

Received:
March 27, 2026

Accepted:
May 18, 2026

Published:
May 31, 2026

Correlation between cement content and flexural strength in high-performance concrete

Demisson Renato Ferreira , Deiziele Vieira Higino¹ , Bernat Vinolas Prat² 

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, Brasil.

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil.

Email address

demisson.renato@ufvjm.edu.br (Demisson Renato Ferreira) – Corresponding author.

deiziele.vieira@ufvjm.edu.br (Deiziele Vieira Higino)

bernat.vinolas@ict.ufvjm.edu.br (Bernat Vinolas Prat)

Abstract

This study analyzes the correlation between cement content and flexural strength of high-performance concrete (HPC), based on a systematic review of the international literature. The search was conducted on Google Scholar using the terms ASTM C293 and HPC, yielding 205 studies; 35 articles met the inclusion criteria, totaling 289 mix designs analyzed. The data collected included the percentage of cement, the water/cement ratio, the presence of mineral additions, the use of superplasticizers, and the mechanical strengths at 28 days. Average flexural strengths were calculated in cement content intervals of 3%, in addition to the standard deviation and the linear correlation coefficient (r). The results indicated an approximately linear increase in flexural strength with increasing cement content, with average values ranging from 2.70 MPa to 7.20 MPa. The Pearson correlation coefficient obtained ($r = 0.693$) indicated a moderate association between the variables. For contents above 30%, the behavior became more variable, showing a greater influence of factors such as mineral additions and the water/binder ratio. Additionally, the Mechanical Efficiency Index (MEI) was proposed, which relates flexural strength to cement consumption, enabling evaluation of mix design efficiency. It was found that higher absolute strengths do not necessarily correspond to more efficient mixtures. The results reinforce the importance of optimizing mix designs, considering mechanical performance, and rationalizing cement consumption.

Keywords: Mix design; Mechanical behavior; Binder ratio; Cement consumption; Mechanical efficiency index.

1. Introdução

O concreto é um material amplamente disseminado ao redor do mundo, devido à sua alta flexibilidade, longevidade e resistência (Neville, 1997; Mehta e Monteiro, 2008). Em conjunto com o aço, formando o concreto armado (Isaia et al., 2011; Helene et al., 2007), sua presença é evidente em residências, estradas, pontes, prédios, usinas hidrelétricas e nucleares, obras de saneamento e até em plataformas móveis de extração de petróleo. Essa ampla aplicação destaca as propriedades versáteis e confiáveis do concreto em uma variedade de setores e ambientes (Valin et al., 2014).

Pensando nisso, a partir da década de 70, se iniciaram estudos mais aplicados sobre misturas

especiais, com propriedades superiores aos concretos convencionais (CC), chamados de Concretos de Alta Resistência (CAR ou HSC High Strength Concrete) (Aïtcin, 2000). Para Helene et al. (2007), são considerados concretos de alta resistência os que apresentam resistência à compressão superior a 50 MPa aos 28 dias de idade. Os autores ainda afirmam que, para que o concreto obtenha esses resultados, é necessário que seja compacto e apresente índice reduzido de microfissuração, o que faz com que sejam necessários o uso de aditivos e adições.

Há mais de 30 anos, surge por Mehta e Aïtcin (1990) um novo termo, o concreto de alto desempenho (CAD ou HPC High Performance Concrete). Foram estabelecidos os princípios gerais que regem esse tipo especial de concreto, bem como

as principais características que o diferenciam do até então denominado CAR.

Para Pierre-Claude Aïtcin, autor do livro *High-Performance Concrete* (2000), um concreto de alto desempenho é, essencialmente, um concreto que possua uma relação água/cimento igual ou inferior a 0,40; esse é o valor sugerido como fronteira entre concretos usuais e concreto de alto desempenho. De acordo com Valin, et al., (2014) quando a relação água/cimento ultrapassa esse valor as características quanto ao desempenho desses concretos se tornam bem diferentes.

O Concreto de Alto Desempenho (CAD), é um material entendido como um modelo de utilidade dos concretos tradicionais (Aïtcin, 2000). Para Isaia et al. (2011), o CAD é fruto da pesquisa aplicada e dos resultados da introdução conjunta, no elenco das matérias-primas básicas do concreto, de adições minerais, aditivos químicos, fibras e do uso de técnicas de execução diferenciadas, como a cura a altas temperaturas e pressões. O desenvolvimento destes materiais e técnicas, principalmente a descoberta da extraordinária ação de dispersão dos aditivos superplastificantes, que permitem reduzir a quantidade de água em relação à cota de cimento, é diretamente responsável pelo significativo aumento no desempenho dos concretos (Valin et al., 2014). Entende-se por desempenho não apenas a resistência mecânica, que envolve principalmente a resistência à compressão e à flexão, mas também sua trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e, principalmente, a durabilidade (Isaia et al., 2011; Neville, 1997).

É muito comum confundir o CAD com o CAR, mas nem sempre um CAD é um CAR. Por exemplo, pode-se ter um concreto com relação a/c de 0,40, com o uso de ativos químicos e minerais cuja resistência à compressão seja de apenas 35 MPa. Este concreto, apesar de não ser um CAR, pode ser enquadrado como um CAD, devido a sua alta trabalhabilidade (Isaia et al., 2011).

Para um concreto ser considerado um CAD, existem diversas análises de qualidade no que diz respeito às suas propriedades, são elas: absorção de água; efeitos sobre temperaturas adversas; módulo de elasticidade; porosidade; proporções de preparo; resistência à compressão; resistência à flexão (Isaia et al., 2011).

Os principais fatores que influenciam a resistência de um CAD são (Almeida, 1990; Neville, 1997): as propriedades dos componentes, como cimento, agregados, aditivos químicos e

adições minerais; proporções dos componentes: relação água/cimento e relação agregado/cimento, juntamente com condições de cura e idade (Almeida, 1990; Neville, 1997).

De acordo com Vieira Filho (2007), a resistência mecânica é considerada o principal método para avaliar a qualidade do concreto, destacando-se a avaliação da resistência à compressão, que representa o valor potencial que o concreto pode atingir quando posto a serviço.

Para análises de resistência à compressão, devemos, primeiramente, definir o conceito e a importância desta propriedade mecânica do concreto. A resistência à compressão é a propriedade mecânica que serve de referência para avaliar as outras propriedades, tipo e qualidade do concreto, isso se dá porque que na compressão é onde o concreto suporta maiores cargas de tensão (Vanderlei, 2004). Para Vanderlei (2004), qualquer desempenho que se deseje obter em um concreto, ocorre um reflexo direto na resistência à compressão, por isso pode-se utilizar esta propriedade para classificar o concreto, mesmo sabendo-se que para determinadas situações a resistência à compressão não é a propriedade mais importante.

A resistência do concreto à flexão, por exemplo, é normalmente requisitada em pisos industriais, residuais ou pavimentos rígidos, onde, além da malha de aço, o concreto necessita suportar as cargas a que será submetido (Mariani, 2014). Uma vez que o concreto não possua resistência adequada, poderá fissurar, possibilitando a entrada de agentes agressivos e gerando outras manifestações patológicas subsequentes (Helene et al. 2007).

A resistência à flexão é a propriedade de um material de suportar cargas de tração, ou seja, esforços inversos aos da compressão (Mariani, 2014). O estudo do comportamento à flexão de um material é comumente realizado por meio de ensaios que utilizam corpos de prova prismáticos ou em formato de vigas (Mehta e Monteiro, 2008).

Durante os ensaios à flexão, é possível medir a força máxima atingida na ruptura dos corpos de prova, bem como o deslocamento vertical da seção central do modelo. A partir dessas medidas e considerando os princípios da resistência dos materiais, é possível estimar o momento de ruptura e as tensões nas fibras tracionadas e comprimidas da seção central. A tensão de tração máxima obtida nestes ensaios é denominada módulo de ruptura, e

constitui um parâmetro importante para analisar a resistência à flexão do material (Vanderlei, 2004).

No meio técnico, muito se fala que a resistência à flexão corresponde a 10% da resistência à compressão, porém o consumo de cimento, a relação água/cimento, teor de argamassa, composição granulométrica dos agregados e adição de fibras, alteram significativamente a relação entre a compressão e à flexão (Mariani, 2014).

O consumo de cimento exerce uma influência significativa no desempenho do concreto, pois, ao hidratar-se com a adição de água, ao longo do tempo, forma uma pasta que adere aos agregados. Quanto maior o consumo de cimento, maior será a quantidade de partículas finas na mistura. Isso resulta em uma maior área superficial, promovendo um encaixe mais eficaz entre os componentes e, conseqüentemente, aumentando a resistência do material, desde que a relação água/cimento seja reduzida (Neville, 1997).

Ao diminuir a relação água/cimento, a quantidade de água em relação aos materiais secos também é reduzida. Isso leva a um aumento na quantidade de materiais secos na mistura, o que, por sua vez, contribui para uma maior resistência à compressão e à flexão (Isaia et al., 2011). No entanto, é importante ressaltar que o crescimento da resistência à compressão tende a ser maior do que o da resistência à flexão, resultando em uma diminuição da correlação entre essas duas propriedades (Mehta e Monteiro, 2008).

A relação água/cimento é o fator que interfere diretamente na resistência à compressão, segundo a lei de Duff Abrams (1918). Quanto menor a relação água/cimento, maior será a resistência à compressão do concreto; o inverso também é verdadeiro. Desta maneira, de forma semelhante ao consumo de cimento, a correlação entre resistência à compressão e à flexão é alterada com a relação água/cimento, de modo que, quanto menor a relação a/c, menor a correlação entre as resistências (Mariani, 2014).

O termo correlação significa a relação em ambos os sentidos: descreve a associação entre duas variáveis, sem julgar se uma é causa ou consequência da outra. A mesma é usada quando se deseja estudar quão coerentes são duas variáveis que mudam em conjunto. Quando isso ocorre, as estatísticas indicam uma correlação ou covariação, cuja direção e magnitude podem ser quantificadas. Para dados contínuos com correlação linear, pode-se determinar o coeficiente de correlação "r", cujo valor varia de -1 a +1. O sinal indica somente se as

duas variáveis variam no mesmo sentido (sinal +) ou em sentidos opostos (sinal -) e se $r = 0$, as duas variáveis não variam em conjunto. O coeficiente de correlação mede o "ajuste" da reta aos pontos que a determinaram, isto é, quão próximos se encontram os mesmos pontos à reta traçada, e não tem relação com a inclinação da reta. Um $r = -1$ significa que todos os pontos estão sobre a reta obtida e que a correlação é perfeita e negativa. O mesmo é um número puro usado para classificar a correlação em perfeita, ($= 1$), forte ($> 0,75$), média ($> 0,5$) e fraca ($< 0,5$) e inexistente ($=0$) em função de seu afastamento do zero, nos dois sentidos (positivo e negativo).

O estiramento flexível, também conhecido como teste de flexão, flexo-tração ou teste de três pontos, é um método utilizado para determinar a resistência de um material à flexão. O teste possui normas técnicas específicas que estabelecem procedimentos padronizados para garantir resultados consistentes e precisos. A norma mais comum para testes de flexão é a:

- ASTM C293 – Método de teste padrão para a resistência à flexão do concreto (usando viga simples com carregamento de ponto central) (ASTM, 2002)

O ensaio de flexão de três pontos é uma técnica valiosa para determinar as propriedades de flexão de materiais. Uma força normal é aplicada no meio do corpo de prova, por meio de um dispositivo de teste, fazendo com que ele sofra uma deformação sob a ação da carga conforme na Figura (1) (Vinolas et al., 2023).



Figura 1 – Suporte padronizado posicionado na amostra antes de aplicar força (Vinolas et al, 2023).

A distância entre os apoios (L) é definida conforme a norma ASTM C293; recomenda-se um comprimento de três vezes a altura ($h = L/3$) da amostra como mostra a Figura (2).

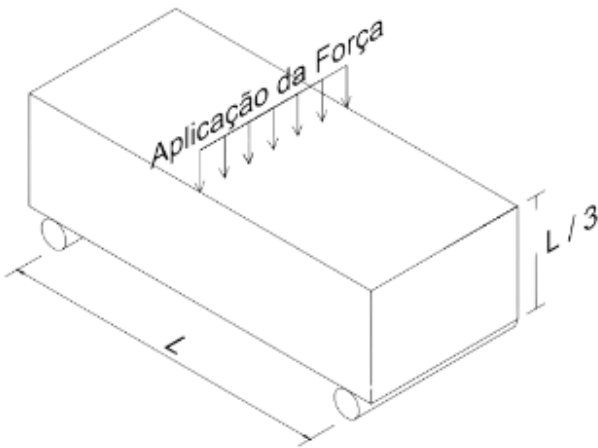


Figura 2 – Modelo de ensaio a flexão conforme a ASTM C293.

Fonte: autoria própria (2026).

De acordo com ASTM C293, a resistência à flexão é obtida através da equação (1):

$$\sigma_f = \frac{3P_f L}{2B(L/3)^2} \quad (1)$$

Onde:

- σ_f é a resistência à flexão (MPa);
- P_f é a carga máxima aplicada indicada pela máquina de ensaio (N);
- L é o comprimento do vão (mm).
- B é a largura do espécime.

Além da análise da resistência mecânica, é importante considerar a eficiência do uso dos materiais constituintes do concreto, especialmente o cimento, que possui elevado custo econômico e impacto ambiental. Nesse contexto, torna-se relevante não apenas avaliar o ganho de resistência associado ao aumento do teor de cimento, mas também verificar se esse incremento ocorre de forma eficiente. Assim, a análise da relação entre desempenho mecânico e consumo de cimento pode fornecer subsídios importantes para a otimização de dosagens, contribuindo para soluções mais sustentáveis e tecnicamente adequadas.

Embora diversos estudos avaliem a resistência mecânica do CAD, poucos trabalhos investigam de forma estatística e comparativa a correlação entre o teor de cimento e a resistência à flexão a partir de diferentes dosagens experimentais disponíveis na literatura. Além disso, observa-se escassez de análises que considerem simultaneamente o desempenho mecânico e a eficiência do consumo de cimento em concretos de alto desempenho.

Nesse contexto, o presente estudo torna-se relevante por contribuir para uma melhor compreensão da influência do teor de cimento sobre a resistência à flexão do concreto de alto desempenho, permitindo identificar tendências de comportamento a partir de diferentes dosagens reportadas na literatura. Além disso, a utilização do Índice de Eficiência Mecânica (IEM) possibilita avaliar não apenas o ganho de resistência, mas também a eficiência do uso do material cimentício, contribuindo para discussões relacionadas à otimização de traços, racionalização do consumo de cimento e desenvolvimento de concretos mais eficientes sob os pontos de vista técnico, econômico e potencialmente ambiental.

O objetivo geral deste trabalho é determinar o comportamento da resistência à flexão do concreto em função da quantidade de cimento empregada.

Os objetivos específicos são: pesquisar na literatura acadêmica diferentes tipos de dosagens de concreto e as características de desempenho do mesmo; calcular qual é a resistência à flexão média e desvio padrão das dosagens de concreto pesquisadas em função da quantidade de cimento; correlacionar as variáveis de resistência a flexão em função da porcentagem de cimento e identificar a dosagem com o maior Índice de Eficiência Mecânica (IEM).

Assim, o estudo busca fornecer subsídios técnicos para a compreensão do comportamento mecânico do CAD sob diferentes níveis de consumo de cimento, auxiliando futuras aplicações e pesquisas relacionadas à dosagem otimizada de concretos de alto desempenho.

2. Metodologia

Em setembro de 2023, foi realizada uma busca na plataforma Google Acadêmico, utilizando as palavras-chave: ASTM C293 (norma americana utilizada em ensaios de flexão) e CAD (concreto de alto desempenho), em língua inglesa, com o intuito de identificar trabalhos científicos em âmbito internacional. O objetivo da busca foi obter trabalhos sobre a avaliação da resistência à flexão por meio do ensaio ASTM C293 em concretos, com foco em concretos de alto desempenho. Com esta busca foi obtido um total de 205 trabalhos. Posteriormente foi feita uma seleção dos mesmos, com os seguintes critérios de inclusão:

- O trabalho se refere a avaliação de no mínimo 1 tipo de concreto e que fosse possível conhecer a dosagem realizada no mesmo;
- Obter os valores de resistência à flexão do concreto por meio do ensaio ASTM C293.

Sendo assim, foi avaliado um total de 35 trabalhos, resultando em 289 dosagens diferentes.

Logo em seguida, foram coletados os dados de interesse e anexados em uma tabela síntese no software Microsoft Excel (2019), onde esses possuíam os seguintes parâmetros, com as suas respectivas unidades de medição:

- Referência;
- Nomenclatura e dosagem;
- Cimento (kg);
- Água (L);
- Superplastificante (kg);
- Agregados finos (kg);
- Agregados graúdos (kg);
- Aglomerantes em substituição ao cimento (kg) e (%) adicionados;
- Resistência à flexão - 28 dias (MPa);
- Resistência à compressão - 28 dias (MPa);
- Observações.

Construiu-se um quadro síntese com todos os artigos dando um total de 35 artigos completos para que pudesse ser feito posteriormente, uma média de resistência à flexão em relação a porcentagem (%) de cimento (em peso). A porcentagem de cimento foi calculada dividindo a quantidade de cimento (kg) pela própria quantidade de cimento (kg) mais o agregado fino e o agregado graúdo, em kg. Foi ainda calculada a relação a/c, dividindo-se a quantidade de água, em litros, pela quantidade de cimento, em kg.

Para o cálculo das médias, foram estabelecidos intervalos de dosagem a cada 3,00% de cimento. Iniciou-se com dosagens entre 9,00 e 12,00%, 12,01 e 15,00%, e, por fim, com o último intervalo de dosagem encontrado na bibliografia, de 65,01 a 68,00%. De posse dos intervalos de dosagem, foi feita uma média aritmética simples entre as resistências de cada intervalo, em que se somaram todas as resistências do intervalo e dividiu-se pela quantidade das mesmas. O próximo passo foi calcular os respectivos desvios-padrão para cada intervalo, utilizando a fórmula de desvio-

padrão do Excel. A partir disso, foi elaborado o gráfico de médias de resistência à flexão em função da porcentagem de cimento, utilizando o mesmo software.

O próximo passo foi a realização de uma análise de correlação entre a porcentagem de cimento utilizada e a resistência à flexão aos 28 dias dos concretos de alto desempenho pesquisados na literatura, utilizando a fórmula de correlação do Excel. Este estudo utiliza a abordagem delineada por Henriques (2011) para a análise de regressão linear e para a determinação do coeficiente de correlação (r). O coeficiente r deverá ser um valor positivo e próximo de 1. Nesse caso, espera-se resultados que indiquem que, quanto maior a quantidade de cimento utilizada, maior será a resistência à flexão obtida. A formulação da reta de regressão é $Y = A + BX$, que proporciona uma estimativa da resistência teórica do concreto de alto desempenho, em MPa (variável dependente Y), em função da porcentagem de cimento (variável independente X).

Os valores de A e de B foram calculados a partir das fórmulas de intercepção e de inclinação, respectivamente, com base nos valores de porcentagem de cimento e de resistência à flexão. Resultando na reta do modelo experimental que será utilizada no gráfico de correlação entre a resistência à flexão e a porcentagem de cimento.

Com o objetivo de complementar a análise da resistência à compressão e avaliar o desempenho dos traços sob a perspectiva da otimização do consumo de cimento, adotou-se o Índice de Eficiência Mecânica (IEM). Esse parâmetro foi definido como a razão entre a resistência à flexão e o consumo de cimento de cada traço.

O IEM foi calculado para todos os traços avaliados, com base nos valores de resistência obtidos em ensaios experimentais publicados na bibliografia. Esse índice permite quantificar o ganho de resistência por unidade de cimento empregado, possibilitando a identificação de misturas com maior eficiência no uso de material cimentício.

A análise comparativa considerou tanto a resistência absoluta quanto o valor do IEM, permitindo avaliar diferenças entre o desempenho mecânico máximo e o desempenho ótimo em termos de consumo de cimento. A Figura (3) a seguir mostra o fluxograma metodológico tanto da seleção quanto análise dos estudos.

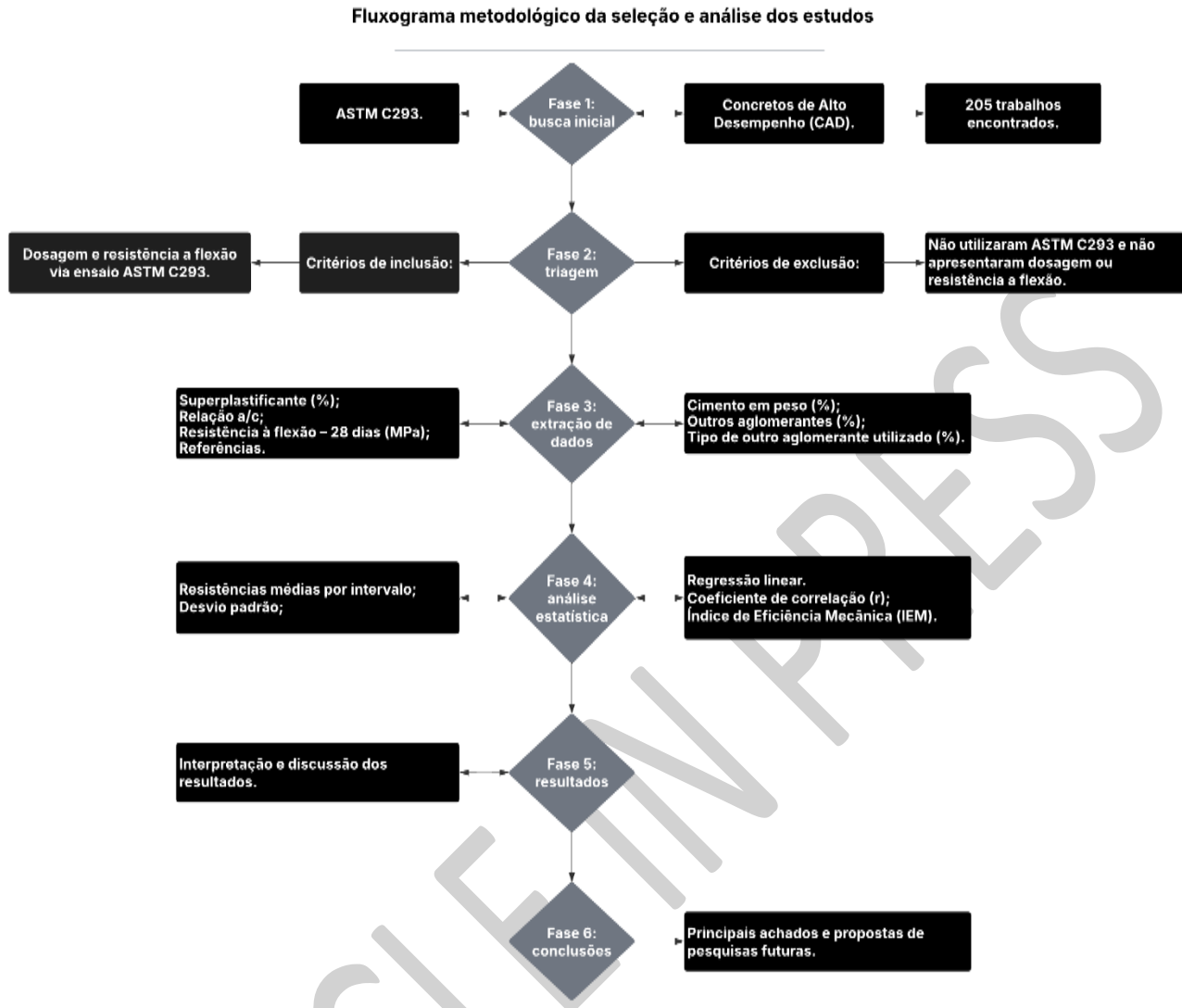


Figura 3 – Fluxograma metodológico.

3. Resultados e discussão

Os resultados da pesquisa bibliográfica sobre o concreto de alto desempenho são mostrados

na Tabela (1), e complementados pelo Anexo (A). Quando o artigo científico não trazia todos os dados necessários para o preenchimento da tabela, foi utilizada a sigla N/C, referindo-se a não consta.

Tabela 1 – Informações referentes a concretos de alto desempenho (CAD) disponibilizados em trabalhos já existentes pesquisados.

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
10,90	0	Não utilizado	2,50	0,55	3,00	(TURSP-2020/84)
13,45	0	Não utilizado	3,00	0,55	4,00	
15,84	0	Não utilizado	3,50	0,50	4,45	
21,60	0	Não utilizado	4,00	0,50	4,98	
21,48	0	Não utilizado	4,50	0,50	5,5	

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências	
11,34	7,50	7,50 refere-se a sílica ativa	2,50	0,55	3,2		
13,61	7,50	7,50 refere-se a sílica ativa	3,00	0,55	5,01		
15,72	7,50	7,50 refere-se a sílica ativa	3,50	0,50	6,6		
17,98	7,50	7,50 refere-se a sílica ativa	4,00	0,50	7,15		
20,04	7,50	7,50 refere-se a sílica ativa	4,50	0,50	7,90		
10,98	6,00	6,00 refere-se a nano argila	2,50	0,55	4,49		
13,59	6,00	6,00 refere-se a nano argila	3,00	0,55	5,45		
16,84	6,00	6,00 refere-se a nano argila	3,50	0,50	7,49		
19,31	6,00	6,00 refere-se a nano argila	4,00	0,50	6,80		
22,47	6,00	6,00 refere-se a nano argila	4,50	0,50	9,00		
10,91	3,00	3,00 refere-se a nano sílica	2,50	0,55	3,90		
13,52	3,00	3,00 refere-se a nano sílica	3,00	0,55	4,47		
16,59	3,00	3,00 refere-se a nano sílica	3,50	0,50	5,90		
19,18	3,00	3,00 refere-se a nano sílica	4,00	0,50	5,30		
22,28	3,00	3,00 refere-se a nano sílica	4,50	0,50	6,15		
31,03	11,11/0	11,11 refere-se a sílica ativa	10,50	0,31	6,00		(Smarzewski, 2020)
31,13	11,11/0,25	11,11 refere-se a sílica ativa e 0,25 a fibra de basalto	10,50	0,31	7,70		
31,23	11,11/0,5	11,11 refere-se a sílica ativa e 0,50 a fibra de basalto	10,50	0,31	8,30		
31,33	11,11/0,75	11,11 refere-se a sílica ativa e 0,75 a fibra de basalto	10,50	0,31	9,70		

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
31,43	11,11/1,0	11,11 refere-se a sílica ativa e 1,00 a fibra de basalto	10,50	0,31	10,10	
31,53	11,11/1,25	11,11 refere-se a sílica ativa e 1,25 a fibra de basalto	10,50	0,31	10,80	
31,63	11,11/1,5	11,11 refere-se a sílica ativa e 1,50 a fibra de basalto	10,50	0,31	12,40	
31,73	11,11/1,75	11,11 refere-se a sílica ativa e 1,75 a fibra de basalto	10,50	0,31	11,50	
31,53	11,11/2,00	11,11 refere-se a sílica ativa e 2,00 a fibra de basalto	10,50	0,31	12,20	
20,14	0	Não utilizado	0,80	0,32	9,11	(Al-Hadithi; Ismail; Alani,2015)
20,29	2,50	2,50 refere-se a agregado PET	0,80	0,32	11,51	
20,44	5,00	5,00 refere-se a agregado PET	0,80	0,32	10,31	
20,59	7,50	7,50 refere-se a agregado PET	0,80	0,32	10,17	
22,40	0	Não utilizado	10,00	0,33	6,76	(Ismail <i>et al.</i> ,2022)
22,40	0,02	0,02 refere-se a nanopartículas de grafeno	10,00	0,33	7,65	
22,40	0,05	0,05 refere-se a nanopartículas de grafeno	10,00	0,33	6,93	
22,40	0,10	0,10 refere-se a nanopartículas de grafeno	10,00	0,33	7,05	
22,40	0,30	0,30 refere-se a nanopartículas de grafeno	10,00	0,33	6,01	
22,40	0,50	0,50 refere-se a nanopartículas de grafeno	10,00	0,33	5,92	
20,41	5,00	5,00 refere-se a zeolito	N/C	0,50	3,10	
20,41	10,00	10,00 refere-se a zeolito	N/C	0,50	4,00	

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
20,41	15,00	15,00 refere-se a zeolito	N/C	0,50	4,90	
20,41	20,00	20,00 refere-se a zeolito	N/C	0,50	4,70	
26,47	10,00/25,00	10,00 refere-se a microssílica e 25,00 a resíduos de vidro em pó	1,67	0,30	15,50	(Orouji; Najaf, 2023)
26,47	10,00/25,00/0,50	10,00 refere-se a microssílica, 25,00 a resíduos de vidro em pó e 0,50 a fibras de polipropileno	1,67	0,30	16,40	
26,47	10,00/25,00/1,00	10,00 refere-se a microssílica, 25,00 a resíduos de vidro em pó e 1,00 a fibras de polipropileno	1,67	0,30	17,30	
26,47	10,00/25,00/1,50	10,00 refere-se a microssílica, 25,00 a resíduos de vidro em pó e 1,50 a fibras de polipropileno	1,67	0,30	18,60	
20,19	4,43	4,73 refere-se a mineral filler	2,50	0,38	3,90	
24,03	3,54	3,54 refere-se a mineral filler	3,12	0,38	4,80	
19,38	5,26/4,66	5,26 refere-se a cinzas volantes e 4,66 a mineral filler	2,50	0,38	3,70	
18,55	11,11/4,92	11,11 refere-se a cinzas volantes e 4,92 a mineral filler	2,50	0,38	3,70	
17,70	17,65/5,21	17,65 refere-se a cinzas volantes e 5,21 a mineral filler	2,50	0,38	3,60	
23,10	5,26/3,73	5,26 refere-se a cinzas volantes e 3,73 a mineral filler	3,12	0,38	4,60	
22,16	11,11/3,93	11,11 refere-se a cinzas volantes e 3,93 a mineral filler	3,12	0,38	4,50	
21,19	17,65/4,16	17,65 refere-se a cinzas volantes e 4,16 a mineral filler	3,12	0,38	4,50	

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
19,87	2,00/4,52	2,00 refere-se a nano sílica e 4,52 a mineral filler	2,50	0,38	5,70	
18,55	10,00/4,92	10,00 refere-se a sílica ativa e 4,92 a mineral filler	2,50	0,38	4,60	
18,21	10,00/2,00/5,03	10,00 refere-se a sílica ativa, 2,00 a nano sílica e 5,03 a mineral filler	2,50	0,38	6,20	
23,66	2,00/3,61	2,00 refere-se a nano sílica e 3,61 a mineral filler	3,12	0,38	6,10	
22,16	10,00/3,93	10,00 refere-se a sílica ativa e 3,93 a mineral filler	3,12	0,38	5,20	
21,77	10,00/2,00/4,02	10,00 refere-se a sílica ativa, 2,00 a nano sílica e 4,02 a mineral filler	3,12	0,38	7,30	
32,21	7,86	7,86 refere-se a sílica ativa	7,00	0,38	7,80	(Ozbakkaloglu ; Gholampour; Xie, 2018)
33,53	7,86	7,86 refere-se a sílica ativa	7,00	0,38	7,70	
34,97	7,86	7,86 refere-se a sílica ativa	7,00	0,38	7,50	
38,28	7,68	7,86 refere-se a sílica ativa	10,00	0,38	6,30	
38,28	7,68	7,86 refere-se a sílica ativa	10,00	0,38	6,20	
21,71	0	Não utilizado	1,30	0,30	7,50	(Owaid,2013)
20,85	5,00	5,00 refere-se a sílica ativa	1,30	0,30	7,75	
19,98	10,00	10,00 refere-se a sílica ativa	1,30	0,30	8,25	
19,08	15,00	15,00 refere-se a sílica ativa	1,30	0,30	8,00	
58,89	43,33	43,33 refere-se a pó de granito	N/C	0,16	26,47	(Savadkoo; Reisi,2020)
56,15	42,46	42,46 refere-se a pó de granito	N/C	0,18	25,54	
53,32	40,66	40,66 refere-se a pó de granito	N/C	0,19	24,53	

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado (%)	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
62,41	36,20	36,20 refere-se a pó de granito	N/C	0,20	27,59	
59,52	34,40	34,40 refere-se a pó de granito	N/C	0,21	32,57	
56,59	32,53	32,53 refere-se a pó de granito	N/C	0,23	29,62	
66,34	28,13	28,13 refere-se a pó de granito	N/C	0,24	20,50	
63,36	26,26	26,26 refere-se a pó de granito	N/C	0,25	20,81	
60,26	24,46	24,46 refere-se a pó de granito	N/C	0,27	21,46	
45,01	71,06	71,06 refere-se a pó de granito	N/C	0,21	22,42	
42,78	69,60	69,60 refere-se a pó de granito	N/C	0,22	21,21	
40,49	68,20	68,20 refere-se a pó de granito	N/C	0,23	20,50	
47,03	64,60	64,40 refere-se a pó de granito	N/C	0,25	21,17	
44,71	63,13	63,13 refere-se a pó de granito	N/C	0,27	22,73	
42,35	61,66	61,66 refere-se a pó de granito	N/C	0,28	21,85	
49,23	58,13	58,13 refere-se a pó de granito	N/C	0,21	29,19	
46,83	56,66	56,66 refere-se a pó de granito	N/C	0,22	21,72	
44,38	55,20	55,20 refere-se a pó de granito	N/C	0,23	21,15	

Na Tabela (1), observa-se que os valores de resistência à flexão do CAD variam com a porcentagem de cimento no concreto. A partir da visualização do quadro, nota-se que quanto menor a relação a/c, maior é a resistência desse concreto à flexão. Geralmente, concretos com relação a/c menores que 0,40 apresentam maior resistência à flexão. Um exemplo disso está no artigo escrito por

Savdkoo e Reisi (2020), no qual a relação a/c varia de 0,16 a 0,28. Para essas relações a/c, os valores de resistência à flexão obtidos pelo autor são de 26,47 e 21,85 MPa, respectivamente. Valores significativos de resistência à flexão. A partir da Figura (4), é possível visualizar os valores médios de resistência à flexão, tanto quanto os seus desvios padrão de acordo com os intervalos de porcentagem de cimento.

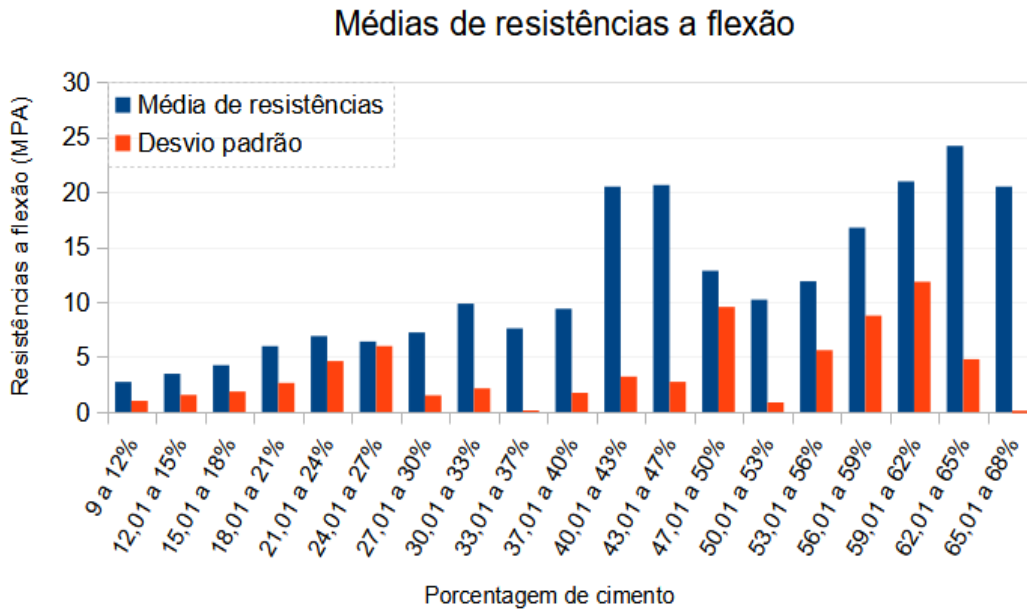


Figura 4 - Gráfico das médias de resistência à flexão em função da porcentagem de cimento.

Pela visualização do gráfico anterior, nota-se um aumento quase linear até 30,00% (trinta por cento) de cimento. Valores de 2,70 MPa em média quando a porcentagem de cimento é de 9,00% a 12,00%, e de 7,20 MPa em média quando a porcentagem de aglomerante é de 27,01% a 30,00%. Observa-se que, entre 21,01% a 24% de cimento, as resistências médias foram ligeiramente superiores às obtidas no intervalo de 24,01% a 27%, comportamento também perceptível na Figura (8). Essa variação indica que, embora o aumento do teor de cimento contribua, em geral, para o ganho de resistência, outros fatores experimentais devem ser analisados, como, 1) o uso ou não de aditivos, ou seja os superplastificantes; 2) quantidade e qualidade de adições, como a sílica ativa, mineral filler, partículas de óxido de ferro, óxido de cerâmica, óxido de alumínio, nano partículas de grafeno, dentre outras; 3) O procedimento para realização da cura do concreto que é um fator que influencia na resistência desse material; 4) Possíveis impurezas na fabricação do concreto; 5) O tipo e granulometria dos agregados finos e graúdos. A partir de 30,00% de aglomerante, o aumento de resistência se torna ainda mais variável, por vezes, o valor aumenta bruscamente e, por vezes, esse valor tem uma queda brusca. Isso se dá pela maior influência das adições, uma vez que, na maioria dos casos, são utilizadas em substituição ao cimento.

Valores de desvio muito altos ocorrem principalmente devido ao tamanho da amostra;

certas dosagens apresentam um maior número de dados coletados da literatura, como, por exemplo, as dosagens de 24,01 a 27,00% de cimento (40 amostras avaliadas em diferentes artigos científicos). Dosagens como essa apresentam discrepâncias nos valores de flexão devido ao modo de preparo dos corpos de prova que cada artigo científico utiliza, resultando em pouca homogeneidade dos resultados e, conseqüentemente, em um desvio padrão elevado.

No gráfico da Figura (5) observam-se os valores da resistência à flexão do CAD em função da porcentagem de cimento. O coeficiente de correlação (r) obtido entre a porcentagem de cimento e a resistência à flexão aos 28 dias é de 0,693, indicando uma correlação moderada entre as variáveis (Filho, 1999). A reta de regressão da resistência à flexão do CAD em função da porcentagem de cimento é a mostrada na equação (2):

$$Y = (-1,12 + 34,54X) \quad (2)$$

Sendo:

Y = Resistência à flexão aos 28 dias do CAD (em MPa)

X = Porcentagem de cimento utilizado (avaliada entre 0,0 % e 70,0%)

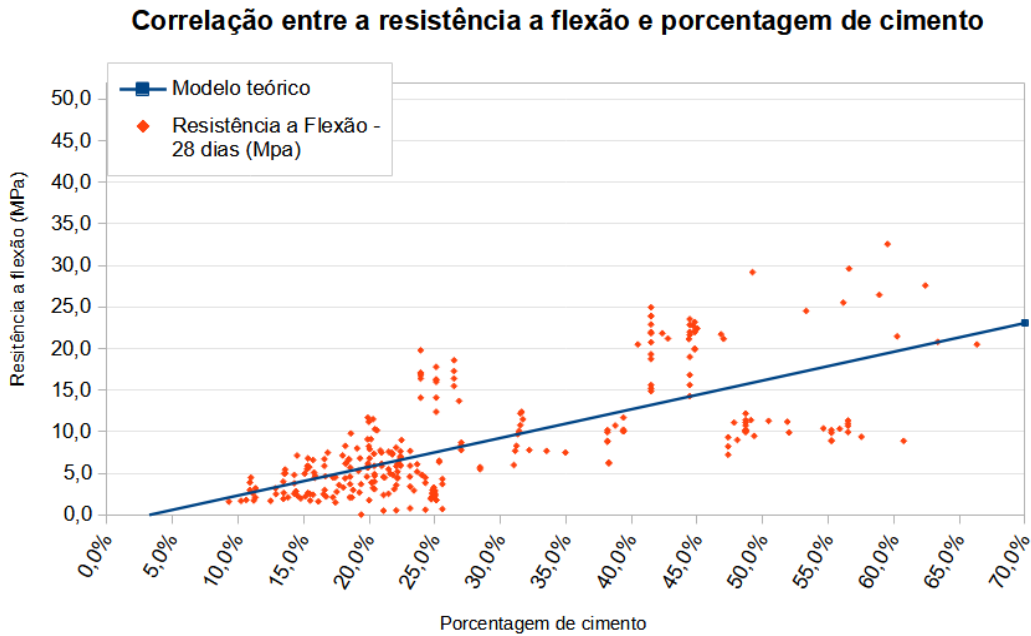


Figura 5 – Gráfico representante da resistência à flexão de acordo com a porcentagem de cimento.

Nota-se que, para a porcentagem de 0,0% de cimento, a reta do modelo apresenta uma estimativa de comportamento, onde, apresenta um valor negativo de (-1,12); contudo, não há resistência à flexão negativa. A reta mostra apenas um modelo teórico dos comportamentos experimentais de resistência, de acordo com a porcentagem de cimento. Neste modelo, caso fossem utilizados concretos com menos de 5,00% de cimento, o valor de resistência à flexão seria menor que 0, o que é impossível. O gráfico ainda mostra que, para porcentagens de cimento baixas de até 12,00%, a resistência à flexão não ultrapassa 5,00 MPa, independentemente da quantidade e do tipo de agregado, da relação a/c, do superplastificante, dos aditivos ou de qualquer procedimento de cura. Quando a porcentagem de cimento cresce até aproximadamente 30,00%, a resistência chega pela equação (3) aproximadamente:

$$(-1,12 + 34,54x^{10,30}) = 9,24\text{MPa} \quad (3)$$

Este dado coincide, de forma bem aproximada, com os cálculos das médias das resistências apresentadas na Figura (7). Para este caso, a média de resistência de concretos com 27,01% a 30,00% de cimento é de 7,29 MPa, e a de 30,01% a 33,00% é de 9,85 MPa. Isso significa que, segundo os cálculos das médias, um concreto com

30,00% de cimento em média teria resistência de 8,57 MPa.

Com base nos resultados de resistência à compressão apresentados na Figura (8) e nos valores detalhados no Quadro 1, realizou-se uma análise comparativa com o objetivo de identificar: (i) o traço com maior resistência absoluta e (ii) o traço com maior eficiência mecânica.

O traço que apresentou a maior resistência à compressão foi o Traço de Savadkoo; Reisi, (2020), atingindo 32,57 MPa aos 28 dias, com relação a/c de 0,21 e porcentagem de cimento de 59,52% em relação à massa total do corpo de prova, evidenciando desempenho mecânico superior quando comparado aos traços dos demais autores. Esse comportamento pode estar associado à redução da relação água/aglomerante e à combinação adequada dos constituintes, promovendo maior densificação da matriz cimentícia e o refinamento da zona de transição interfacial. O consumo elevado de cimento também exerce grande influência no resultado obtido por Savadkoo e Reisi (2020).

Entretanto, a resistência absoluta, isoladamente, não representa o melhor desempenho técnico quando se considera o consumo de cimento. Assim, foi calculado o Índice de Eficiência Mecânica (IEM) para todos os traços, definido como a razão entre a resistência à flexão e o consumo de cimento, conforme a Equação (4).

¹ A letra ‘x’ refere-se à operação de multiplicação.

$$IEM = \frac{\sigma_f}{c} \quad (4)$$

Onde:

- σ_f = Resistência à flexão aos 28 dias do CAD (em MPa)
- C = Porcentagem de cimento utilizado (avaliada entre 0,0 % e 70,0%)

O IEM permite avaliar a eficiência do uso do cimento na obtenção de resistência mecânica, expressando o ganho de resistência por unidade de material cimentício empregado.

A partir dessa análise, verificou-se que o maior valor de IEM foi obtido para o Traço de Orouji; Najaf, (2023), com 26,47% de cimento e resistência de 18,60 MPa, obtendo assim, 70,23 de IEM, indicando maior eficiência na utilização do cimento. Tal resultado foi possível devido à presença de outros aglomerantes, em substituição parcial ao cimento, como 10,00% de microssilica, 25,00% de resíduos de vidro em pó e 1,50% de fibras de polipropileno, além de uma baixa relação a/c.

Observa-se que o traço com maior resistência absoluta não necessariamente corresponde ao traço mais eficiente, uma vez que incrementos no consumo de cimento podem elevar a resistência, mas reduzir a eficiência relativa do sistema.

Esse resultado evidencia a importância da otimização do traço, priorizando não apenas a maximização da resistência, mas também o equilíbrio entre o desempenho mecânico e o consumo de materiais. Para concretos de alto desempenho, tal abordagem é especialmente relevante, considerando aspectos técnicos, econômicos e potenciais impactos ambientais associados ao elevado consumo de cimento.

Este estudo permitiu avaliar a relação entre a resistência à flexão do concreto de alto desempenho e a porcentagem de cimento empregada nas misturas. Os resultados indicaram que, de modo geral, a resistência à flexão aumenta com o aumento do teor de cimento, apresentando tendência aproximadamente linear na faixa de 9,00% a 30,00%, com valores variando de 2,70 MPa a 7,20 MPa.

4. Conclusão

A análise estatística evidenciou um coeficiente de correlação de 0,693, indicando associação significativa entre as variáveis

analisadas. Esse comportamento confirma que o teor de cimento exerce influência relevante sobre o desempenho mecânico à flexão, especialmente em concretos de alto desempenho, nos quais a matriz cimentícia desempenha papel determinante na transferência de tensões.

Observou-se, entretanto, que para teores superiores a 30,00% de cimento, o incremento da resistência não ocorre de forma proporcional, sugerindo que outros parâmetros, como a eficiência do empacotamento granular, a atuação de adições minerais e o controle da relação água/aglomerante, passam a exercer influência mais significativa no comportamento mecânico.

Com a introdução do Índice de Eficiência Mecânica (IEM), foi possível complementar a análise tradicional, baseada apenas na resistência absoluta. O IEM permitiu identificar o traço com maior eficiência no uso do cimento, evidenciando que o traço com maior resistência à flexão não necessariamente corresponde ao mais eficiente em termos de aproveitamento do material cimentício. Esse resultado reforça a importância da otimização das dosagens, visando ao equilíbrio entre desempenho mecânico e racionalização do consumo de cimento.

Os resultados obtidos indicam que a maximização da resistência não deve ser o único critério de avaliação em concretos de alto desempenho, sendo recomendável considerar também parâmetros de eficiência mecânica na definição de traços otimizados.

Além da porcentagem de cimento, observou-se que a relação água/cimento exerceu influência significativa sobre a resistência à flexão dos concretos analisados, principalmente em dosagens com relação a/c inferiores a 0,40, que apresentaram, em geral, maiores resistências mecânicas. Esse comportamento reforça a importância do controle simultâneo da relação água/aglomerante e do consumo de cimento na obtenção de concretos de alto desempenho.

Como perspectivas futuras, recomenda-se aprofundar a análise da influência individual de variáveis como superplastificantes, adições minerais, procedimentos de cura e características granulométricas sobre a resistência à flexão, bem como investigar a correlação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão em diferentes faixas de dosagem.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio contínuo (processo nº 310398 2022-3 e processo nº 23086.043183/2025-17 Bolsista do CNPq - Brasil) às suas atividades de pesquisa. Os autores agradecem à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e, mais especificamente, ao Programa de Pós-Graduação em Saúde, Sociedade e Ambiente (SaSA) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, em Diamantina, Minas Gerais, Brasil.

Referências

- Abbas, A.A.H., Kharun, M. and Chiadighikaobi, P.C., 2022. *The effect of minibars basalt fiber fraction on mechanical properties of high-performance concrete*. Cogent Engineering, 9(1), p.2136603. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2136603>
- Abrams, D.A., 1918. *Design of Concrete Mixtures*. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.
- Aday, L.A., 2018. *Effects of reactivity metakaolin on properties of high strength concrete*. International Journal of Engineering & Technology, 7(4), pp. 2132-2136. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.13584>
- AdNormas. *Os testemunhos de estruturas de concreto*. 2019. Disponível em: Revista AdNormas - Os testemunhos de estruturas de concreto. Acesso em 20 de fevereiro de 2026.
- Afshoon, I., Miri, M. and Mousavi, S.R., 2023. *Evaluating the flexural behavior of green copper slag-contained steel fiber reinforced SCC beams with/without initial notches*. Construction and Building Materials, 395, p. 132316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132316>
- Aghayari, R. and Al-Mwanes, A.O., 2019. *An experimental investigation of mechanical properties of the ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC)*. Journal of Materials Research and Technology, 38(12), pp.153-162.
- Aïtcin, P.C., 2000. *Concreto de alto desempenho - Tradução de Geraldo G. Serra*, São Paulo: PINI.
- Al-Hadithi, A.I. and Alani, M.F.A., 2015. *Mechanical properties of high-performance concrete containing waste plastic as aggregate*. Journal of Engineering, v. 21, n. 8, p. 100-115. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2015.08.07>
- Al-Mwanes, A.O. and Agayari, R., 2021. *Studying the effect of hybrid fibers and silica fumes on mechanical properties of Ultra-High-Performance Concrete*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 012128. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1076/1/012128>
- Almeida, I.R., 1990. *Betões de alta resistência e durabilidade*. Composição e características. Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico da Universidade técnica de Lisboa, Portugal.
- ASTM – American Society for Testing and Materials, 2002. *ASTM C293. Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. West Conshohocken.
- Ayira, O.J.F., 2013. *Investigating the properties of reactive powder concrete (RPC): compressive and flexural strength*. Dissertation (Bachelor of Engineering (Hons) in Civil Engineering). Universiti Teknologi PETRONAS, Tronoh, Perak, Malaysia. Disponível em: <<https://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/13395/1/okot%20john.pdf>> [Acessado 28 fevereiro 2024].
- Bamigboye, G.O., Okara, O., Bassey, D.E., Jolayemi, K.J. and Ajimalofin, D., 2020. *The use of Senilia senilis seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete*. Journal of Building Engineering, 32, p.101811. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101811>
- Fallah, M.A. and Ghasemzadeh M.S.H., 2023. *A Comparative Study of Properties of Ambient-Cured Recycled GGBFS Geopolymer Concrete and Recycled Portland Cement Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(1), p.05022002. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004563](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004563)

- Faraj, R.H., Mohammed, A.A., Omer, K.M. and Ahmed, H.U., 2022. *Soft computing techniques to predict the compressive strength of green self-compacting concrete incorporating recycled plastic aggregates and industrial waste ashes*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(7), pp.2253-2281. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02318-w>
- Filho, U., 1999. *Introdução à Bioestatística Para simples mortais*. 17th ed. Elsevier.
- Gawad, M.A. and Fawzi, N.M., 2021. *Use of thermestone waste aggregates for internal curing of reactive powder concrete*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. p. 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/877/1/012043>
- Helene, P. and Tutikian, B.F., 2005. *Dosagem dos concretos de cimento Portland*. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2, pp. 439-471.
- Helene, P., Andrade, T. and Isaia, G.C., 2007. *Concreto de cimento Portland*. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2, pp. 905-944.
- Hematibahar, M., Vatin, N.I., Abbas, A.A.H., Khalilavi, A. and Kharun, M., 2002. *The prediction of compressive strength and compressive stress-strain of basalt fiber reinforced high-performance concrete using classical programming and logistic map algorithms*. *Materials*, 15(19), p. 6975. <https://doi.org/10.3390/ma15196975>
- Henriques, C., 2011. *Análise de regressão linear simples e múltipla*. Departamento de Matemática. Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Portugal.
- Isaia, G.C., Helene, P. and Tutikian, B.F., 2011. *Concreto de alto e ultra-alto desempenho*. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Cap. 36. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc53.pdf>> [Acessado 28 fevereiro 2024].
- Ismail, F.I., Shafiq, N., Abbas, Y., Bheel, N., Benjeddou, O., Ahmad, M., Sabri, M. Muayad S. and Ateya, E.S., 2022. *Behavioral assessment of graphene nanoplatelets reinforced concrete beams by experimental, statistical, and analytical methods*. *Case Studies in Construction Materials*, 7, p.e01676. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01676>
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Fasihi, H.O. and Jafari, D., 2015. *Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete*. *Construction and Building Materials*, 94, pp.90-104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>
- Jalal, M., Pouladkhan, A.R., Ramezani pour, A.A. and Norouzi, H., 2012. *Effects of silica nano powder and silica fume on rheology and strength of high strength self compacting concrete*. *Journal of American Science*, 8(4), pp. 270-277.
- Katman, H.Y.B., Khai, W.J., Bheel, N., Kirgiz, M.S., Kumar, A., Khatib, J. and Benjeddou, O., 2022. *Workability, strength, modulus of elasticity, and permeability feature of wheat straw ash-incorporated hydraulic cement concrete*. *Buildings*, 12(9), p. 1363. <https://doi.org/10.3390/buildings12091363>
- Loganathan, R. and Mohammed, B.S., 2021. *Properties of rubberized engineered cementitious composites containing nano-silica*. *Materials*, 14(13), p. 3765. <https://doi.org/10.3390/ma14133765>
- Mariani, R.S.I., 2014. *Estudo de Dosagens de Concreto para Aumento da Resistência à Tração na Flexão*. Monografia (Especialização em Patologia das Construções). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- Manigandan, S., Praveenkumar, T.R., Al-Mohaimed, A.M., Brindhadevi, K. and Pugazhendhi, A., 2021. *Characterization of polyurethane coating on high performance concrete reinforced with chemically treated Ananas erectifolius fiber*. *Progress in Organic Coatings*, 150, p. 105977. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105977>
- Mehta, P.K., and Aïtcin, P.C., 1990. *Principles underlying production of high-performance concrete*. *Cement & Concrete Aggregates*, 12(2), pp.70-78. <https://doi.org/10.1520/cca10274j>

- Metha, P.K. and Monteiro, P.J.M., 2008. *Concreto - Microestrutura, propriedades e materiais*, São Paulo.
- Nazari, A. and Riahi, S., 2010. *Embedded ZrO₂ nanoparticles mechanical properties monitoring in cementitious composites*. Journal of American Science, 6(4), pp. 86-89. <https://doi.org/10.1590/s151614392010000400019>
- Nazari, A. and Riahi, S., 2010. *Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO₂ nanoparticles*. Journal of American Science, 6(4), pp. 98-101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.074>
- Nazari, A., Riahi, S., Shamekhi, S.F. and Khademno, A., 2010. *Mechanical properties of cement mortar with Al₂O₃ nanoparticles*. Journal of American Science, 6(4), pp. 94-97.
- Nazari, A., Riahi, S., Shamekhi, S.F. and Khademno, A., 2010. *The effects of incorporation Fe₂O₃ nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete*. Journal of American Science, 6(4), pp. 90-93.
- Neville, A.M., 1997, *Propriedades do concreto*, 2nd ed. Pini, Brasil.
- Orouji, M. and Najaf, E., 2023. *Effect of GFRP rebars and polypropylene fibers on flexural strength in high-performance concrete beams with glass powder and microsilica*. Case Studies in Construction Materials, 18, p. e01769. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01769>
- Owaid, H.M., Hamid, R., Abdullah, S.R.S., Kofli, N.T. and Taha, M.R., 2013. *Physical and mechanical properties of high performance concrete with alum sludge as partial cement replacement*. Jurnal Teknologi, 65(2), pp. 105-112. <https://doi.org/10.11113/jt.v65.2198>
- Owaid, H.M., 2017. *Fresh and Hardened Characteristics of Sustainable Self-Compacting High Performance Concrete Incorporating Silica Fume*. Muthanna Journal of Engineering and Technology (MJET), 5(3), pp. 14-24. <http://doi.org/10.52113/3/eng/mjet/2017-05-03/14-24>
- Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A. and Xie, T., 2018. *Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: effect of recycled aggregate properties and content*. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(2), p. 04017275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002142)
- Sadek, D.M., El-Attar, Mohamed M. and Ali, H.A., 2013. *Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development*. Journal of Cleaner Production, 121, p.19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>
- Savadkoobi, M.S. and Reisi, M., 2020. *Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete*. Journal of Cleaner Production, 266, p. 121973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121973>
- Shah, M.I., AMIN, Muhammad, N., Khan, K., Niazi, M.S.K., Aslam, F., Alyousef, R., Javed, M.F. and Mosavi, A., 2021. *Performance evaluation of soft computing for modeling the strength properties of waste substitute green concrete*. Sustainability, 13(5), p. 2867. <https://doi.org/10.3390/su13052867>
- Shah, M.I., Ali, B., Ahmed, G.H., Tirmazi, S.M.T., El Ouni, M.H. and Hussain, I., 2022. *Effect of recycled steel fibers on the mechanical strength and impact toughness of precast paving blocks*. Case Studies in Construction Materials, 16, p. e01025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01025>
- Smarzewski, P., 2020. *Flexural toughness evaluation of basalt fibre reinforced HPC beams with and without initial notch*. Composite Structures, 235, p. 111769. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111769>
- Sreh, M.M., 2022. *Mix Procedure of Ultra-High Performance Concrete Containing Nano-Silica; Advantages And Challenges To Achieve Required Characteristics*. Journal of Pure & Applied Sciences, 21(4), pp. 69-74. <https://doi.org/10.51984/jopas.v21i4.2128>
- SP Hari, S. and Saranya, M., 2023. *Experimental study of co₂ absorbing concrete*. International Research Journal of Modernization in Engineering

Technology and Science, 5(9). Disponível em: <[https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issu e_9_september_2023/44431/final/fin_irjmets1693653127.pdf](https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issu_e_9_september_2023/44431/final/fin_irjmets1693653127.pdf)> [Acessado 24 fevereiro 2024].

Topçu, İ.B. and Uğurlu, A. 2003. *Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete*. Cement and concrete research, 33(7), pp.1071-1075. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00015-2)

Torres, A., Aguayo, F., Allena, S. and Ellis, M., 2019. *Mechanical properties of ultra high performance fiber reinforced concrete made with foundry sand*. Journal of Civil Engineering and Construction, 8(4), pp. 157-167. <https://doi.org/10.32732/jceec.2019.8.4.157>

TURSP-2020/84 – Taif University Researchers Supporting Project number. *Investigating the mechanical performance of nano additives reinforced highperformance concrete*. Taif University, Taif, Saudi Arabia.

Valin Jr, M.O., Brito, M., Silva, P. and Fleury, L., 2014. *Viabilidade da utilização do concreto de alto desempenho em substituição ao concreto convencional*. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <https://doi.org/10.17012/entac2014.16>

Vanderlei, R.D., 2004. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Vieira F.J.O., 2007. *Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correlação devido aos efeitos do broqueamento*. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

Vinolas, B.P., Casanovas-rubio, M.d.M., Silva, A.C., Roa, J.P.B., Andrade, A.C.L., De Carvalho, F.A., Gonçalves, H.H.A. and Rocha, H.J.A., 2023. *Flexural Strength of High-Performance Soil-Cement: A New, Alternative, Sustainable Construction Material*. Sustainability, 5(21), p.15369. <https://doi.org/10.3390/su152115369>

ANEXO A

Tabela A1 – Informações referentes a concretos de alto desempenho (CAD) disponibilizados em trabalhos já existentes pesquisados. Fonte: autoria própria (2026).

% de cimento em peso	% de outros aglomerantes	Tipo de outro aglomerante utilizado	% de superplastificante	Relação a/c	Resistência à flexão – 28 dias (MPa)	Referências
9,31	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,59	(Topcu; Ugurlu, 2003)
10,23	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,69	
10,63	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,80	
11,33	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,10	
12,49	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,69	

12,89	0	Não utilizado	N/C	N/C	2,50
13,49	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,65
14,42	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,85
15,34	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,65
16,53	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,50
15,47	0	Não utilizado	N/C	N/C	2,55
16,61	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	3,00
18,03	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	3,30
19,26	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,70
21,47	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,55
11,20	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,73
13,46	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,93
14,78	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,98
15,50	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,73
17,42	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	1,50
13,81	0	Não utilizado	N/C	N/C	2,10
14,84	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,30
15,72	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,43
16,72	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,20
18,68	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,10
17,53	0	Não utilizado	N/C	N/C	2,78
18,78	3,00	3,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	3,00

20,29	7,00	7,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	3,23	
21,92	10,00	10,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	3,10	
23,41	15,00	15,00 refere-se a mineral filler	N/C	N/C	2,93	
25,11	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,80	(Nazari <i>et al.</i> ,2010)
25,02	0,50	0,50 refere-se a nano partículas de óxido de ferro	N/C	N/C	2,40	
24,93	1,00	1,00 refere-se a nano partículas de óxido de ferro	N/C	N/C	2,80	
24,83	1,50	1,50 refere-se a nano partículas de óxido de ferro	N/C	N/C	2,50	
24,74	2,00	2,00 refere-se a nano partículas de óxido de ferro	N/C	N/C	1,90	
25,11	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,80	
25,02	0,50	0,50 refere-se a nano partículas de óxido de cerâmica	N/C	N/C	2,90	
24,93	1,00	1,00 refere-se a nano partículas de óxido de cerâmica	N/C	N/C	3,30	
24,83	1,50	1,50 refere-se a nano partículas de óxido de cerâmica	N/C	N/C	3,00	
24,74	2,00	2,00 refere-se a nano partículas de óxido de cerâmica	N/C	N/C	2,10	
25,11	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,80	(Nazari <i>et al.</i> ,2010)
25,02	0,50	0,50 refere-se a nano partículas de óxido de alumínio	N/C	N/C	2,30	
24,93	1,00	1,00 refere-se a nano partículas de óxido de alumínio	N/C	N/C	2,80	
24,83	1,50	1,50 refere-se a nano partículas de óxido de alumínio	N/C	N/C	2,50	

24,74	2,00	2,00 refere-se a nano partículas de óxido de alumínio	N/C	N/C	1,90		
25,11	0	Não utilizado	N/C	N/C	1,80		
25,02	0,50	0,50 refere-se a nano partículas de óxido de titânio	N/C	N/C	2,30		
24,93	1,00	1,00 refere-se a nano partículas de óxido de titânio	N/C	N/C	2,80	(Nazari <i>et al.</i> ,2010)	
24,83	1,50	1,50 refere-se a nano partículas de óxido de titânio	N/C	N/C	2,50		
24,74	2,00	2,00 refere-se a nano partículas de óxido de titânio	N/C	N/C	1,90		
23,13	0	Não utilizado	2,00	N/C	7,70		
22,05	6,00	6,00 refere-se a alúmen de potássio	2,00	N/C	8,10		
21,50	9,58	9,58 refere-se a alúmen de potássio	2,00	N/C	7,60	(Owaid <i>et al.</i> ,2013)	
20,94	13,19	13,19 refere-se a alúmen de potássio	2,00	N/C	7,50		
20,37	17,05	17,05 refere-se a alúmen de potássio	2,00	N/C	7,35		
19,91	0	Não utilizado	N/C	0,40	5,8		
19,91	5,00	5,00 refere-se a poliuretano com fibras de curaua	N/C	0,40	5,9		
19,91	10,00	10,00 refere-se a poliuretano com fibras de curaua	N/C	0,40	6,2	(Manigandan <i>et al.</i> ,2021)	
19,91	15,00	15,00 refere-se a poliuretano com fibras de curaua	N/C	0,40	5,8		
19,91	20,00	20,00 refere-se a poliuretano com fibras de curaua	N/C	0,40	5,7		
25,11	0	Não utilizado	N/C	N/C	12,40		
25,11	0,60	0,60 refere-se a fibra de basalto	N/C	N/C	14,01	(Hematibahar <i>et al.</i> ,2022)	
25,11	0,90	0,90 refere-se a fibra de basalto	N/C	N/C	16,00		

25,11	1,20	1,20 refere-se a fibra de basalto	N/C	N/C	17,80	
25,11	1,50	1,50 refere-se a fibra de basalto	N/C	N/C	16,20	
25,11	1,80	1,80 refere-se a fibra de basalto	N/C	N/C	16,30	
14,29	0	Não utilizado	N/C	0,50	2,55	(Bamigboe et al., 2020)
15,15	11,11	11,11 refere-se a senilia triturada	N/C	0,50	2,24	
16,13	25,00	25,00 refere-se a senilia triturada	N/C	0,50	1,61	
17,24	42,85	42,85 refere-se a senilia triturada	N/C	0,50	2,12	
18,52	66,66	66,66 refere-se a senilia triturada	N/C	0,50	2,11	
20,00	100,00	100,00 refere-se a senilia triturada	N/C	0,50	1,77	
44,44	0	Não utilizado	3,00	0,24	14,28	
44,44	0,40	0,40 refere-se a fibras de polipropileno	3,00	0,24	15,62	
44,44	0,80	0,40 refere-se a fibras de polipropileno	3,00	0,24	16,82	
44,44	1,20	0,40 refere-se a fibras de polipropileno	3,00	0,24	19,01	
44,44	16,00	16,00 refere-se a fibras de aço	3,00	0,24	21,65	
44,44	0,40/16,00	0,40 refere-se a fibras de polipropileno e 16,00 refere-se a fibras de aço	3,00	0,24	22,86	
44,44	0,80/16,00	0,80 refere-se a fibras de polipropileno e 16,00 refere-se a fibras de aço	3,00	0,24	23,54	
44,44	1,20/16,00	1,20 refere-se a fibras de polipropileno e 16,00 refere-se a fibras de aço	3,00	0,24	22,01	
52,02	13,37	13,37 refere-se a fibras de aço	N/C	0,25	9,90	(Torres, 2019)
54,63	13,37	13,37 refere-se a fibras de aço	N/C	0,25	10,40	
57,53	13,37	13,37 refere-se a fibras de aço	N/C	0,25	9,40	
60,75	13,37	13,37 refere-se a fibras de aço	N/C	0,25	8,90	

16,59	0	Não utilizado	0,20	0,50	6,71	(Fallah; Ghasemzadeh, 2023)
20,96	66,66	66,66 refere-se a cimento com agregado reciclado	0,20	0,50	6,15	
28,45	133,00	133,00 refere-se a cimento com agregado reciclado	0,20	0,50	5,75	
20,96	0	Não utilizado	0,20	0,50	5,90	
28,45	0	Não utilizado	0,20	0,50	5,49	
14,51	14,66	14,66 refere-se a zeolito	0,20	0,59	7,14	
18,45	14,66	14,66 refere-se a zeolito	0,20	0,59	6,61	
25,34	14,66	14,66 refere-se a zeolito	0,20	0,59	6,37	
27,53	14,66/66,66	14,66 refere-se a zeolito e 66,66 refere-se a cimento com agregado reciclado	0,20	0,59	6,73	
18,45	14,66/133,00	14,66 refere-se a zeolito e 133,00 refere-se a cimento com agregado reciclado	0,20	0,59	5,52	
20,19	44,25/0,50	44,24 refere-se a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	2,50	0,38	3,90	(Jalal <i>et al.</i> , 2012)
22,16	39,33/0,50	39,33 refere-se a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	2,81	0,38	4,40	
24,03	35,40/0,50	35,40 refere-se a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	3,12	0,38	4,80	
18,55	10,00/49,20/0,60	10,00 refere-se a sílica ativa, 49,20 a mineral filler e 0,60 a um agente modificador de viscosidade	2,50	0,38	5,70	
20,39	10,00/43,70/0,60	10,00 refere-se a sílica ativa, 43,70 a mineral filler e 0,60 a um agente modificador de viscosidade	2,81	0,38	5,90	
22,16	10,00/39,33/0,60	10,00 refere-se a sílica ativa, 39,33 a mineral filler e 0,60 a um agente	3,12	0,38	6,10	

		modificador de viscosidade				
19,83	2,00/45,26/ 0,50	2,00 refere-se a nano sílica, 45,26 a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	2,50	0,38	4,60	
21,81	2,00/40,14/ 0,50	2,00 refere-se a nano sílica, 40,14 a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	2,81	0,38	4,80	
23,66	2,00/36,12/ 0,50	2,00 refere-se a nano sílica, 36,12 a mineral filler e 0,50 a um agente modificador de viscosidade	3,12	0,38	5,20	
18,21	2,00/50,28/ 0,57	2,00 refere-se a nano sílica, 50,28 a mineral filler e 0,57 a um agente modificador de viscosidade	2,50	0,38	6,20	
20,03	2,00/44,70/ 0,57	2,00 refere-se a sílica ativa, 44,70 a mineral filler e 0,57 a um agente modificador de viscosidade	2,81	0,38	6,80	
21,77	2,00/40,28/ 0,57	2,00 refere-se a nano sílica, 40,28 a mineral filler e 0,57 a um agente modificador de viscosidade	3,12	0,38	7,30	
27,03	0	Não utilizado	1,00	0,20	7,80	
27,03	5,00	5,00 refere-se a metacaulim	1,00	0,21	8,40	(Aday, 2018)
27,03	10,00	10,00 refere-se a metacaulim	1,00	0,22	8,70	
44,83	25,27/1,00	25,27 refere-se a sílica ativa e 1,00 a microfibras de aço	1,70	0,21	19,90	
44,83	25,27/0,50/ 1,00	25,27 refere-se a sílica ativa, 0,50 a nano sílica e 1,00 a microfibras de aço	1,72	0,21	20,00	(Sreh, 2022)
44,83	25,27/1,00/ 1,00	25,27 refere-se a sílica ativa, 1,00 a nano sílica e 1,00 a microfibras de aço	1,74	0,21	21,97	

44,83	25,27/1,50/ 1,00	25,27 refere-se a sílica ativa, 1,50 a nano sílica e 1,00 a microfibras de aço	1,77	0,21	22,10	
44,83	25,27/2,00/ 1,00	25,27 refere-se a sílica ativa, 2,00 a nano sílica e 1,00 a microfibras de aço	1,80	0,21	23,2	
55,25	1,00	1,00 refere-se a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,15	8,95	
38,77	100,00/1,00/1, 00	100,00 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,30	10,75	
38,17	100,00/2,00	100,00 refere-se a cinza volante, e 2,00 a nano sílica	N/C	0,30	8,80	
49,36	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	9,50	
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	10,75	
55,25	2,00/2,00	2,00 refere-se a fibras de álcool polivinílico e 2,00 a nano sílica	N/C	0,15	10,20	
55,87	1,00/1,00	1,00 refere-se a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,15	10,35	
38,17	100,00/2,00/2, 00	100,00 refere-se a cinza volante, 2,00 a fibras de álcool polivinílico e 2,00 a nano sílica	N/C	0,30	9,95	
39,39	100,00	100,00 refere-se a cinza volante	N/C	0,30	10,25	
48,08	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	9,01	
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	10,10	
38,17	100,00	100,00 refere-se a cinza volante	N/C	0,30	8,89	
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de	N/C	0,20	10,05	

(Loganathan; Mohammed, 2021)

		álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica			
55,25	2,00	2,00 refere-se a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,15	9,87
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	10,15
39,39	100,00/2,00	100,00 refere-se a cinza volante e 2,00 a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,30	11,71
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	10,25
48,71	33,33/1,00	33,33 refere-se a cinza volante e 1,00 a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,20	9,95
39,39	100,00/2,00/2, 00	100,00 refere-se a cinza volante, 2,00 a fibras de álcool polivinílico e 2,00 a nano sílica	N/C	0,30	10,05
48,71	33,33/1,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	10,25
38,17	100,00/2,00	100,00 refere-se a cinza volante e 2,00 a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,30	10,20
48,71	33,33/2,00/ 1,00	33,33 refere-se a cinza volante, 2,00 a fibras de álcool polivinílico e 1,00 a nano sílica	N/C	0,20	12,20
48,71	33,33/1,00/ 2,00	33,33 refere-se a cinza volante, 1,00 a fibras de álcool polivinílico e 2,00 a nano sílica	N/C	0,20	11,40
56,51	0	Não utilizado	N/C	0,15	9,95
39,39	100,00/2,00	100,00 refere-se a cinza volante e 2,00 a nano sílica	N/C	0,30	10,05
56,51	2,00	2,00 refere-se a nano sílica	N/C	0,15	10,70
55,25	2,00	2,00 refere-se a nano sílica	N/C	0,15	8,90

56,51	2,00/2,00	2,00 refere-se a fibras de álcool e 2,00 a nano sílica	N/C	0,15	11,35	
48,71	33,33/1,00	100,00 refere-se a cinza volante e 2,00 a nano sílica	N/C	0,20	11,10	
56,51	2,00	2,00 refere-se a fibras de álcool polivinílico	N/C	0,15	10,99	
19,40	0	Não utilizado	3,08	0,49	0,03	
21,10	20,00/0,10	20,00 refere-se à escória de cobre e 0,10 a fibras de aço	3,08	0,49	0,51	
22,06	30,00/0,10	30,00 refere-se à escória de cobre e 0,10 a fibras de aço	3,08	0,49	0,55	
23,12	40,00/0,10	40,00 refere-se à escória de cobre e 0,10 a fibras de aço	3,08	0,49	0,79	
24,29	50,00/0,10	50,00 refere-se à escória de cobre e 0,10 a fibras de aço	3,08	0,49	0,62	
25,58	60,00/0,10	60,00 refere-se à escória de cobre e 0,10 a fibras de aço	3,08	0,49	0,70	
21,10	20,00/0,30	20,00 refere-se à escória de cobre e 0,30 a fibras de aço	3,08	0,49	2,39	(Afshoon; Miri; Mousavi, 2023)
22,06	30,00/0,30	30,00 refere-se à escória de cobre e 0,30 a fibras de aço	3,08	0,49	3,58	
23,12	40,00/0,30	40,00 refere-se à escória de cobre e 0,30 a fibras de aço	3,08	0,49	3,42	
24,29	50,00/0,30	50,00 refere-se à escória de cobre e 0,30 a fibras de aço	3,08	0,49	3,86	
25,58	60,00/0,30	60,00 refere-se à escória de cobre e 0,30 a fibras de aço	3,08	0,49	3,70	
21,10	20,00/0,50	20,00 refere-se à escória de cobre e 0,50 a fibras de aço	3,08	0,49	4,57	
22,06	30,00/0,50	30,00 refere-se à escória de cobre e 0,50 a fibras de aço	3,08	0,49	5,86	

23,12	40,00/0,50	40,00 refere-se à escória de cobre e 0,50 a fibras de aço	3,08	0,49	5,91	
24,29	50,00/0,50	50,00 refere-se à escória de cobre e 0,50 a fibras de aço	3,08	0,49	4,48	
25,58	60,00/0,50	60,00 refere-se à escória de cobre e 0,50 a fibras de aço	3,08	0,49	4,31	
41,49	20,00	20,00 refere-se a sílica ativa	27,00	0,24	14,88	(Al-Mwanes; Agayari, 2021)
41,49	25,00	25,00 refere-se a sílica ativa	27,00	0,24	15,62	
41,49	30,00	30,00 refere-se a sílica ativa	27,00	0,24	15,22	
41,49	20,00/0,40	20,00 refere-se a sílica ativa e 0,40 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	18,75	
41,49	25,00/0,40	25,00 refere-se a sílica ativa e 0,40 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	20,76	
41,49	30,00/0,40	30,00 refere-se a sílica ativa e 0,40 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	19,32	
41,49	20,00/0,80	20,00 refere-se a sílica ativa e 0,80 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	21,85	
41,49	25,00/0,80	25,00 refere-se a sílica ativa e 0,80 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	23,89	
41,49	30,00/0,80	30,00 refere-se a sílica ativa e 0,80 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	22,00	
41,49	20,00/1,20	20,00 refere-se a sílica ativa e 1,20 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	22,91	
41,49	25,00/1,20	25,00 refere-se a sílica ativa e 1,20 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	24,97	
41,49	30,00/1,20	30,00 refere-se a sílica ativa e 1,20 a fibras de polipropileno	27,00	0,24	23,93	
17,25	0	Não utilizado	N/C	0,50	4,50	
15,80	10,00	10,00 refere-se a cinzas do bagaço da cana de açúcar	N/C	0,55	5,10	

14,29	22,22	22,22 refere-se a cinzas do bagaço da cana de açúcar	N/C	0,65	3,80	
12,86	43,36	43,36 refere-se a cinzas do bagaço da cana de açúcar	N/C	0,71	3,20	
11,12	56,48	56,48 refere-se a cinzas do bagaço da cana de açúcar	N/C	0,83	2,60	
47,83	25,00	25,00 refere-se a sílica ativa	16,50	0,22	11,10	(Gawad; Fawzi, 2021)
49,11	25,00/2,38	25,00 refere-se a sílica ativa e 2,38 a thermostone	16,50	0,22	11,40	
50,46	25,00/4,75	25,00 refere-se a sílica ativa e 4,75 a thermostone	16,50	0,22	11,30	
51,89	25,00/7,14	25,00 refere-se a sílica ativa e 7,14 a thermostone	16,50	0,22	11,20	
47,37	23,98	23,98 refere-se a sílica ativa	19,13	0,30	8,23	(Ayira; John,2013)
47,37	23,98	23,98 refere-se a sílica ativa	19,13	0,30	7,24	
47,37	23,98	23,98 refere-se a sílica ativa	19,13	0,30	9,34	
18,18	0	Não utilizado	7,95	0,45	8,30	(Sadek; El-Attar; Ali,2016)
26,86	0	Não utilizado	7,95	0,30	13,70	
18,60	10,00	10,00 refere-se a sílica ativa	7,95	0,45	9,80	
19,88	50,00	50,00 refere-se a pó de mármore	7,95	0,45	9,10	
19,98	50,00	50,00 refere-se a pó de granito	7,95	0,45	11,20	
19,90	50,00	50,00 refere-se a mistura pó de mármore e pó de granito	7,95	0,45	11,70	
23,92	25,00/0	25,00 refere-se a microsílica	12,50	0,38	14,10	(Abbas; Kharun; Chiadighikaobi, 2022)
23,92	25,00/0,60	25,00 refere-se a microsílica e 0,60 a fibra de basalto	12,50	0,38	16,80	

23,92	25,00/0,90	25,00 refere-se a microssilica e 0,60 a fibra de basalto	12,50	0,38	19,80	
23,92	25,00/1,20	25,00 refere-se a microssilica e 0,60 a fibra de basalto	12,50	0,38	17,10	
23,92	25,00/1,50	25,00 refere-se a microssilica e 0,60 a fibra de basalto	12,50	0,38	16,04	
23,92	25,00/1,80	25,00 refere-se a microssilica e 0,60 a fibra de basalto	12,50	0,38	17,05	
14,29	0	Não utilizado	N/C	0,33	4,80	(Shah et al.,2022)
15,27	0,10	0,10 refere-se a fibras de aço	N/C	0,30	5,50	
15,29	0,25	0,25 refere-se a fibras de aço	N/C	0,30	5,90	
15,33	0,50	0,50 refere-se a fibras de aço	N/C	0,30	6,80	
15,39	0,75	0,75 refere-se a fibras de aço	N/C	0,30	5,80	
15,43	1,00	1,00 refere-se a fibras de aço	N/C	0,30	5,75	
18,17	0	Não utilizado	0,50	0,50	4,40	(Katman et al., 2022)
17,42	5,00	5,00 refere-se a cinzas de palha de trigo	0,50	0,53	4,52	
16,65	10,00	5,00 refere-se a cinzas de palha de trigo	0,50	0,56	4,65	
15,88	15,00	5,00 refere-se a cinzas de palha de trigo	0,50	0,59	4,70	
15,08	20,00	5,00 refere-se a cinzas de palha de trigo	0,50	0,63	4,95	