



## INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NO DESEMPENHO DO CONCRETO

### *INFLUENCE OF MINERAL ADDITIONS ON CONCRETE PERFORMANCE*

*Alessandro Gouveia Nunes<sup>1</sup>*

*Jean Carlos Silva Martins<sup>2</sup>*

*Jefferson Lucas Santos Do Nascimento<sup>3</sup>*

*Luana Leal Fernandes Araújo<sup>4</sup>*

### RESUMO

A construção civil é um dos setores mais importantes da economia brasileira, e que mais vem se expandindo ultimamente, o que tem aumentado a cada dia a demanda por concreto. Entretanto, a produção desse composto por sua vez é um dos grandes causadores de danos ambientais e emissões de dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>). Diante desse contexto, tem-se buscado alternativas de aproveitamento de outros materiais para sua produção, as adições minerais tem sido incorporadas na mistura do concreto com o intuito de melhorar as características de resistência mecânica, reduzir a utilização do cimento, permeabilidade, quantidade de água, melhorar sua trabalhabilidade e tornar a produção de concreto mais sustentável. O estudo tem como objetivo analisar a influência das adições minerais no desempenho e durabilidade do concreto. O presente estudo trata-se de uma revisão de literatura do tipo exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, realizada mediante a busca de artigos científicos. Os ensaios laboratoriais realizados a partir da incorporação de adições minerais de escória, sílica ativa e metacaulim realizadas em substituição de percentuais específicos para cada adição, em massa, mostraram a capacidade das adições em aumentar a resistência à compressão e diminuição da absorção capilar. Outro estudo mostrou que dependendo de alguns fatores determinantes o uso de adições minerais também é capaz de promover resistência á corrosão das armaduras. Estudos também demonstram que as adições minerais são alternativas sustentáveis a produção de concreto. As adições minerais de escória, metacaulim e sílica ativa tem se mostrado excelentes alternativas de incorporações aos concretos, haja vista, os resultados positivos dos ensaios laboratoriais, que demonstram sua eficácia e sua capacidade de promover o aumento da resistência nos concretos e diminuir a absorção capilar.

**Palavras-chave:** Concreto; Sílica Ativa; Metacaulim; Escória; Melhoria no Desempenho.

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Faculdade Estácio de João Pessoa. E-mail: alessandro.nunes2021@gmail.com

<sup>2</sup> Graduando do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Faculdade Estácio de João Pessoa. E-mail: jeann-carlos19@outlook.com

<sup>3</sup> Graduando do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Faculdade Estácio de João Pessoa. E-mail: jeffersonlucas.eng@gmail.com

<sup>4</sup> Professora Orientadora Específica de TCC do Curso de Engenharia Civil da Faculdade Estácio de João Pessoa. E-mail: luana.leal@estacio.br

## ABSTRACT

Civil construction is one of the most important sectors of the Brazilian economy, and one that has been expanding the most lately, which has increased every day the demand for concrete, however, the production this composite, in turn, is a major cause of environmental damage and carbon dioxide (CO<sup>2</sup>) emissions. In this context, alternatives have been sought for the use of other materials for its production, mineral additions have been incorporated into the concrete mixture in order to improve the characteristics of mechanical resistance, reduce the use of cement, permeability, amount of water, improve its workability and make the production of concrete more sustainable. This study aimed to describe the influence of mineral additions on the performance and durability of concrete. The present study is an exploratory and descriptive literature review, with a qualitative approach, carried out through the search for scientific articles. The laboratory tests carried out from the incorporation of mineral additions of slag, silica fume and metakaolin carried out in substitution of specific percentages for each addition, in mass, showed the capacity of the additions to increase compressive strength and decrease capillary absorption. Another study showed that, depending on some determining factors, the use of mineral additions is also capable of promoting corrosion resistance in reinforcement. Studies also demonstrate that mineral additions are sustainable alternatives to concrete production. Mineral additions of slag, metakaolin and silica fume have been shown to be excellent alternatives for incorporation into concrete, given the positive results of laboratory tests, which demonstrate their effectiveness and their ability to promote increased strength in concrete and reduce capillary absorption.

**Keywords:** Concrete; Silica Fume; Metakaolin; Slag; Performance Improvement.

## INTRODUÇÃO

Com elevado índice de crescimento, a construção civil é um dos setores mais importantes da economia brasileira. A busca pela melhor qualidade de vida tem contribuído para este desenvolvimento. Dessa forma, tem-se aumentado a demanda por concreto. A produção deste compósito é um dos grandes causadores de danos ambientais e emissões de dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>). O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento, conter pozolanas, adições minerais, agregados (gráudos, miúdos e reciclados), água, polímeros, fibras e aditivos (NEVILLE, 2013).

Diante dessa situação, tem-se buscado alternativas de aproveitamento de outros materiais para a produção do concreto. A incorporação de adições minerais na mistura do concreto tem por finalidade melhorar as características de resistência mecânica, reduzir a

utilização do cimento, permeabilidade, quantidade de água e melhorar sua trabalhabilidade (LIDUÁRIO, *et. al.*, 2000).

Mehta e Monteiro (1994) definem as adições minerais como materiais siliciosos ou sílico aluminosos, finamente moídos, que podem ser adicionados ao concreto com a finalidade de melhorar suas propriedades. Segundo Neville (2013) os materiais que são adicionados ao concreto que contribuem em sua resistência física ou química, são classificados como materiais cimentícios.

As adições são estudadas atualmente como podem ser observadas nas pesquisas de Ribeiro (2021) e Medeiros (2017), onde Ribeiro (2021) analisou a influência da substituição parcial do cimento Portland por adições minerais em relação a sua massa obteve resultados de ganho de resistência mecânica e Medeiros (2017) obteve em seus resultados ganhos de até 15% de resistência à compressão em concretos com a utilização de sílica ativa em substituição parcial de 10% à massa do cimento, porém, quando analisou os resultados referentes à carbonatação, chegou à conclusão de que o mesmo se torna mais susceptível ao avanço da carbonatação.

As características e propriedades para um bom concreto devem ser satisfatórias em seu estado endurecido e fresco. Conforme Neville (2016), o concreto em seu estado fresco deve apresentar características de trabalhabilidade necessária para que possa ser transportado, lançado, adensado e acabado facilmente sem segregação. Para a determinação da consistência do concreto é realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test) seguindo os critérios da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 16889:2020.

Para o concreto endurecido as características mais importantes a serem analisadas são a resistência e sua durabilidade. Parizotto (2017) define que a resistência à compressão é a propriedade mecânica mais importante do concreto. Para que essa propriedade seja determinada são moldados corpos de prova cilíndricos para ensaio, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 e seu ensaio é realizado conforme é orientado pela ABNT NBR 5739:2018.

A durabilidade é outra característica essencial para o concreto em seu estado endurecido. De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 a durabilidade consiste na capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais durante a sua construção e vida útil. Bauer (2018) cita que a durabilidade dos elementos construtivos de concreto é condicionada pelo eventual ataque de agentes agressivos a que estejam sujeitas durante a sua vida em serviço.

Esses ataques ocorrem no interior do elemento de concreto, o agente agressivo deve ser capaz de penetrar no concreto e o mesmo deve ser permeável (NEVILLE, 2013).

O concreto é um material obrigatoriamente permeável, no entanto, os vazios presentes nas estruturas são de diversas origens, excesso de água para a obtenção da trabalhabilidade e má dosagem. A essas causas inerentes podem ser somadas as fissuras que ocorrerem por diversas origens, térmicas e mecânicas (BAUER, 2018). Após o processo de hidratação a estrutura de concreto ficará exposta a intempéries e mecanismos de absorção capilar. Diante disso, estudos buscam soluções para reduzir a permeabilidade do concreto.

O artigo aqui disposto tem como objetivo geral analisar a influência das adições minerais no desempenho e durabilidade do concreto. Como objetivos específicos: Buscar estudos na literatura que relatem sobre a resistência à compressão e capilaridade em corpos de prova; Mostrar experiências realizadas por pesquisadores utilizando sílica ativa, metacaulim e escória como elementos de adição mineral.

A construção civil é uma das áreas que mais vem crescendo ultimamente. Dessa forma aumentando a demanda por concreto, no entanto, a produção deste compósito é um dos grandes causadores de danos ambientais e emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), principalmente devido à extração do cimento Portland. Nesse contexto, há a necessidade de torná-lo mais sustentável. O uso de algumas adições em substituição parcial à massa do cimento possibilita uma redução em sua utilização, sem afetar suas características de resistência final. Assim, o estudo justifica-se ao buscar o desempenho do concreto substituindo o cimento Portland por adições minerais.

## **CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE CONCRETO**

Parizotto (2017) diz que o concreto é um material formado/produzido com diversos tipos de cimento e conter pozolanas, adições minerais, polímeros, fibras e aditivos, de modo/com a finalidade a atender a diferentes propósitos e especificações. Segundo a ABNT NBR 12655:2015, o concreto pode ser classificado em três tipos: Concreto leve (CL): concreto endurecido que apresenta massa específica entre  $800 \text{ kg/m}^3$  a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ; Concreto normal (C): concreto endurecido que apresenta massa específica entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  a  $2800$

kg/m<sup>3</sup>; e Concreto pesado ou denso (CD): concreto endurecido que apresenta massa específica superior as 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Segundo Neville (2013), concreto leve é constituído por agregados com baixa massa específica e pela introdução de vazios de grandes dimensões com o auxílio de aditivos incorporadores de ar. O concreto de baixa massa específica apresenta redução em sua resistência quando comparado ao concreto normal, sobretudo, apresenta vantagens como é evidenciado por Neville (2016), tais como, um melhor isolamento térmico, em termos de elementos estruturais com menor seção transversal e havendo a possibilidade de construções em locais onde o solo apresenta baixa capacidade de resistência.

Com relação ao concreto normal de acordo com a ABNT NBR 8953:2015, são concretos para fins estruturais, considerados de massa específica normal apresentando densidade entre 2.000 Kg/m<sup>3</sup> e 2.800 Kg/m<sup>3</sup>. No entanto, em termos de capacidade estrutural os concretos com densidade normal são os mais utilizados devidos apresentarem propriedades de resistências e melhor módulo de elasticidade que o concreto leve, sendo utilizados em obras civis, industriais e em peças pré-moldadas.

O concreto pesado tem como característica principal a sua alta densidade, obtidas com agregados especiais, como a hematita, a magnetita e a barita. Fazendo com que essa mistura ganhe maior resistência mecânica, durabilidade e proteção contra radiação, muito utilizada em contra peso de estruturas pesadas. (ABNT NBR 8953).

### **Resistência à Compressão no Concreto**

Concebida a importância do concreto, diretamente ligada à segurança e à estabilidade estrutural, é imprescindível o controle que ateste a sua qualidade em relação à dosagem e a seus insumos.

Para determinar a resistência do concreto, é mais comum realizar um ensaio de compressão uniaxial, seguindo as orientações da ABNT NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Onde o corpo de prova é submetido a um carregamento que aumenta progressivamente até a ruptura da amostra. O valor da força exercida no momento da ruptura indica a resistência máxima que o concreto suporta.

Segundo a mesma norma, o ensaio de compressão pode ser realizado em máquinas hidráulicas ou eletromecânicas, conectados a um computador para análise dos resultados e parâmetros. Sendo importante a ponderação para as variáveis que influenciam no ensaio,

como temperatura, anisotropia do material, tamanho do grão, impurezas, inclusões e etc. Normalmente, a velocidade de ensaio ou deslocamento é da ordem de 0,005 mm/min.

Também é essencial centralizar perfeitamente o eixo e o eixo da tabela que aplica o esforço, além de garantir que as restrições atuem apenas axialmente, as tabelas devem ser perfeitamente paralelas.

A mesa da máquina apoia a peça e distribui a força aplicada. Neste processo é importante a lubrificação da mesa para evitar ao máximo a fricção e atrito na face do corpo de prova. Finalmente, ao traçar a carga aplicada, o diagrama tensão-deformação, a variação de altura das mesas, a deformação do corpo deve ser monitorada continuamente ao decorrer do ensaio.

### **Capilaridade no Concreto**

No concreto, essa propriedade física ocorre na interação dos fluidos junto aos substratos. Durante a hidratação da pasta do cimento, dentro dele é instituída uma estrutura composta por diversos poros, que acabam sendo os responsáveis pelo transporte de fluidos e outras substâncias prejudiciais para a parte interna do substrato. Os poros capilares são gerados pelo espaço não ocupado pelos produtos de hidratação (SANTANA B *et. al.*, 2017).

A capilaridade ascensional é trivialmente ocasionada pela umidade presente no solo ou por intempéries em fachada. Essa propriedade física ocorre quando existe o contato da água com o substrato de concreto. Em nível molecular, essa interação gera uma diferença de pressão entre os fluidos, fazendo com que a água seja absorvida pelos poros. O volume de água que será absorvida é concedido pela amplitude do poro, e também pelas propriedades físico-químicas dos materiais e substratos envolvidos (ABNT NBR 9779).

### **METODOLOGIA**

Metodologicamente o estudo se caracteriza como exploratório e descritivo, com abordagem qualitativa, sendo uma revisão de literatura.

Uma revisão de literatura se especifica por uma etapa do trabalho acadêmico no qual se reúne as referências que irá fornecer embasamento teórico para executar o projeto de pesquisa.

A produção deste artigo científico baseou-se no método de procedimentos interpretativos e analíticos para compreender e verificar o tema central da pesquisa. Este é um tema que tem sido analisado por diferentes autores.

Um estudo exploratório é um levantamento bibliográfico que busca avaliar o estado da arte do tema. A pesquisa foi elaborada a partir do levantamento bibliográfico de artigos publicados em periódicos das bases de busca selecionadas (SILVA; MENEZES, 2005; KAUARK *et. al.*, 2010).

Quanto à abordagem qualitativa, preocupa-se em tratar da temática de forma estruturada, compreendendo de forma aprofundada o objeto da pesquisa e suas especificidades, preocupando-se com a qualidade do conteúdo apurado e seus aspectos subjetivos (GOLDEMBERG 1997).

O escopo da revisão da literatura inclui artigos publicados em periódicos e revistas, trabalhos de conclusão de curso, que tratam sobre as influências das adições minerais no concreto. Esta pesquisa segue o rigor ético quando referencia todos os autores citados em conformidade com o que preconiza a Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP). Desta forma, o artigo não necessitou de submissão a um Comitê de Ética, por não se tratar de pesquisas com seres humanos, e nem que utilize bancos de dados que requeiram autorização prévia.

As pesquisas bibliográficas facultam a identificação do estado da arte existente e possíveis lacunas, além de identificar oportunidades para novas contribuições no tema em estudo (MEREDITH, 1993; VILLAS; SOARES; RUSSO, 2008), e apontar perspectivas para pesquisas futuras (NORONHA; FERREIRA, 2000).

A análise dos resultados foi construída a partir da seleção de trabalhos que trataram do mesmo tema para que houvesse consistência e subsídios no desenvolvimento da discussão para que fosse atingido o objetivo do estudo. Assim foi utilizada como metodologia de apresentação destes resultados a descrição de como a sílica, o metacaulim e a escória se comportam como adições minerais no desempenho do concreto. Em seguida foi dado enfoque na resistência à compressão e absorção capilar a partir de pesquisas realizadas.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **A UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS**

As adições definidas como minerais são materiais siliciosos finamente moídos, que na maioria das vezes são adicionados ao concreto em proporções variáveis, de 6% a 70% da massa total dos materiais cimentícios. Além disso, as adições podem promover a substituição parcial do cimento Portland. As mesmas podem ser obtidas de fontes naturais ou de alguns subprodutos de atividades industriais (LISBOA *et al.*, 2017).

De acordo com a ABNT NBR 12653:2015 os materiais siliciosos ou silicoaluminosos têm pouca ou nenhuma adesão por si própria, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando um composto adesivo.

Segundo a mesma norma, os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , resultante da hidratação do cimento Portland, produzindo o sulfato de cálcio (C-S-H) adicional. Sua adição aos concretos, argamassas e pastas, em relação a uma referência, sem uso desses materiais e em condições iguais, contribuem para o ganho da resistência à compressão e à flexão, a idades avançadas de uma diminuição nas primeiras idades; redução da porosidade e permeabilidade; aumento da resistência a sulfatos.

De acordo com Lisboa *et al.* (2017), as adições minerais podem ser divididas em materiais naturais e subprodutos. Os materiais naturais são derivados de rochas e minerais vulcânicos, estes são processados para produzir unicamente pozolanas, encontrando dessa forma uma dificuldade para a classificação de pozolanas naturais devido aos materiais raramente apresentar apenas um único constituinte reativo. E os subprodutos são alguns resíduos industriais, que podem ou não requerer processamento para serem utilizados como adição ao concreto como, por exemplo, a sílica ativa, escória granulada de metais industriais, entre outros produtos.

### **Escória de alto-forno**

A escória de alto-forno é um resíduo gerado no processo de fabricação do ferro-gusa, dessa forma, o consumo de energia para a produção do cimento é menor. A escória contém óxido de cálcio, dióxido de silício e óxido de alumínio, mas sua composição é diferente da do cimento Portland. Quando a cal é liberada durante a hidratação do cimento Portland, fornece

alcalinidade suficiente, a hidratação da escória começa e a hidratação contínua não depende da cal (NEVILLE, 2013).

A escória de alto-forno é dividida em: escória de alto-forno bruto britado (agregado graúdo), escória de alto-forno granulada (agregado miúdo) e escória de alto-forno granulada moída (substitui parte do cimento). Grandes quantidades de resíduos industriais podem ser encontradas nos pátios de grandes siderúrgicas. Comparado com o uso do concreto tradicional, o uso de escória melhora a resistência mecânica e a deformação (PINHEIRO, 2016).

De acordo com Sadek (2014), a escória de alto-forno é geralmente produzida de duas maneiras, que dependem da tecnologia de resfriamento. Havendo a possibilidade de ser feito com auxílio de jato de água (resfriada rapidamente) ou ao ar (resfriada lentamente). Após o processo de resfriamento, no estado solidificado, sua composição química perdura inalterada, porém suas propriedades físicas e de reação variam muito com o processo de resfriamento.

Segundo Özbay (2016), quando a escória de alto-forno é resfriada de forma rápida e repentina com um jato de água, ela se solidifica numa forma granular e amorfa. A escória de alto-forno torna-se um material amorfo de silicato de Ca-Mg-Al, com uma estrutura celular basicamente não cristalina quando é submetido ao resfriamento rápido. Depois de ser moído até obter uma finura adequada, pode ser amplamente utilizado como um material auxiliar na fabricação de cimento Portland.

De acordo com Neville (2016), há vários efeitos benéficos possíveis da adição de escória de alto-forno ao concreto. São eles: melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco; taxa de liberação de calor mais lenta, resultando em menor temperatura de pico; microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, melhorando assim a resistência em longo prazo e, em especial, a durabilidade e eliminação do risco da reação álcali-sílica, independentemente do teor de álcalis do cimento Portland ou da reatividade do agregado.

### **Sílica Ativa**

Material decorrente da produção de silício ou ligas de ferro-silício a partir de quartzo de alta pureza e carvão mineral em fornos elétricos de arco submerso. O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) expelido na forma de gás se oxida e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente finas de sílica amorfa (vidro). Essas partículas são altamente reativas, o que

acelera a reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido pela hidratação do cimento Portland. As pequenas partículas de sílica ativa também preenchem o espaço entre os grãos de cimento (Neville, 2013).

De acordo com a ABNT NBR 13956-1:2012, a sílica ativa deve atender aos requisitos do quadro 1:

**Quadro 1:** Requisitos químicos e físicos da sílica.

Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
$\text{SiO}_2^a$	%	$\geq 85,0$	ABNT NBR 13956-2
Umidade <sup>b</sup>	%	$\leq 3,0$	
Perda ao fogo <sup>a</sup>	%	$\leq 6,0$	
Equivalente alcalino em $\text{Na}_2\text{O}^a$	%	Informar	
Teor de sólidos na dispersão aquosa <sup>c</sup>	%	Não pode variar mais do que $\pm 2\%$ do valor declarado pelo fabricante	
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	%	$\geq 105$	ABNT NBR 13956-3
Finura por meio da peneira 45 $\mu\text{m}$	%	$\leq 10,0$	ABNT NBR 13956-4
Área específica B.E.T. (opcional) <sup>d</sup>	$\text{m}^2\text{g}^{-1}$	$15 \leq \text{B.E.T.} \leq 30$	ASTM C 1069

<sup>a</sup> A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após a determinação do teor de umidade a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

<sup>b</sup> Não se aplica à sílica ativa na forma de dispersão aquosa (3.4).

<sup>c</sup> Não se aplica à sílica ativa nas formas densificada (3.2) e não densificada (3.3).

<sup>d</sup> O ensaio para a determinação da área específica, pelo método da ASTM C 1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), substituindo-se alumina e quartzo por sílica ativa, deve ser realizado pelo produtor quando solicitado pelo consumidor.

Fonte: ABNT NBR 13956-1:2012.

A sílica ativa influencia significativamente as propriedades do concreto fresco. A mistura é altamente coesiva, e, em virtude disso, a exsudação é bastante reduzida, ou até mesmo inexistente (NEVILLE, 2016). Além disso, a ABNT NBR 13956, evidencia que a adição confere ao concreto, argamassa e pasta propriedades exclusivas relacionadas ao seu desempenho mecânico e à durabilidade.

A sílica ativa utilizada como adição mineral pode agir de duas maneiras. A primeira delas é o efeito filer, onde ocorre o desenvolvimento da resistência inicial (corresponde até

aproximadamente sete dias), proporcionado devido ao melhor empacotamento das partículas. A segunda maneira é através da reação química, onde ocorre a reação pozolânica, a mesma reage com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , decorrente da hidratação do cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Quando a sílica ativa reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$  da hidratação do cimento Portland, forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Facultando aos compósitos do concreto, argamassa e pasta com o desempenho desses materiais, conferem ao concreto, argamassa e pasta, características especiais referentes ao desempenho e durabilidade, quando associadas aos atributos desses compósitos sem a sua presença, tais como: aumento da resistência à compressão e à flexão, redução de porosidade e permeabilidade, entre outras características (ABNT NBR 13956-1:2012).

### **Metacaulim**

O metacaulim é um produto obtido através da calcinação e moagem de argilominerais caulínicos. Constituído por um tipo de pozolana formada principalmente por partículas lamelares com uma estrutura predominante não cristalina (ABNT NBR 15894-1:2010). De acordo com Neville (2013), o metacaulim é calcinado em temperaturas entre 650 e 850°C. O metacaulim é uma pozolana altamente reativa. A interação física e química com o cimento Portland altera a reologia dos compostos do concreto e materiais compósitos relacionados no estado fresco, além de fornecer propriedades especiais relacionadas à durabilidade e propriedades mecânicas no estado endurecido.

A elevada área de superfície melhora a reologia, que otimiza a distribuição granulométrica da pasta, auxiliando na retenção de água, aumentando a coesão, reduzindo a exsudação e a segregação, contribuindo para o acabamento final (ABNT NBR 15894-1:2010).

De acordo com a ABNT NBR 15894-1:2010, existem alguns requisitos que o metacaulim deve atender, conforme é apresentado no quadro 2:

**Quadro 2:** Requisitos químicos e físicos do metacaulim.**Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos**

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO <sub>2</sub>	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14656
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
SO <sub>3</sub>	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na <sub>2</sub> O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15894-2
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	mgCa(OH) <sub>2</sub> /gmaterial	≥ 750	ABNT NBR 15895
Área específica B.E.T. (opcional)	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	≥ 15	ASTM C-1069

A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após determinação do teor de umidade a (105 ± 5) °C.

A critério do consumidor, podem ser solicitados os ensaios de atividade pozolânica pelo método preconizado pela ABNT NBR 15895 (método de Chapelle) e ensaio para determinação da área específica pelo método ASTM C-1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), que devem, quando solicitados, atender aos valores mínimos apresentados na Tabela 1.

NOTA Equivalente alcalino em Na<sub>2</sub>O → Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> = 0,658 %K<sub>2</sub>O + %Na<sub>2</sub>O.

Fonte: ABNT NBR 15894-1:2010.

O metacaulim é estudado por diversos pesquisadores como pode ser observado na pesquisa de Santos *et al.* (2020). Os mesmos obtiveram em seus resultados que proporções diferentes de metacaulim adicionado à massa do cimento Portland, melhoram a resistência a compressão axial e diminuição da absorção capilar. Entretanto, a adição de metacaulim não conferiu melhorias significativas na porosidade do concreto.

O metacaulim também pode acelerar o processo de hidratação do cimento Portland, age como filer, reage com o Ca(OH)<sub>2</sub> resultante da hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado adicional (C-S-H). Essas contribuições conferem aos compósitos, argamassas e pastas de concreto, propriedades especiais relacionadas à durabilidade e propriedades mecânicas, comparadas com o desempenho desses compósitos

quando eles não existem, tais como: maior resistência ao sulfato, resistência à difusão de íons cloreto, aumento da resistividade (ABNT NBR 15894-1:2010).

No geral, quando um subproduto pozolânico possa substituir de forma parcial ao cimento Portland no concreto, há uma considerável economia de energia e de custo (Lisboa *et al.* 2017).

### **Aumento da resistência à compressão do concreto a partir da utilização das adições minerais**

As adições minerais têm sido utilizadas como matéria-prima na construção civil nos últimos anos, essas adições são provenientes a partir da calcinação de argilas caulínicas (ABNT NBR 15894-1:2010), produção de sílicio ou ligas de ferro-sílicio e de resíduos de usinas siderúrgicas (NEVILLE, 2013), com o intuito de melhorar a resistência, reduzir a porosidade e permeabilidade do concreto (ABNT NBR 13956-1:2012).

Ribeiro A., *et al.* (2021), realizou um estudo com a finalidade de encontrar o teor ótimo das adições de sílica ativa e metacaulim, para isso foram realizadas substituições em teores de 8, 10, 12 e 14% para ambas as adições minerais utilizando o CP V-ARI. Já a escória de alto-forno foi empregada compondo o CP III – RS, no teor de  $45 \pm 5\%$ . O estudo mostrou que, os melhores teores de adições minerais foram de 8% para a sílica ativa e 12% para o metacaulim. O concreto com adição de metacaulim apresentou uma maior resistência à compressão para uma mesma relação água/ligante em relação aos demais ligantes.

Medeiros M., *et al.*, (2017), em seu estudo realizou dosagens de concreto seguindo dois raciocínios, a primeira dosagem foi realizada em substituição de 10%, em massa, ao consumo de cimento Portland. Já a segunda dosagem foi realizada um acréscimo de 10%, em massa, ao consumo de cimento. Nos casos em que houve a substituição parcial de cimento, em teor de 10%, em massa, os valores de resistência à compressão foram 15% e 13% superiores em relação à série de referência para o metacaulim e para a sílica ativa, respectivamente. Entretanto, quando as pozolanas são adicionadas ao cimento, tanto o metacaulim como a sílica ativa proporciona elevação de resistência em comparação ao concreto de referência, aumentando em média, 78 MPa (incremento de 42%) e 70 MPa (incremento de 27%), respectivamente.

Segundo Pimentel M. *et al.*, (2017) os resultados mostram que a escória de alto-forno apresenta uma massa específica semelhante ao dos cimentos devido em especial a sua composição química e mineralógica e a mesma apresentou predominância de óxidos de silício (SiO<sub>2</sub>), cálcio (CaO) e Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

De acordo com Hermann A. *et al.*, (2016) nos resultados foram encontrados a evolução da relação de vazios e concentração de sólidos nas pastas produzidas; A concentração de sólidos máxima para cada material é tomada como a densidade de empacotamento de partículas do material na condição úmida. Sendo (0,414) por outro lado, a sílica ativa foi o material que apresentou menos densidade de empacotamento. Igual a (0,414). A mistura binária dos dois materiais na proporção de 15% de sílica ativa e 85% de cimento em massa resultou em uma densidade de empacotamento intermediário.

O assunto também é discutido pelos autores Cabreba J. *et al.*, (2015) apontam aplicações de resíduos sólidos, como a escória de alto forno, substituindo parcialmente o cimento Portland, e como agregado pétreo (como a escória granulada), empregados à produção de concreto. Tal substituição se mostrou exitosa na análise comparativa com o concreto convencional no parâmetro resistência mecânica de compressão do concreto, e em alguns casos a resistência contra a corrosão das armaduras, dependendo de alguns fatores determinantes.

O concreto que recebe substituição parcial de cimento por escoria levará um tempo maior de hidratação para garantir a resistência mecânica desejada, sendo de indispensável à cura completa do concreto, já que sua pega e endurecimento se dá pela reação química com a água, de modo que é considerada como um cimento hidráulico latente, tendo os mesmos compostos. No entanto, em alguns casos, é necessário que a escória também seja misturada com cal hidratada para ganhar funcionalidade.

Os autores citam como referência nos artigos avaliados, os indicadores obtidos sobre a resistência a compressão, que quando o nível de substituição ultrapassar 50% se faz necessário um de controle de qualidade na preparação e na de outros aditivos que contribuam para melhorar a resistência. E o nível de substituição máximo de 70% para a escória em ambientes de baixa agressividade de carbonatação.

Segundo Gomes C. *et al.*, (2019), o artigo disserta sobre a importância de alternativas sustentáveis à produção do concreto, e tem como norte 11 (onze) artigos acadêmicos recentes.

A análise dos artigos mostrou que a grande maioria dos estudos envolve o uso de cinzas volantes ou sílica ativa como adição mineral, o que se conclui que essas adições minerais combinadas com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição são menos exploradas em pesquisas.

Analisando os resultados dos ensaios apresentados em cada artigo, nos é informado que cada adição apresenta proporções ideais de substituição em comparação à produção do concreto convencional, e um dos artigos atesta a adição de misturas com 50% de agregados reciclados em substituição aos agregados graúdos e 10% de sílica ativa apresentaram resultados satisfatórios nos testes de resistência à compressão.

### **Diminuição da absorção capilar a partir das adições minerais**

Rodrigues *et al.*, (2017) comparando as amostras com proporções iguais, preparadas com o mesmo cimento (CPIII), a amostra com adição de metacaulim apresentou maior absorção capilar. Para as amostras confeccionadas com o cimento CPV, a amostra com adição de metacaulim apresentou maior absorção capilar.

A absorção capilar está diretamente relacionada ao refinamento dos poros, que ocorre nas amostras de cimento de CPV. Além disso, as reações pozolânicas em amostras de cimento CPV com adição de metacaulim ocorrem mais rapidamente do que em amostras de cimento CPIII gerando uma maior compactação e dificultando a absorção capilar.

De acordo com os resultados de Medeiros *et al.*, (2017), foram utilizadas as adições como substituição parcial ao cimento Portland, a sílica ativa causou redução de 10% na absorção e o metacaulim não apresentou diferença estatística do resultado em relação à série de referência. No entanto, quando utilizada como adição ao cimento o metacaulim e a sílica reduzem a capacidade do concreto em absorver água em 12% e 46%, respectivamente, comparados à série de referência.

Santos *et al.* (2020), realizou testes em corpos de prova, onde foram definidas a relação em massa no traço 1:1,83:2,37:0,6, sendo (cimento: areia: brita: água) com teores de 0%, 5%, 10%, e 15% de metacaulim em adição a massa do cimento, de acordo com os resultados, foram observados que a adição de metacaulim proporcionou uma diminuição da absorção capilar e retardo no avanço da frente de carbonatação no concreto.

Foi realizada uma pesquisa que buscou avaliar as influências das adições minerais no desempenho do concreto. Diante da literatura estudada optou-se por buscar dados sobre a atuação da sílica ativa, metacaulim e escória de alto-forno devido a sua notável melhoria no compósito.

Percebeu-se que os estudos trazem uma maior abordagem sobre resistência à compressão e absorção capilar. Diante disso, foi possível identificar nos artigos analisados que os autores falam mais sobre resistência à compressão do que a absorção capilar. Os artigos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são recente o que nos retrata que é um assunto de grande importância no meio acadêmico.

De acordo com Irassar *et al.* (2015) o aumento da resistência à compressão e redução da absorção capilar são explicadas pelo motivo das partículas finas das adições preencherem os espaços vazios entre os grãos de cimento, modificando seu empacotamento granular, resultando numa alteração da porosidade inicial da pasta e, conseqüentemente, a resistência também pode ser ligeiramente aumentada.

Esse nível de elevação da resistência à compressão também foi encontrado nos estudos de Santos *et al.* (2020), TorresAgredo, Mejía-de-Gutiérrez e Delvasto-Arjona (2011) e o motivo é o refinamento dos poros do concreto provocado pelas reações pozolânicas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da sílica ativa, metacaulim e escória de alto-forno, mostraram-se excelentes alternativas de adições em concretos, haja vista, os resultados positivos dos ensaios laboratoriais, que demonstram sua eficácia e sua capacidade de promover o aumento da resistência à compressão no concreto, diminuir a absorção capilar e aumento da durabilidade aos ataques químicos prolongando a vida útil do concreto, devido a uma menor porosidade na composição. Além dos benefícios técnicos, também podemos destacar as vantagens de seu uso em comparação com outros tipos de concreto onde não se utilizam adições, dentre elas, o reaproveitamento de resíduos poluentes que seriam descartados de usinas siderúrgicas e conseqüentemente auxiliando a diminuir os impactos ambientais ocasionados pela construção civil.

Para a obtenção de uma produção de concreto com características mais eficientes e com o acréscimo de materiais alternativos e sustentáveis na composição do concreto, é de fundamental importância que continuem surgindo novas pesquisas evidenciando mais sobre questões de durabilidade do concreto, haja vista, que o meio acadêmico evidencia sobre materiais e conclusões sobre o aumento da resistência à compressão.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM137**: Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BAUER, L.A.; FALÇÃO. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CABRERA-MADRID, J. A.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; CASTRO-BORGES, P. Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Re-revisão do estado da arte. **Revista ALCONPAT**, v. 6, n. 1, p. 64-83, 2016.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES, J. **Comparison of the silica fume content for high-strength concrete production: chemical analysis of the pozzolanic reaction and physical behavior by particle packing.** *Materials Research*, v. 23, 2020.

CUNHA, Alessandra Martins *et al.* **Construção Civil.** Porto Alegre: SARAH EDUCAÇÃO S.A., 2017.

DE SANTANA, Bruna Vieira; ALEIXO, Isabella Venâncio; JOFFILY, Irene de Azevedo Lima. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes.** Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de Pesquisa, v. 2, n. 1, 2016.

GOLDENBERG, M. **A arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em Ciências sociais,** Rio de Janeiro: Record, 1997.

GOMES, Camila Lacerda; POGGIALI, Flávia Spitale Jacques; AZEVEDO, Rogério Cabral de. **Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, 2019.

IRASSAR, EF BOANAVETTI; MENÉNDIS, G.; HIDRATAÇÃO, M. F. C. propriedades de cimentos compostos (com três adições) com fíler calcário e escória. **Revista ALCONPAT, Yucatan**, v. 5, n. 2, p. 83-95, 2015.

KAUARK, F., MANHÃES, F. C., MEDEIROS, C. H., **Metodologia da pesquisa: guia prático,** Itabuna, Via Litterarum, 2010.

LIDUÁRIO, A. S. *et al.* **Estudo da influência de adições pozolânicas e minerais no concreto.** Laboratório de concreto de Furnas Centrais Elétricas SA, 2008.

LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; OUCHAGOUR, Youssef. **Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 439-449, 2012.

LISBOA, Ederval de Souza *et al.* **Materiais de construção: Concreto e Argamassa.** 2. ed. Porto Alegre: SARAH EDUCAÇÃO S.A., 2017.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; RAISDORFER, Janderson William; HOPPE FILHO, Juarez. **Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c.** *Ambiente Construído*, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

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

ÖZBAY, Erdoğan; ERDEMİR, Mustafa; DURMUŞ, Halil İbrahim. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review.** *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 423-434, 2016.

PARIZOTTO, LIANA, SAGAH EDUCAÇÃO S.A. *Concreto Armado*. 2017.  
PINHEIRO, ANTONIO CARLOS DA FONSECA BRAGANÇA, MARCOS CRIVELARO. **Materiais de Construção**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2016.

RIBEIRO, André Valmir Saugo et al. **Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 26, n. 1, 2021.

RODRIGUES, Dardania Aparecida Evangelista; GOMES, Abdias Magalhães; LINS, Vanessa de Freitas Cunha. **Efeito da adição de metacaulim na absorção capilar e carbonatação do concreto.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 22, 2018.

SADEK, Dina M. **Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks.** *Journal of cleaner production*, v. 79, p. 134-141, 2014.

SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, DDM; RIBEIRO, D. V. Effect of the addition of metakaolin on the carbonation of Portland cement concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 1, p. 1-18, 2020.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M., **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.