



PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA ATIVA

Nunes, Alex Felipe dos Santos¹

Evangelista, Cleovan²

Gallo, Osnildo³

Dal Molin, Débora⁴

RESUMO

Neste artigo, o objetivo foi desenvolver um traço de concreto autoadensável com menor custo e mais sustentável, reduzindo o consumo de recursos naturais não renováveis com a utilização de Sílica Ativa, um aglomerante extraído das indústrias siderúrgicas substituindo parcialmente o cimento, que é o componente mais oneroso do concreto. Os resultados foram satisfatórios atingindo os objetivos estipulados. Todos os ensaios foram baseados nas normas da ABNT e seguiram o método de cálculo proposto por Tutikian e Dal Molin (2007). Utilizando um traço referência que é o usual na empresa BP Pré Moldados e dois traços testes, dos quais, apenas um atingiu a resistência necessária substituindo uma porcentagem do cimento pelo material proposto. Os resultados de resistência no estado endurecido foram obtidos através do ensaio à compressão com idade máxima de 7 e 28 dias e o ensaio de abatimento no estado fresco foi através do *slump flow* onde mede-se a sua funcionalidade. Traço 1 atingiu níveis satisfatórios pois superou a resistência do traço referência com um menor consumo de cimento, o que possibilitou trazer recursos onerosos e contribuindo com menos CO₂ na atmosfera.

Palavras-chave: Concreto, Sílica ativa, Sustentável, Cimento

¹ Acadêmico do curso de engenharia civil da faculdade de Ampère/FAMPER

² Acadêmico do curso de engenharia civil da faculdade de Ampère/FAMPER

³ Orientador Tecnólogo em gestão da qualidade. Professor da Faculdade de Ampère/FAMPER

⁴ Co orientadora. Mestre em História. Professora da Faculdade de Ampère/ FAMPER

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland constitui-se como o segundo material mais consumido no mundo ficando atrás apenas da água, empregado na mistura como um material ligante para a produção de concretos e argamassas. Isso se deve aos seus atributos únicos, como trabalhabilidade e moldabilidade, que é capaz de se moldar em diversas formas no seu estado fresco, e no estado endurecido como um elemento sólido gerando rigidez e resistência às estruturas.

A palavra CIMENTO é originada do latim "CAEMENTU", que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial.

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Observou que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo descobridor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

No Brasil, estudos para aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreram aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo

Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas nessa época. Assim, chegou a funcionar durante apenas três meses, em 1892.

Uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba, cuja construção data de 1890, por iniciativa do engenheiro Louis Felipe Alves da Nóbrega, que estudará na França e chegará ao Brasil com novas ideias, tendo inclusive o projeto da fábrica pronto e publicado em livro de sua autoria. Atribui-se o fracasso do empreendimento não à qualidade do produto, mas à distância dos centros consumidores e à pequena escala de produção, que não conseguia competitividade com os cimentos importados da época.

A usina de Rodovalho lançou em 1897 sua primeira produção – o cimento marca Santo Antonio – e operou até 1904, quando interrompeu suas atividades. Voltou em 1907, mas experimentou problemas de qualidade e se extinguiu definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, com precariedade e produção de apenas 8.000 toneladas por ano, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1935, após modernização.(Battagin, 2022)

Todas essas etapas não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

Em 2022 foram produzidos cerca 63,5 milhões de toneladas de cimento no Brasil, a elevada demanda por cimento Portland tem gerado preocupações relacionadas ao processo produtivo considerando que uma das fases mais cruciais, a clínquerização, necessita de queima de matéria prima (calcário e argilas) a uma temperatura de 1.500 C, com alta liberação de Dióxido de carbono (CO₂).

SINDICATO (2022) No Brasil são emitidos cerca de 564 quilos de CO₂ por toneladas de cimento, isso corresponde 2,3% da média mundial que é 7 %, segundo a agência CNI de notícias (2021).

Mehta e Monteiro (2014) destacam que entre os materiais que compõem a mistura, o cimento Portland é o que demanda maior gasto financeiro e energético em sua fabricação, podendo liberar em torno de 1 tonelada de CO₂ (Dióxido de carbono). Cada tonelada de clínquer produzido é responsável por cerca de 90% das emissões de gases poluentes da indústria da construção. Com o aumento do consumo ao longo dos anos, tem sido considerado um dos principais causadores de poluição atmosférica.

A tecnologia do concreto estrutural baseada em princípios científicos, para este desafio. O desenvolvimento do concreto por meio do uso extensivo de superplastificantes, uso de aditivos minerais provenientes de resíduos industriais e embalagem de grânulos reduz o consumo de ligantes sem comprometer a durabilidade. Vale ressaltar que já existem recursos técnicos, a indústria da construção civil é responsável pela promoção e aplicação.

De acordo com Rebmann (2011), é comum que a obtenção de um material resistente e durável esteja relacionada a um elevado consumo de cimento Portland, o que pode acarretar problemas de desempenho para a estrutura, existe uma maior propensão ao desenvolvimento de fissuras causadas pela contração térmica e química. Fundamentado nessa ideia, o concreto autoadensável (CAA) com baixo consumo de cimento pode oferecer benefícios únicos e desempenho mecânico diferenciado, mostrando que a resistência não depende de um alto consumo de cimento.

Atualmente utiliza-se os aditivos superplastificantes que são consumidos principalmente pelas empresas de pré-moldados onde a ausência de retardamento de pega é uma vantagem. Os fluidificantes ou como também são chamados os aditivos de última geração, que são os produtos com base em policarboxilatos, poliacrilatos e copolímeros à base de polietileno, possibilitam a execução de concretos de alto desempenho e concretos auto-nivelantes de usos ainda muito limitados no mercado brasileiro, mas já presente nos concretos especiais de concreteiras e fabricantes de pré-moldados de alto desempenho estrutural.

Esta pesquisa procurou realizar ensaios e produzir concreto autoadensável com a utilização de sílica ativa com o objetivo de baixar a quantidade de cimento Portland na adição do concreto sem que a sua resistência final seja afetada, melhorando a qualidade e seu desempenho contribuindo também com a produção de um concreto mais sustentável com a menor quantidade no consumo de cimento.

O objetivo deste trabalho foi analisar como a diminuição do uso de materiais pode afetar o comportamento do concreto autoadensável (CAA) em seu estado fresco e endurecido. Destaca-se a relevância desta pesquisa, pois permite a obtenção de um CAA com redução de materiais, o que se apresenta vantajoso tanto por questões financeiras como sustentáveis.

O desafio na área da construção civil hoje é tornar o concreto autoadensável com baixo consumo de cimento (CAABCC) uma opção viável para o dia a dia da engenharia, possibilitando que os desenvolvimentos derivados desses materiais em laboratório ultrapassem as barreiras do mercado e assim se tornem uma opção viável para a construção. Concluindo, o CAABCC tem forte potencial para revitalizar novas edificações, tornando-as resistentes e duráveis.

Os principais materiais utilizados na produção de CAA são cimento, agregados (grãos e miúdos), água e aditivos. Os preços desses materiais podem variar de acordo com a região e o fornecedor. Os materiais foram utilizados por fornecedores próximos a qual indústria na qual é utilizada uma grande quantidade de agregados, por conta disso se torna mais viável. A qualidade e as especificações dos materiais são feitas análises em laboratório próprio garantindo a qualidade dos agregados.

2 - JUSTIFICATIVA

Este estudo foi realizado junto à empresa BP pré-moldados, localizada no município de Santa Izabel do oeste, estado do Paraná que vem atuando no mercado nacional desde 2005, estudo desenvolvido com objetivo realizar ensaios em laboratório e elaborar traço de CAA com redução no consumo de cimento visando manter desempenho e qualidade.

O interesse por este assunto indaga ainda mais a busca do conhecimento aplicando na prática e mensurando os resultados, o grande objetivo é demonstrar os custos, benefícios e equiparar os números e o impacto ambiental que podem vir a ser reduzidos.

A busca de conhecimento por novos aditivos e aglomerantes existentes no mercado faz despertar ainda mais a curiosidade sobre estes produtos e testá-los na prática. O mercado dispõe variados tipos de produtos, desde aditivos plastificantes como acelerador de pega inicial e aditivos retardadores entre outros. Os aglomerantes também possuem no mercado inúmeras possibilidades como sílica ativa, pozolana, cinza de casca de arroz e metacaulim a fim de melhorar a qualidade do concreto.

3 - REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo os autores como Calado, Camões, Jalali e Barkokébas (2015), O concreto convencional, (CCV) após ser lançado nas formas necessita de vibração para ser adensado. Ele vem sendo estudado e empregado regularmente desde o início do século XX em todas as regiões do mundo, nas mais diversas condições climáticas, com grande diversidade de materiais constituintes de suas composições.

Para ter a necessidade de ser adensado o concreto (CCV) precisa de mais colaboradores envolvidos no processo de produção e os custos de mão de obra, equipamentos de vibração, energia elétrica e ruídos precisam ser levados em consideração na hora de levantar os custos finais.

Concreto autoadensável (CAA) segundo Tutikian & Dal Molin (2007) tem maior fluidez e trabalhabilidade capaz de se moldar em formas sem a necessidade de utilizar vibradores para o seu adensamento. A fluidez e a propriedade do concreto permitem escoar as formas entre as barras de aço preenchendo todos os espaços com resistência à segregação permitindo a melhor qualidade no produto.

Para Gomes e Barros (2009), é um concreto extremamente denso sem ser necessário à sua vibração a fim evitar a formação de nichos e pontos que facilitem a entrada de agentes deletérios, capazes de afetar diretamente a durabilidade das

estruturas. Ou seja, para sanar um dos maiores problemas encontrados durante a concretagem de peças de formas e armaduras complexas.

Na produção (CAA) a um custo maior na sua fabricação por se utilizar materiais mais finos e aditivos superplastificantes para que ocorra a fluidez do concreto sem ter a necessidade de adensar, por outro lado a um controle de qualidade mais eficaz onde sua dosagem necessita ser extremamente controlada para que obtenha êxito na fabricação.

De acordo com Gomes (2002), no que diz respeito ao consumo de pó fino, este é de aproximadamente 400-650 kg/m³. É constituído por partículas com menos de 100 µm e é composto por cimento (200-450 kg/m³) e cargas minerais, pozolânicos ou sistemas naturais. A elevada quantidade de finos destina-se a reduzir o atrito entre os agregados.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi testar como a diminuição no consumo de cimento afeta o comportamento do CAA nos estados fresco e endurecido. Salienta-se a importância desta pesquisa, uma vez que permite obter um CAA com economia de materiais, o que é vantajoso tanto por razões económicas como sustentáveis.

As duas propriedades mais importantes do CAA são a trabalhabilidade e a durabilidade. A característica desse concreto têm de ser determinadas e mantidas. Assim, as propriedades dos materiais e principalmente passam a ser os fatores mais importantes para a otimização da mistura. (Pini, 2008,p.8)

Juntamente com as vantagens do concreto autoadensável e, como resultado do aumento da procura de concreto de alta resistência, passou a ser conveniente utilizar os nanos materiais como adições. Estes destinam-se a conferir características especiais, para o concreto, que na sua capacidade resistente quanto na durabilidade. (E. SÁNCHEZ, J. BERNAL, LEÓN, MORAGUES, 2016, p.5).

O CAA pode ser utilizado tanto moldado in loco como na indústria de pré-moldados, pode ser dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto e depois transportado via caminhão betoneira para as construções. Também pode ser

lançado com bombas de concreto, guias ou simplesmente espalhado, ou seja, o CAA é tão versátil quanto o concreto convencional. (TUTIKIAN, 2004, p.35).

4- METODOLOGIA PROPOSTA POR TUTIKIAN E DAL MOLIN

O método de dosagem do concreto usado foi o proposto por Tutikian (2004) é fundamentado no método de cálculo para CCV 1PT/ EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992). É um método prático e experimental, que requer a observância de etapas específicas para atingir o resultado, que é a mistura de três traços até chegar ao ideal.

Em 2007 Tutikian apontou que poderiam ser melhorados alguns pontos de dosagem no Teor de argamassa, então foi criado um novo método para medir CAA, o Tutikian & Dal Molin (2007). O intuito é aproveitar as vantagens da abordagem proposta por Tutikian (2004) e buscar superar algumas das desvantagens constatadas com a utilização na prática.

Nesta pesquisa foram baseadas nas normas da ABNT e realizadas na empresa BP pré-moldados que conta com laboratório próprio e toda a estrutura necessária para a realização dos ensaios, a seguir estão listados os ensaios realizados.

- Agregado miúdo - Determinação da absorção de água-ABNT NBR NM 30
- Agregados - Determinação da massa unitária e índice de vazios- ABNT NBR 16972

- Concreto autoadensável parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco – ABNT NBR 15823-1
- Concreto autoadensável parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – método do cone de Abrams.

5 - ESCOLHA DOS MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados foram de acordo com que a empresa BP pré-moldados possui e são fornecidos pela empresa mineradora MINERSUD de Realeza (PR). As escolhas dos agregados para o concreto Autoadensável (CAA) devem ser os mais esféricos possíveis para que haja um empacotamento adequado a fim de evitar futuras patologias no concreto.

5.1 - CIMENTO

Foi utilizado apenas um tipo de cimento: CPV-ARI, com massa específica de $3,12 \text{ g/cm}^3$, especificado pela ABNT NBR 11578 (1991) [10], produzido pela empresa Votorantim. A razão da escolha quanto ao tipo de cimento, é seu tempo de pega ideal para peças pré-moldadas já produzidas pela empresa onde o saque da forma é realizado em menos de 24 horas.

imagem 1: Cimento CPV-ARI



Fonte: Votoran (2023)

5.2 - AGREGADO MIÚDO

Foi selecionada uma areia, proveniente de cava de rio, com granulometria fina, com dimensão máxima característica de $0,3 \text{ mm}$, módulo de finura $1,52$, segundo a ABNT NBR NM 248 (2003) [11]. Os ensaios de caracterização contemplam a massa específica do agregado seco de $2,51 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a ABNT NBR NM 52 (2009) [14], massa unitária em estado solto $1,56 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Utilizado também no concreto areia industrial gerados da britagem sua dimensão máxima característica é de $4,75 \text{ mm}$ e seu módulo de finura é de $2,78$, segundo a ABNT NBR NM 248 (2003) [11]. A massa específica do agregado seco é de $2,87 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ de acordo com a ABNT NBR NM 52 (2009) [14], massa unitária em estado solto $1,73 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Imagem 2: Areia natural



Areia industrial



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

5.3 - AGREGADO GRAÚDO

Foi selecionado um agregado natural britado de origem basáltica com dimensão máxima característica 9,5 mm, classificado como 4,75/12,5 (d/D) e módulo de finura igual a 6,82 segundo a ABNT NBR NM 248 (2003) [11]. Os ensaios de caracterização contemplam a massa específica do agregado seco de 2,96 g/cm³ segundo a ABNT NBR NM 53 (2009), massa unitária em estado solto de 1,59 (g/cm³).

Imagem 3: Brita 0



Fonte: Arquivo próprio (2023)

5.4 - ADIÇÕES MINERAIS

Foram selecionadas duas adições minerais, uma sílica ativa⁵ e um fíler de calcário. A sílica ativa utilizada foi fabricada pela Tecnosil, possui massa específica de 2,22 g/cm³, sua superfície específica (BET) é de aproximadamente 20.000 m²/kg

⁵ Sílica ativa é o resultado da fabricação do ferro silício ou silício metálico, cujas partículas são 50 a 100 vezes menores que os grãos de cimento e, dependendo do grau de dispersão, preenche até 100% dos vazios entre eles, tornando o concreto mais denso.

e tem teor de $\text{SiO}_2 > 85\%$. A sílica ativa utilizada tem retenção na peneira #325 (abertura de $45 \mu\text{m}$) inferior a 10%. A segunda adição, o fíler, é proveniente do calcário, popularmente chamado de pó de calcário. As características do material é de $45 \mu\text{m}$ e seu módulo de finura é de 0,90 segundo a ABNT NBR NM 248 (2003), A massa específica do agregado seco é de $2,79 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ de acordo com a ABNT NBR NM 52 (2009) massa unitária em estado solto $1,58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

A adição de teores entre 5 e 8% de Sílica Ativa da Tecnosil em relação ao peso do cimento melhora as características dos concretos e argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido, proporcionando: Melhor desempenho inibindo agressões químicas, penetração íons cloreto, RAA; Baixa permeabilidade, porosidade, absorvidade; Maior resistência mecânica; Melhor aderência pasta/armaduras e pasta/agregados; Alta resistência a ambientes agressivos; Menor índice de reflexão em concretos projetados; Possibilita uma maior espessura de aplicação no concreto projetado Aumenta a coesão; Diminui a exsudação; Melhor desempenho a abrasão e erosão.

Imagem 4: Sílica ativa



Fonte: Tecnosil (2023)

5.5 - SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante utilizado na pesquisa foi o FORT FLOW 922 PRÓ da indústria Daf química, baseado em policarboxilatos. De acordo com o fabricante, foi desenvolvido para extrema trabalhabilidade sem causar segregação no concreto, e foi especialmente formulado para produzir CAA. Apresenta-se na cor caramelo, tem densidade média de $1,08 \text{ g/cm}^3$, segundo informação do fabricante. A porcentagem de aditivo está expressa em termos de aditivo total (sólidos + solventes) em relação a massa de cimento, no qual o teor de sólido do mesmo corresponde a $28,48\% \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Imagem 5: Aditivo superplastificante



Fonte: Arquivo próprio (2023)

6 - DETERMINAÇÃO DO FATOR ÁGUA/CIMENTO

A determinação do teor da argamassa do concreto deve ser adotada de acordo com a classe de agressividade ambiental, ou se é concreto protendido ou armado. Para a realização de um traço para concreto CAA deve-se adotar um teor de argamassa um pouco superior do que um concreto convencional pois o traço CAA demanda mais teor de finos para que não ocorra a segregação do concreto na hora de dosar o aditivo.

A proporção água/cimento afeta a fluidez do concreto e deve ser cuidadosamente determinada. É essencial encontrar o equilíbrio adequado entre a capacidade de fluxo do concreto e a resistência final desejada. Aditivos e adições: A utilização de aditivos superplastificantes é comum em CAA para melhorar a funcionalidade do concreto sem comprometer a resistência. Além disso, adições como cinzas volantes ou sílica ativa podem ser empregadas para melhorar a durabilidade do concreto.

Tabela 1: Classe de agressividade ambiental.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118/ 03.

6.1 - DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR

A partir desse ponto, ao classificar fator A/C do traço de concreto, seguimos para a determinação do traço segundo Tutikian e Dal Molin (2007).

Composição granulométrica conforme a ABNT NBR 7211(2005) o esqueleto granular de concreto é formado por agregados graúdos (como pedras britadas) e agregados miúdos (como areia). A proporção e a distribuição granulométrica desses agregados desempenham um papel crucial na resistência e nas propriedades de fluxo do concreto autoadensável. Portanto, é importante determinar a composição granulométrica adequada, de acordo com as especificações do projeto.

ABNT NBR NM 52 (2009) o índice de vazios é um parâmetro importante para determinar o esqueleto granular do concreto. Ele representa a porosidade entre as partículas do agregado e influencia diretamente a quantidade de pasta de cimento necessária para preencher esses vazios. Geralmente, um índice de vazios adequado é determinado experimentalmente com base nas propriedades desejadas do concreto autoadensável.

A pasta de cimento é responsável por preencher os vazios entre os agregados e conferir a coesão ao concreto. A quantidade da pasta de cimento necessária depende da composição granulométrica e do índice de vazios dos agregados. É importante determinar a proporção adequada de pasta de cimento para obter uma mistura autoadensável.

Tutikian e Dal Molin (2007) determinação do esqueleto granular do concreto autoadensável também envolve a realização de dosagens experimentais. Nesses ensaios, diferentes proporções de agregados e pasta de cimento são testadas para encontrar a combinação ideal que atenda aos requisitos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade.

O concreto autoadensável (CAA) é uma mistura de concreto que tem a capacidade de fluir e se compactar por conta própria, preenchendo completamente as formas e espaços vazios, sem a necessidade de vibração externa. O esqueleto

granular refere-se à parte sólida do CAA, composta por agregados e partículas de cimento, onde a pasta de cimento preenche os vazios entre os agregados.

Segundo a ABNT NM 248 (2001) Para determinar o esqueleto granular do CAA, normalmente é necessário realizar análises granulométricas dos agregados utilizados e calcular as proporções adequadas de cada tamanho de agregado. Os agregados são classificados em diferentes tamanhos, como areia, pedregulho e brita, e sua distribuição granulométrica influencia a trabalhabilidade e propriedades finais do concreto.

Tabela 2: Limite da distribuição granulométrica agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2005)

6.2 – DOSAGEM DOS TRAÇOS

A determinação da dosagem de traço para concreto autoadensável (CAA) envolve a seleção adequada das proporções dos materiais (cimento, agregados, água e aditivos) para atingir as propriedades desejadas de fluidez, resistência e durabilidade. Embora a dosagem específica possa variar dependendo dos requisitos do projeto e das características dos materiais disponíveis na região.

Na dosagem do traço foi em base nos ensaios realizados acima, dessa forma foram feitos três traços: traço referência que é utilizado hoje na empresa BP pré-moldados sem a adição de sílica ativa. Já no traço teste 1 foi incorporado a

adição de 5 % sílica como recomenda o fabricante e baixado a proporção de cimento a fim de avaliar a sua trabalhabilidade no estado fresco e verificar também a sua resistência no estado endurecido.

Já no traço teste 2 também foram utilizados a mesma proporção de sílica, mas foi diminuída ainda mais a quantidade de cimento do traço. Ao fim destes testes vai ser comparado os três e avaliar seus custos.

Tabela 3: Dosagem dos traços.

TRAÇO REFERÊNCIA		TRAÇO TESTE 1		TRAÇO TESTE 2	
PRODUTO	1 M ³	PRODUTO	1 M ³	PRODUTO	1 M ³
CIMENTO	336	CIMENTO	313	CIMENTO	307
ADITIVO	2 L	ADITIVO	1,2 L	ADITIVO	1 L
SÍLICA ATIVA	0	SÍLICA ATIVA	15	SÍLICA ATIVA	15
AREIA NATURAL	617	AREIA NATURAL	586	AREIA NATURAL	601
AREIA INDUSTRIAL	235	AREIA INDUSTRIAL	227	AREIA INDUSTRIAL	232
FILLER	108	FILER	94	FILER	97
PEDRISCO	483	PEDRISCO	505	PEDRISCO	518
BRITA	473	BRITA	478	BRITA	490
ÁGUA	188 L	ÁGUA	188 L	ÁGUA	190 L
RELAÇÃO A/C	0,55	RELAÇÃO A/C	0,60	RELAÇÃO A/C	0,60
TEOR DE ARG	53,30 %	TEOR DE ARG	55,50 %	TEOR DE ARG	55%

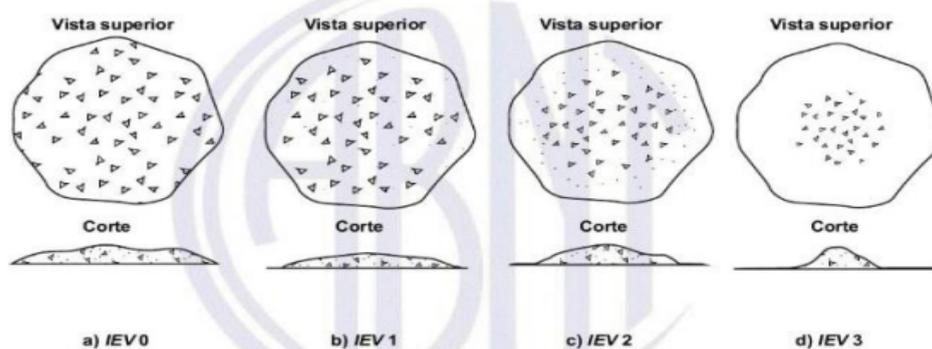
Acervo pessoal, (2023)

6.3 – CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A ABNT NBR 15823-2:2017 determina o ensaio de abatimento slump flow onde pode se observar de forma visual índices de segregação do concreto.

Tabela 4: Classes de índice de estabilidade visual (IEV)

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)



Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017

6.4 ESPALHAMENTO E TEMPO DE ESCOAMENTO

Já a ABNT NBR 15823-1:2017 classifica o escoamento do concreto CAA por medida sempre em milímetros a sua classificação é dada pelo tipo de estrutura a ser concretada. Estruturas com altas taxas de armaduras e pequenos espaços para passagem do concreto exige um abatimento maior para não ocorrer patologias no processo.

Tabela 5: classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

Classe de espalhamento	Espalhamento mm	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável	Lajes Estacas e certas fundações profundas
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017 classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

6.5 ENSAIO DE SLUMP FLOW

O ensaio de Slump Flow conforme a ABNT NBR 18823-2:2017 é um dos principais ensaios utilizados para avaliar a consistência e a fluidez do concreto, incluindo o concreto autoadensável (CAA). Ele mede a capacidade do concreto se espalhar horizontalmente sem qualquer interferência externa. Aqui estão os passos básicos para realizar o ensaio de *Slump Flow*:

- Preparação do equipamento e das amostras:
- Posicione o cone de Abrams em uma superfície plana e estável.
- Molhe o cone com água limpa antes de iniciar o ensaio.
- Prepare a amostra de concreto CAA de acordo com a dosagem determinada.
- Execução do ensaio:
- Coloque o cone de Abrams sobre uma base firme e segure-o firmemente.
- Encha o cone em três camadas iguais, compactando cada camada com um objeto de aço ou com a haste de compactação, aplicando 25 golpes uniformemente distribuídos em cada camada.
- Remova o excesso de concreto do topo do cone usando uma régua limpa.
- Segure firmemente as alças do cone e levante-o verticalmente com um movimento rápido e suave, levando-o para cima sem parar.
- Verifique se o cone de Abrams (ou cone de Marsh) está limpo e seco.
- Imediatamente após a elevação do cone, deixe o concreto fluir livremente, sem qualquer interferência, e observe o espalhamento horizontal do concreto.

Medição do *Slump Flow*:

- Posicione uma régua ao longo do diâmetro máximo do espalhamento horizontal do concreto.
- Meça a distância vertical entre a altura inicial do cone e o ponto mais baixo da superfície do espalhamento horizontal. Esse valor é chamado de *Slump Flow* e é expresso em centímetros.
- O resultado do ensaio de *Slump Flow* fornece informações sobre a fluidez e a trabalhabilidade do concreto, além de indicar se ele atende às

especificações do projeto. O valor do Slump Flow pode variar dependendo dos requisitos do CAA e da aplicação pretendida.

- É importante seguir as normas técnicas específicas do seu país ou região para a execução adequada do ensaio de *Slump Flow* e para a interpretação dos resultados. Essas normas geralmente fornecem procedimentos detalhados, equipamentos necessários e critérios de aceitação para diferentes tipos de concreto.

Imagem 6: Ensaio de *slump flow*.

Traço referência: slump 600 mm Traço 1: slump 670 mm Traço 2: slump 700 mm



Acervo próprio (2023).

Traço referência: Como podemos observar nas imagens acima, nos testes de *slump flow* o traço de referência se encaixou SF 1 onde a norma diz que é ideal para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura. E pode se observar que não ocorreu segregação e nem exsudação. Traço teste 1: Já na segunda imagem, ganhou-se um pouco mais de abatimento elevando para 660 mm se encaixando no SF 2, ideal para maioria das aplicações recorrentes. Pode-se dizer que é a classificação correta para as peças pré-moldadas da empresa BP Pré-moldados.

Traço teste 2: Foi o traço com maior índice de abatimento elevando para 700 mm, houve pequenos indícios de segregação do concreto como podemos observar no centro da imagem, mas ainda sim seria um excelente abatimento para utilizar em peças com grandes taxas de armadura.

6.6 – MOLDAGEM CORPO DE PROVA

ABNT NBR 5738 Determina que a moldagem dos corpos de prova é um procedimento importante para avaliar a resistência do concreto em laboratório. Aqui estão os passos básicos para a moldagem de corpos de prova de concreto:

- Preparação dos materiais:
- Certifique-se de ter todos os materiais necessários, incluindo cimento, agregados, água, aditivos e formas de moldagem.
- Verifique se os materiais estão de acordo com as especificações do projeto e as normas técnicas aplicáveis.
- Limpeza das formas de moldagem:
- Verifique se as formas de moldagem estão limpas e sem acúmulo de concreto endurecido.
- Passe um agente de desmoldagem (como óleo ou desmoldante) nas formas para evitar que o concreto grude durante o processo de cura.
- Mistura do concreto:
- Prepare a mistura do concreto de acordo com a dosagem determinada, respeitando as proporções de cimento, agregados e água.
- Misture os materiais em um misturador adequado até obter uma mistura homogênea e uniforme.
- Verifique a consistência do concreto através de ensaios como o ensaio de Slump Flow ou o ensaio de abatimento.
- Preenchimento das formas de moldagem:
- o concreto nas formas de moldagem preparadas.
- Utilize uma haste de compactação ou vibrador para remover as bolhas de ar e compactar o concreto adequadamente. Certifique-se de preencher completamente as formas, sem deixar vazios ou espaços vazios.
- Acabamento da superfície:
- Nivele a superfície do concreto com uma régua ou colher de pedreiro, garantindo um acabamento liso e uniforme.
- Remova o excesso de concreto das bordas das formas.
- Identificação dos corpos de prova:

- Marque cada corpo de prova com informações relevantes, como a data da moldagem, o número do lote, o tipo de concreto etc.

CURA DOS CORPOS DE PROVA:

- Cubra as formas de moldagem com um material de cura, como plástico ou um composto de cura.
- Proteja os corpos de prova contra a evaporação da umidade e mantenha-os em uma área apropriada para a cura, geralmente em uma câmara úmida ou tanque de água.
- Desmoldagem dos corpos de prova:
- Após o período de cura adequado (geralmente 24 a 48 horas), remova as formas de moldagem dos corpos de prova.
- Tenha cuidado ao desmoldar para evitar danos aos corpos de prova.
- Os corpos de prova moldados devem ser então submetidos a ensaios de resistência à compressão de acordo com as normas técnicas aplicáveis para determinar a resistência do concreto.

Imagem 7: Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Acervo pessoal (2023)

6.7 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O concreto autoadensável (CAA) no estado endurecido apresenta características e propriedades semelhantes ao concreto convencional. No entanto,

devido à sua alta fluidez e capacidade de preenchimento, o CAA pode ter algumas diferenças no estado endurecido em comparação com o concreto convencional. A ABNT NBR 5739 determina o método de ensaio para a compressão dos corpos de prova.

O CAA é projetado para atingir resistência à compressão semelhante ou até mesmo superior ao concreto convencional. A resistência à compressão do CAA é influenciada por vários fatores, como a dosagem do traço, o tipo de cimento, a cura e o processo de endurecimento.

- Resistência à tração: Assim como o concreto convencional, o CAA tem resistência à tração relativamente baixa. Para melhorar a resistência à tração do CAA, podem ser utilizadas fibras de reforço, como fibras de aço ou fibras poliméricas.
- Durabilidade: O CAA é projetado para ter boa durabilidade, como resistência ao ataque químico, ação de agentes agressivos e à carbonatação. A adição de aditivos, a seleção adequada dos materiais e a cura adequada são fatores importantes para garantir a durabilidade do CAA.
- Retração e fissuração: O CAA pode apresentar uma retração similar ao concreto convencional. No entanto, devido à sua alta fluidez e menor necessidade de vibração, o CAA tende a ter menos fissuras decorrentes da segregação interna do concreto.
- Acabamento superficial: O CAA pode proporcionar um acabamento superficial mais liso e uniforme devido à sua capacidade de preenchimento e fluidez. Isso pode resultar em uma superfície com menor necessidade de reparos ou acabamentos adicionais.
- Peso específico: O CAA geralmente tem um peso específico semelhante ao concreto convencional, o que significa que sua densidade é próxima à densidade do concreto tradicional.

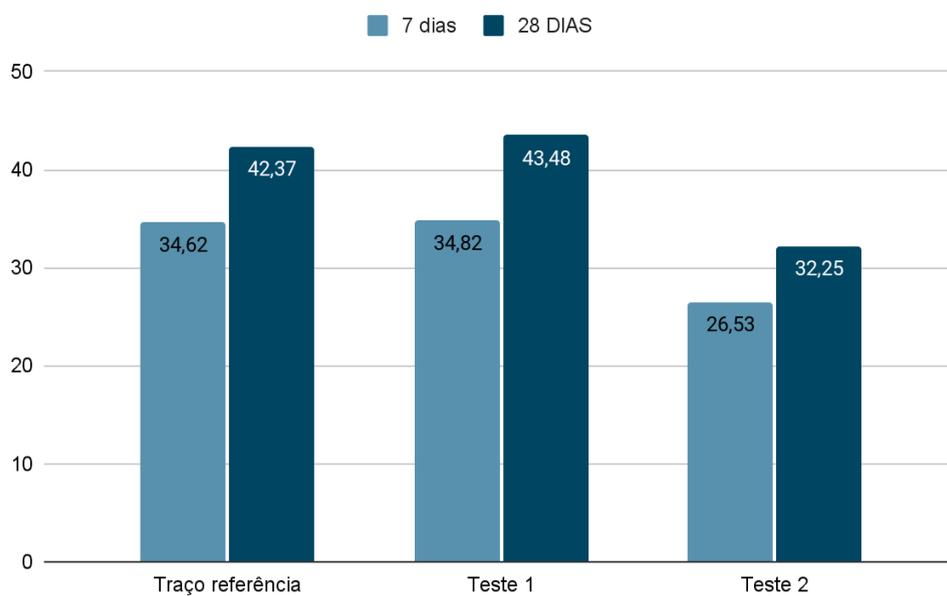
Imagem 8 : Ensaio de compressão corpo de prova cilíndrico



Fonte: Acervo pessoal (2023)

O ensaio de compressão em corpos de prova de concreto é um dos principais métodos utilizados para determinar a resistência à compressão do material. Esse ensaio fornece informações cruciais sobre a capacidade do concreto de suportar cargas de compressão antes de sofrer falhas.

Gráfico 1: resultado do ensaio à compressão.



A ABNT NBR 6118/2014 determina que aos 28 dias o concreto deve atingir a resistência desejada e aos 7 dias deve chegar a 85 %. No resultado do ensaio

podemos observar que somente os traços referência e teste 1 chegaram na resistência desejada se tornando satisfatório.

7 - CUSTOS DO CONCRETO CAA POR METRO CÚBICO

A fim de obter os gastos relativos ao concreto, utilizou-se como base o teste de massa unitária, que permite obter o peso exato dos agregados por metro cúbico. Os preços dos materiais foram considerados com base no que a empresa BP Pré-moldados atualmente paga aos seus fornecedores.

6-Tabela de custo

TRAÇO REFERÊNCIA				TRAÇO TESTE 1				TRAÇO TESTE 2			
Produto	Kg	Preço	total R\$	Produto	Kg	Preço	Total R\$	Produto	Kg	Preço	Total
Cimento	336	0,55	184,80	Cimento	313	0,55	172,15	Cimento	297	0,55	163,54
Aditivo	2	14,50	29,00	Aditivo	1,2	14,50	17,40	Aditivo	1	14,50	14,50
Areia natural	617	0,066	40,72	Areia natural	586	0,066	38,68	Areia natural	601	0,066	39,67
Areia industrial	235	0,056	13,16	Areia industrial	227	0,56	12,71	Areia industrial	262	0,056	12,99
Filler	108	0,054	5,83	Filler	94	0,054	5,08	Filler	97	0,054	5,24
Pedrisco	483	0,054	26,08	Pedrisco	505	0,054	27,27	Pedrisco	518	0,054	27,97
Brita 0	473	0,054	25,54	Brita 0	478	0,054	25,81	Brita 0	460	0,054	26,46
Sílica ativa	0	0	0	Sílica ativa	15	1,2	18	Sílica ativa	15	1,2	18,00
		Total	325,13			Total	317,10			Total	308,37

Fonte: Acervo pessoal (2023)

8 - RESULTADOS

Podemos notar, no primeiro gráfico de ensaio de compressão, que o teste 1 obteve o traço ideal, sendo aquele que melhor se adequou e alcançou resistência com um menor consumo de cimento. Em seguida, é feita uma análise dos dados comparativos presentes na tabela.

ANÁLISE DOS VALORES

TRAÇO REFERÊNCIA	R\$ 325,14
TRAÇO 1	R\$ 317,10
ECONOMIA EM %	2,5 %
ECONOMIA EM R\$	R\$8,04
ECONOMIA SEMANAS	R\$ 1.608,00
ECONOMIA MENSAL	R\$ 6.432,00
ECONOMIA ANUAL	R\$ 70.752,00

9- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da metodologia de Tutikian e Dal Molin (2007), por meio de testes comparativos, possibilitaria encontrar a configuração granular ideal que atende às exigências de qualidade da empresa BP Pré-Moldados. Isso resultaria em uma redução de 7% de cimento por metro cúbico de concreto, ao utilizar apenas 5% de sílica ativa em sua composição. Além disso, o concreto teria uma resistência de 43,48 Mpa aos 28 dias e um consumo de cimento de 313 kg por metro cúbico, considerado relativamente baixo. Vale ressaltar que essa alteração traria uma economia anual de 232.760 kg de cimento.

A redução do cimento não teve impacto negativo no resultado da compressão, visto que no traço 1 permaneceu acima de 35 mpa, conforme proposto no projeto das peças pré-moldadas. Por outro lado, o traço 2 não atingiu o resultado esperado e apresentou sinais de segregação, tornando-o inválido.

O teor de clínquer no CP V ARI pode variar de 90% a 100% de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, o que, se implementado, poderá resultar em uma redução de 131.186,4 kg de CO₂ na atmosfera.

Além de possibilitar a produção de um concreto sustentável e de qualidade, será possível obter uma economia anual de R\$70.750,00 para a empresa. Isso é de grande relevância, considerando que hoje em dia é difícil obter uma margem de lucro expressiva em um mercado altamente competitivo.

Fica como sugestão em trabalhos futuros aumentar ainda mais a dosagem de sílica ativa até 8 %, e com isso obter uma redução de cimento ainda maior podendo

fazer um traço com menos custos e mais sustentável ou mesmo chegar com o concreto em alta resistência próximo aos 100 Mpa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 7212:2021 Concreto dosado em central — Preparo, fornecimento e controle.

ABNT NM 248:2001 Agregados - Determinação da composição granulométrica.

ABNT NM 27:2000 Agregados - Redução de amostra de campo para ensaios de laboratório.

ABNT NM 26:2009 - Amostragem.

ABNT NBR 11768-1:2019 Aditivos químicos para concreto de cimento portland parte 1: requisitos.

ABNT NBR NM 30 Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.

ABNT NBR 16972 -Agregados - Determinação da massa unitária e índice de vazios

ABNT NBR 16973 Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 mm, por lavagem

ABNT NBR NM 49 Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.

ABNT NBR 16916 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.

ABNT NBR NM - 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica
Concreto.

ABNT NBR 5738 Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

ABNT NBR 5739 - Concreto Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

ABNT NBR 15823-1:2017 Concreto autoadensável parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco.

ABNT NBR 15823-2:2017 Concreto autoadensável parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams.

Associação Brasileira do Cimento Portland: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>.

Concreto autoadensável / Bernardo Fonseca Tutikian, Denise Carpena Dal Molin. — São Paulo: Pini, 2008.

Calado C., Camões A., Jalali S., Barkokébas Jr B. Concreto Autoadensável (CAA), Mais do que Alternativa ao Concreto Convencional. editora da Universidade de Pernambuco (EDUPE) p. 29-32 Março. 2016

GOMES, AR BARROS - São Paulo: Pini, 2009

HELENE, P; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. Pini, São Paulo, 1992.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, 2ª. ed., 2014.

Método para dosagem de concretos auto-adensáveis / Bernardo Fonseca Tutikian.– Porto Alegre: PPGECC/UFRGS, 2004.

NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. São Paulo: PINI, 1997.

REBMANN. Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência - São Carlos, 2011.

TUTIKIAN. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto adensáveis / Bernardo Fonseca Tutikian. – Porto Alegre: PPGECC/UFRGS, 2007.

TABELAS

Tabela 1: classe de agressividade ambiental ABNT NBR 15823-1:2017.

Tabela 2: limite da distribuição granulométrica agregado miúdo ABNT NBR 7211(2005)

Tabela 3: limite da distribuição granulométrica agregado graúdo ABNT NBR 7211(2005)

Tabela 4: dosagem dos traços fonte própria (2023).

Tabela 5: classe de índice de estabilidade visual (IEV) ABNT NBR 15823-2:2017

Tabela 6: classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação ABNT NBR 15823-1:2017.