas mais leves e esbeltas, sem comprometer a segurança e durabilidade, destacando-se principalmente em aplicações de alta exigência.

Além disso, o uso do CAD mostrou uma pequena redução do consumo de aço, salvo que essa diferença está diretamente relacionada ao fato da mudança do ponto da linha neutra, que é alterado devido a resistência do CAD, conforme evidenciado pela análise das vigas dimensionadas em diferentes seções. A relação entre as propriedades geométricas e o desempenho estrutural evidencia que, mesmo com uma resistência superior a concreto convencional, o CAD, quando utilizado com armaduras de aço, não demonstra uma redução significativa de AS. Isso acontece, pois, mesmo tendo resistência suficiente, o concreto necessita de uma grande parcela de aço para resistir às deformações. Contudo, o emprego de novas tecnologias e novos estudos podem tornar o CAD, quando combinado com materiais de alta resistência (fibra de vidro, vergalhão com grafeno), um concreto com maior utilização na construção civil.

A viabilidade prática do CAD, no entanto, apresenta desafios, especialmente no contexto brasileiro. A falta de disseminação técnica e o custo inicial elevado ainda limitam sua adoção em larga escala. Por outro lado, a inclusão do CAD nas normas técnicas nacionais, como a NBR 6118, e os avanços na pesquisa acadêmica têm potencial para impulsionar sua aplicação no mercado, incentivando um uso mais amplo e estratégico desse material.

Os dados apresentados reforçam a necessidade de maior integração entre academia, mercado e regulamentação, visando a superação das barreiras técnicas e culturais que dificultam a adoção

do CAD no Brasil. Investimentos em capacitação de profissionais e ampliação de estudos sobre as especificidades regionais podem fortalecer a implementação desse concreto de alta performance em diferentes contextos construtivos.

A pesquisa reafirma a importância de análises comparativas no campo da engenharia civil, destacando como as decisões baseadas em dados podem transformar a prática profissional. O CAD, quando adotado de forma criteriosa, representa um avanço significativo em termos de inovação, sustentabilidade e eficiência estrutural, consolidando-se como um material essencial para os desafios contemporâneos da construção civil.

Por fim, novos estudos contendo o coeficiente de fragilidade, estudos sobre matérias de alta resistência como fibra de vidro e fibra de carbono, podem contribuir para o avanço do CAD.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre-Claude. Binders for durable and sustainable concrete. Modern Concrete Technology, 16. Abingdon: Taylor & Francis, 2000.

ALVES, M. F. Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

ARAÚJO, J. M. de. Curso de Concreto Armado. 5. ed. Rio Grande, RS: Editora Dunas, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BACCIN, A.G.C.; PINHEIRO, L.M. Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho para aplicação em edifícios. In: REUNIÃO DO IBRACON, 39., São Paulo, 1997. v.2, p.687-700.

BAKER, W. F.; KORISTA, D. S.; NOVAK, L. C. Engineering the world's tallest Burj Dubai. In: World Congress of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 8th, 2008, Dubai. Proceedings... Chicago: CTBUH, 2008. p. 1-10.

BEZERRA, S. A. Influência do tipo e da duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quentes (t > 25°C) e de baixa umidade relativa do ar (h < 50%). Goiânia: UFG, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2014. Ciência Moderna, 2014.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. Concreto de alto desempenho com metacaulinita. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, RJ, 2001.

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

NBR 10900: Água para amassamento de concreto. Partes de 1 a 11. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Partes de 1 a 6. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

NBR 8953: Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

OLIVEIRA, João Miguel – Concreto de Alto Desempenho (CAD). Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, Itapeva, 2000.

O´REILLY, V. Método de dosagem de concreto de elevado desempenho. São Paulo: PINI, 1998. PINTO, R.O. Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para concreto de alto desempenho (CAD) empregando materiais da região de Goiânia. Goiânia: UFG, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

QUISSANGA, Vencislau Manuel; PIMENTEL, Fabiano. Concreto de Alto Desempenho (CAD). TEC-USU, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 1-11, jan./jun. 2019.