

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIZ JASON BATISTA GOIS PEDRAL

**A INFLUÊNCIA DO CIMENTO EM CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2023

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**A INFLUÊNCIA DO CIMENTO EM CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do
Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Sergipe – Campus Aracaju.

Orientadora: Prof(a). Dra. Carla Cristina
Nascimento Santos Pereira

ARACAJU

2023

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária: Elizabete T. Ramos - CRB-5/1028.
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pedral, Luiz Jason Batista Gois

P371i A Influência do Cimento em Concreto de Pós Reativos com Adição de Óxido de Grafeno. Aracaju/SE. / Luiz Jason Batista Gois Pedral. – Aracaju, 2023.

63 f. : il.

Orientador: Dra. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira. Monografia (Graduação - Engenharia civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1.Oxido de Grafeno. 2. Concreto de Pós Reativos. 3. Concreto de Ultra Alto Desempenho. 4. Microfibras Cintéticas de Reforço Naturall. 5. Resistência I. Pereira, Carla Cristina Nascimento Santos . II. Título.

CDU 69

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

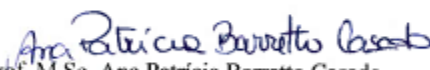
Título da Monografia N° 281

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CIMENTO EM CONCRETOS DE PÓS REATIVOS
COM GRAFENO

LUIZ JASON BATISTA GOIS PEDRAL

Esta monografia foi apresentada às 20h 44 do dia 09 de janeiro de 2024 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. M.Sc. Ana Patrícia Barretto Casado
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Emiliana de Souza Rezende Guedes
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. Dr. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador


Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e pela oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço à minha família, pelo apoio incondicional e pela compreensão durante todo o processo. Agradeço aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e me ajudando. Agradeço aos meus professores, que me transmitiram conhecimento e me ajudaram a me tornar um profissional qualificado. Agradeço especialmente à minha orientadora, Titia Carla, pelo apoio, orientação e trabalho humanizado, sua contribuição foi fundamental para a realização deste trabalho e formação de caráter profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise aprofundada do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD), um material inovador que tem ganhado destaque na construção de estruturas duráveis e eficientes. Inicialmente, são abordadas as características do CUAD, destacando a alta capacidade resistência e a alta fluidez no estado fresco. Em seguida, é discutida a evolução dos estudos do concreto convencional para o CUAD, incluindo o desenvolvimento do concreto de pós reativos e sua transformação em CUAD. Além disso, são exploradas as aplicações mais comuns do CPR (Concreto de Pós reativo) na construção civil, ressaltando sua alta resistência mecânica e baixa permeabilidade, tornando-o um material promissor para a reabilitação de estruturas. O estudo principalmente incluirá uma análise da influência dos diferentes tipos de cimentos encontrados na cidade de Aracaju/SE na mistura do CPR, com adição de óxido de grafeno e microfibras sintéticas de reforço estrutural. Os resultados obtidos fornecem insights valiosos sobre a viabilidade e desempenho do concreto de pós reativo ao variar o tipo de cimento conseguindo chegar a resistências próximas de 80 MPa. Por fim, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre o concreto de pós reativos e sua aplicação prática na construção civil.

Palavras-chave: Óxido de grafeno; concreto de pós reativos; concreto de ultra alto desempenho; Microfibras sintéticas de reforço estrutural; Resistência; Durabilidade; Cimento em Aracaju.

ABSTRACT

This paper presents an in-depth analysis of Ultra High Performance Concrete (UHPC), an innovative material that has gained prominence in the construction of durable and efficient structures. Initially, the characteristics of UHPC are addressed, highlighting high strength capacity and high fluidity in the fresh state. Then, the evolution of studies of conventional concrete to UHPC is discussed, including the development of reactive powder concrete and its transformation into UHPC. In addition, the most common applications of UHPC in civil construction are explored, highlighting its high mechanical strength and low permeability, making it a promising material for the rehabilitation of structures. The study mainly included an analysis of the influence of the different types of cements found in the city of Aracaju/SE on the mixing of RPC, with the addition of graphene oxide and synthetic macrofibers for structural reinforcement. The results obtained provide valuable insights into the feasibility and performance of reactive powder concrete when varying the type of cement. Finally, this work contributes to the advancement of knowledge about reactive powder concrete and its practical application in civil construction.

Keywords: Graphene oxide; Reactive powder concrete; Ultra high performance concrete; Synthetic macrofibers for structural reinforcement; Strength; Durability; Cement in Aracaju.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo Geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
3.1	CONCRETO HPC E UHPC.....	20
3.2	CONCRETO DE PÓS REATIVOS	22
3.3	MATERIAIS	24
3.3.1	CIMENTO PORTLAND	24
3.3.2	SÍLICA ATIVA	24
3.3.3	PÓ DE QUARTZO.....	25
3.3.4	AREIA	25
3.3.5	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	26
3.3.6	FIBRA DE POLIPROPILENO	26
3.4	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	27
3.5	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	28
3.6	PRINCIPAIS TRABALHOS OU PESQUISAS NA ÁREA.....	29
3.7	GRAFENO	30
3.7.1	OBTENÇÃO.....	30
3.7.2	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.....	33
3.7.3	GRAFENO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	35
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	37
4.1	MATERIAIS	37
4.1.1	CIMENTO PORTLAND	37
4.1.2	AREIA	42
4.1.3	PÓ DE QUARTZO.....	43
4.1.4	ADITIVO HIPERPLASTIFICANTE.....	44
4.1.5	SÍLICA ATIVA	45
4.1.6	MACROFIBRAS.....	46
4.1.7	ÓXIDO DE GRAFENO	47
4.2	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	48

4.2.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	48
4.2.2	ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....	50
4.2.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	51
4.2.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....	54
5.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	55
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	56
6	CONCLUSÕES.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação das seções do (a) CPR, (b) aço, © concreto protendido e (d) concreto armado.	14
Figura 2: Estrutura da Passarela de Sherbrooke.	15
Figura 3: Passarela daz paz construída com CPR.....	16
Figura 4: Cobertura do estádio francês Jean Bouin feito com CPR.	16
Figura 5: Ponto de ônibus com cobertura de CPR em Shawnessy no Canadá.....	17
Figura 6: Estrutura em forma de favo de mel do grafeno.....	32
Figura 7: Estrutura do óxido de grafeno proposta por Dékány.	34
Figura 8: Roteiro laboratorial.	37
Figura 9: Cimento CP II F 32 da empresa Poty Cimentos.	38
Figura 10: CP V ARI RS da empresa MIZU Cimentos.	38
Figura 11: Cimento CP II F 32 da empresa MIZU Cimentos.	40
Figura 12: Areia de quartzo.	43
Figura 13: Pó de quartzo.....	44
Figura 14: Aditivo hiperplastificante.....	45
Figura 15: Sílica ativa.....	46
Figura 16: Pó de quartzo.....	47
Figura 17: mesa de consistência (<i>flow table</i>).....	51
Figura 18:Prensa com apoio para ensaio de tração na flexão.	52
Figura 19: Prensa com apoio para ensaio de tração na flexão.	53
Figura 20: Resultados obtidos pelo ensaio de consistência no flow table.....	54
Figura 21: Tabela com valores de resistência a tração nas amostras de CPR.	55
Figura 22: Valores de resistência à compressão nas amostras de CPR.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades químicas do CP-V-ARI-RS	39
Tabela 2: Propriedades físicas do CP-V-ARI-RS.....	39
Tabela 3: Propriedades mecânicas do CP-V-ARI-RS	40
Tabela 4: Propriedades químicas do CP II F 32	41
Tabela 5: Propriedades físicas do CP II F 32	41
Tabela 6: Propriedades mecânicas do CP II F 32	42
Tabela 7: Propriedades físicas da Macrofibra Duristeel FF54	46
Tabela 8: Propriedades típicas das nanofolhas de óxido de grafeno.	48
Tabela 9: Proporções de misturas das amostras de CPR.	49
Tabela 10: Procedimento da mistura do concreto	50

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAUD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
cp	corpo de prova
CP	Cimento Portland
CPR	Concreto de Pós Reativos
NBR	Norma Brasileira
OG	Óxido de Grafeno
OGR	Óxido de Grafeno Reduzido
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	temperatura em graus Celsius
μm	micrômetro
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
d	diâmetro
g	grama
MPa	Mega Pascal
kg	quilograma
km	quilometro
l	comprimento
L	litro
m	metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
mm	milímetro
MPa	mega Pascal
nm	nanômetro

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material prático e versátil, sendo utilizado na construção de estruturas eficientes e duráveis devido às suas características. O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, devido à sua abundância de matérias-primas e ao conhecimento consolidado de sua utilização. No entanto, com o avanço das tecnologias de materiais de construção e a possibilidade de estruturas cada vez mais exigentes, surgem constantemente novos tipos de concreto. Após o concreto convencional que foi o tipo comumente utilizado durante décadas, foram desenvolvidos o concreto de alta resistência, o concreto de alto desempenho e, mais recentemente, o concreto de ultra alto desempenho (UHPC), base desse presente estudo. (SOTO, 2014)

A descoberta desse tipo de concreto se deu em 1995, Richard e Cheyrezy desenvolveram um tipo de concreto com alto desempenho mecânico, denominado Concreto de Pós Reativos. Atualmente, este material é conhecido como Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC), devido à sua elevada resistência mecânica, durabilidade e fluidez.

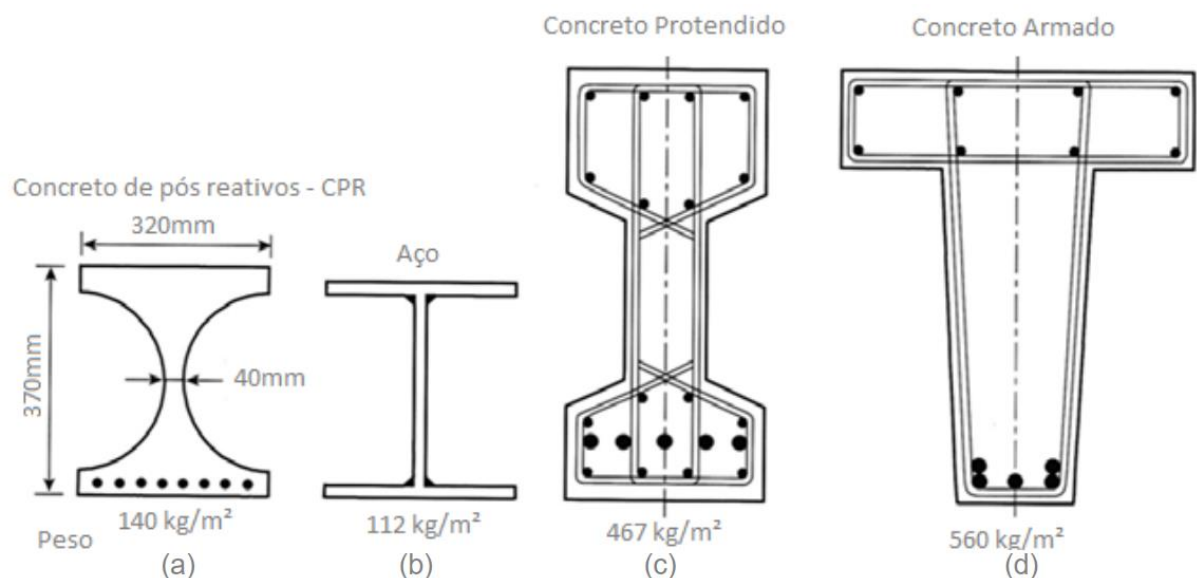
Algum tempo antes disso já no final dos anos 70, surgiram os primeiros registros de um concreto com uma notável resistência à compressão, aproximando-se de 200 MPa. Este desenvolvimento foi liderado por Brunauer e patenteado por H. H. Bache, conforme estudos realizados por Aïtcin (2000). A essência desse material reside na utilização de partículas extremamente finas, como pó de quartzo e sílica ativa, combinadas com aditivos superplastificantes. O foco desse desenvolvimento encontra-se na busca pela menor relação possível entre água e aglomerante, o que já significa alguns indícios dos caminhos a serem buscados através da aplicação do CPR(Concreto de Pós reativo).

O concreto de pós reativos apresenta boa durabilidade, pois é composto de partículas muito finas que formam uma estrutura densa e de baixa porosidade. Essa estrutura dificulta a penetração dos agentes agressivos. A durabilidade do concreto é influenciada pela sua permeabilidade, pois é por meio dela que agentes agressivos, como íons cloreto, íons sulfato e dióxido de carbono, podem penetrar no material. A penetração desses agentes pode ocasionar reações químicas e físicas que reduzem a vida útil do concreto. Dessa forma, O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um material promissor para a reabilitação de estruturas, pois apresenta essa alta resistência mecânica e baixíssima permeabilidade. (VANDERLEI, 2004)

A implementação bem-sucedida desse tipo de concreto requer torná-lo economicamente viável para aplicações no cenário cotidiano da construção. Esse processo implica na transferência efetiva do desenvolvimento alcançado em laboratório para o mercado, de modo a posicionar esses materiais como escolhas práticas e vantajosas para projetos de construção. A partir disso, é importante expor que já existem aplicações dele dentro do mercado, o que mostra grande perspectiva de ampla utilização. (SOTO, 2013)

O Concreto de pós reativos é análogo ao aço da construção por apresentar características semelhantes em vãos, alturas e resistência, porém, nele, com um custo relativamente menor e com uma maior durabilidade. (ISAIA et al, 2011). Na Figura 1 retirada de Soto (2013) é feita a comparação entre um elemento estrutural de concreto de pós reativos e elementos de aço, de concreto protendido e de concreto armado.

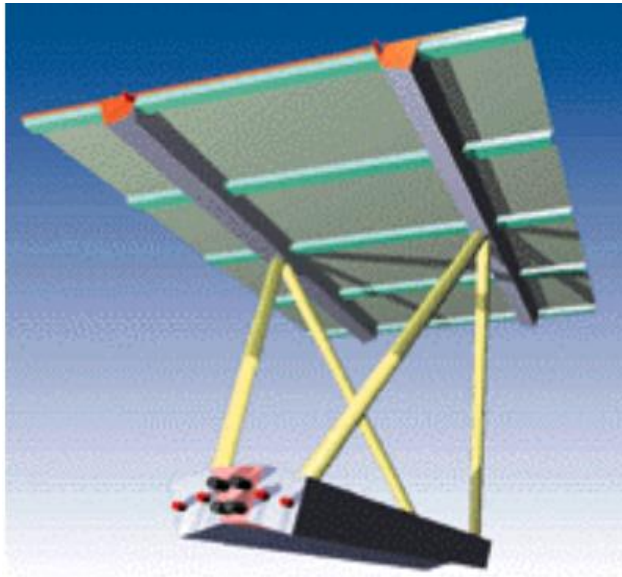
Figura 1: Comparação das seções do (a) CPR, (b) aço, (c) concreto protendido e (d) concreto armado.



Fonte: Soto 2014

As aplicações do concreto de pós reativo são diversas, tendo algumas mais relevantes como a ponte de Sherbrooke no Canadá apresentada na Figura 2, a qual foi a primeira estrutura construída utilizando CPR apresentando uma estrutura treliçada com elementos pré-fabricados resultando em uma passarela para ciclistas com mais de 40 metros de comprimento com um peso muito leve. É importante expor que graças ao uso do CPR foi possível projetar uma estrutura sem armadura passiva. A mistura apresentava o concreto de pós reativo com adições de fibra e uma ótima resistência a compressão de 200MPa.

Figura 2: Estrutura da Passarela de Sherbrooke.



Fonte: Vanderlei (2004)

Outra aplicação sem estruturas de grande porte foi na Passarela de Seonyu, localizada na Coreia do Sul, chamada também de Passarela da paz que é notória pela pequena espessura do seu tabuleiro com apenas 3 centímetros e um arco de sustentação com 120 metros de vão.

Figura 3: Passarela daz paz construída com CPR.



Fonte: Grandes Construções (2018)

Esse tipo de concreto não se restringe a estruturas de grande porte, ele tem grande aplicabilidade em estruturas finas e de casca devido a sua grande resistência. Alguns exemplos disso são: a cobertura estilizada no estádio Jean Bouin na França como exposto na Figura 4.

Figura 4: Cobertura do estádio francês Jean Bouin feito com CPR.



Fonte LAFARGE (2014).

Outra aplicação, agora de casca foi nos pontos de ônibus feitos chapas côncavas de concreto de pós reativos com fibras em Shawnessy no Canadá como exposto na Figura 5.

Figura 5: Ponto de ônibus com cobertura de CPR em Shawnessy no Canadá.



Fonte: Beneton (2014).

Outro campo de aplicação do concreto de pós reativos é na produção de tubos. Outro campo de aplicação do concreto de pós reativos é na produção de tubos de concreto para transporte de água, esgoto e etc, por apresentar altas resistência a flexão, alta energia de fratura, pouquíssima absorção de água, e baixa taxa de corrosão. Utilização para armazenamento de rejeitos é outra premissa interessante do CPR visto suas características de compacidade, conforme estudado por VANDERLEI (2004).

Quando se aplica o óxido de grafeno, que é um material relativamente novo e com muito ainda a ser pesquisado pelo meio acadêmico, percebe-se que ele possui características atrativas para ser um aditivo de compostos cimentícios. Isto se deve por ele ser um nanomaterial de carbono com excelentes propriedades mecânicas e dispersabilidade em água que sugerem que ele pode ser um aditivo promissor para esses materiais. De acordo com Mohammed et al. (2015), o óxido de grafeno apresenta uma elevada área superficial específica, o que pode melhorar a hidratação das partículas de cimento e reduzir a formação de poros. Isso pode levar a melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos compósitos cimentícios. Mohammed et al. (2015) acrescenta afirmando que o OG pode atuar como um ponto de

nucleação para a hidratação do cimento, o que pode aumentar a resistência mecânica do material. Toda essa perspectiva será explicada no referencial teórico posteriormente.

Por último, dado a grande aplicabilidade desse tipo de material e a falta de pesquisas dele com utilização de matéria prima nacional foi idealização a realização desse trabalho para que não só se avalie o desempenho desse tipo de concreto com material nacional, como também analisar a influência do cimento Sergipano nele.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é analisar a influência dos diversos tipos de cimentos comercializados no município de Aracaju/SE dentro da mistura de concreto de pós reativos com adição de óxido de grafeno.

2.2 Objetivos específicos

O planejamento para se atender ao objetivo principal foi atrelado aos seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar e utilizar todos os tipos cimentos comercializados em Aracaju/SE;
- Determinar a consistência das misturas produzidas;
- Aferir a influência da fibra no cimento CP-V-ARI-RS comumente utilizado
- Analisar as resistências à compressão axial no CPR;
- Investigar as resistências à tração na flexão nas amostras do CPR;
- Avaliar a viabilidade da adição de óxido de grafeno em concretos de pós reativos;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CONCRETO HPC E UHPC

Dado as características iniciais e finais, o concreto é tido como o material de construção mais empregado quando se trata de criação das mais diversas estruturas. É amplamente dominado e bem utilizado por todos os setores da construção civil como arquitetos, engenheiros, operários da construção civil, ciêntistas. Com as notáveis evoluções do cálculo estrutural, atrelado ao desenvolvimento de programas computacionais destinados a análise de estruturas, aliados ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto é possível que projetistas especifiquem estruturas de concreto cada vez mais arrojadas com capacidade de resistir a maiores esforços, com menores dimensões e que garantam maior durabilidade.(ISAIA, TUTIKIAN, HELENE, 2011).

Para essas aplicações muitas vezes o concreto convencional (CC) não atende aos requisitos requeridos, ou ainda há sistemas construtivos mais favoráveis técnica e economicamente. A partir dessa realidade, foram desenvolvidas misturas com diferentes composições, com propriedades superiores aos CC com o intuito de obter um ganho em suas qualidades. Esses experimentos geraram os Concretos de Alta Resistência (CAR), Concretos de Alto Desempenho (CAD), e até, de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) que é será o foco deste estudo. O desafio atual que existe é a falta de vinculação entre a cadeia construtiva e o laboratório pelo fato desse tipo de concreto ainda não ser uma opção viável economicamente para obras do cotidiano, o que reduz a inclusão deste dentro do mercado da construção civil (ISAIA, TUTIKIAN, HELENE, 2011).

Os concretos de alto desempenho são caracterizados por uma maior densidade, obtida através da redução da quantidade de água de mistura com o uso de aditivos superplastificantes. Além disso, a adição de componentes finos e ultrafinos, como as adições minerais, tem sido empregada para melhorar a compactação e preenchimento dos vazios entre os grãos, resultando em concretos de ultra alto desempenho com uma densidade ainda maior (Vanderlei, 2004).

O CAD não se trata de uma mistura totalmente nova ou revolucionária, mas sim de uma evolução dos CC (concretos convencionais), utilizando essencialmente as mesmas matérias-primas e os mesmos princípios fundamentais de resistência, trabalhabilidade e durabilidade. No entanto, para alcançar níveis superiores a esses parâmetros, são empregados procedimentos

especiais conhecidos como técnicas de alto desempenho. O concreto de alto desempenho (CAD) é um material que supera as expectativas em termos de desempenho durante o uso na construção, atendendo plenamente às exigências dos proprietários e usuários, de acordo com os projetistas da estrutura de concreto. O conceito de desempenho abrange não apenas a resistência mecânica, mas também características como trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e, acima de tudo, durabilidade (TUTIKIAN et al., 2011).

De modo pragmático, Segundo o ACI (1998), o concreto de alto desempenho foi definido como:

“um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura, lançamento e cura.”

Decorrido algum tempo a definição tornou-se mais arrojada, todavia, ainda muito vaga. Por Aïtcin (2007), o concreto de alto desempenho (CAD) teve uma nova definição, no qual destaca que suas características específicas são aprimoradas por meio de uma seleção cuidadosa e proporção adequada de seus componentes. Apesar de reconhecer que é uma definição ampla, o autor enfatiza que ela proporciona uma compreensão de que não existe um único tipo de CAD, mas sim uma diversidade de novos tipos de concreto de alta tecnologia, cujas características podem ser ajustadas de acordo com as condições específicas da indústria.

Do mesmo modo, de acordo com Tutikian et al. (2011), a especificação do concreto de alto desempenho em relação aos concretos convencionais está associada principalmente ao seu desempenho mecânico e durabilidade. Além disso, ele prediz que o CAD oferece a possibilidade de redução do peso próprio das estruturas devido à diminuição das seções, especialmente em elementos submetidos à compressão.

3.2 CONCRETO DE PÓS REATIVOS

No decorrer da década de 1970, Brunauer realizou o desenvolvimento de um concreto que alcançou uma resistência à compressão de aproximadamente 200 MPa, sendo esse concreto patenteado por H. H. Bache (AÏTCIN, 2000). O princípio desse material consiste na utilização de partículas finas, como o pó de quartzo e a sílica ativa, juntamente com aditivos superplastificantes, com o intuito de atingir a menor relação água/aglomerante possível.

Em estudos conduzidos na França e no Canadá durante os anos 1990, foi criado o concreto de pós reativos como uma opção alternativa ao concreto de alto desempenho (CAD). Esse novo tipo de concreto apresenta uma resistência impressionante, podendo atingir até 800MPa, em comparação com os 120MPa do CAD e os 60MPa do concreto convencional (Vanderlei, 2004).

Como produto dos estudos realizados, o conceito de concreto de pós reativos (CPR) surgiu na França por meio de pesquisas realizadas por Pierre Richards, ex-diretor científico da empresa francesa Bouygues, que é reconhecido como o inventor desse tipo de concreto por estudá-lo por quase 10 anos. As investigações sobre o concreto de alto desempenho (CAD) realizadas por Richards desde 1982 serviram como base para o desenvolvimento do CPR. Posteriormente, em parceria com as empresas francesas Lafarge e Rhodia, foram incorporadas fibras e aditivos especiais para a produção de concreto com fibras de ultra-alto desempenho, conhecido como BFUP (Béton Fibrés à ultrahauts performances) em francês. Nos dias de hoje, esse tipo de traço de CPR é comercializado sob patente registrada com o nome de Ductal (Tutikian et al., 2011).

Dentre as misturas de concretos de pós reativos amplamente reconhecidas, destacam-se também as desenvolvidas pelo Dr. Benjamin Graybeal. Este, é um renomado pesquisador na área, que também investigou traços característicos patenteados no mercado, como o Ductal da empresa Lafarge (Russell e tal., 2013).

Em contraste com os concretos convencionais, o concreto de pós reativos (CPR) não contém agregado graúdo, sendo composto por partículas de tamanho médio de aproximadamente 0,20 mm, o que o caracteriza mais como uma argamassa do que um concreto em termos granulométricos. No entanto, devido às suas propriedades superiores ao concreto convencional, o termo "concreto" ainda é utilizado para descrevê-lo (Tutikian et al., 2011). Além da ausência de agregado graúdo, o CPR apresenta outras características distintas dos

demais concretos, como uma maior quantidade de cimento, sílica ativa e a presença predominante de materiais em pó. Além disso, destaca-se a baixíssima relação entre a quantidade de água e a quantidade de aglomerantes na mistura (Biz, 2001).

Do mesmo modo, em conformidade com Repette (2005), os concretos de pós reativos podem ser considerados mais próximos de uma argamassa do que de um concreto tradicional devido à ausência de agregados graúdos. No entanto, os autores afirmam que, embora seja um material estrutural, os princípios de produção do concreto de pós reativos são aplicáveis às mesmas etapas do processo de produção dos concretos convencionais, incluindo mistura, transporte, lançamento, adensamento e endurecimento. Essa semelhança no processo de produção possibilita a obtenção de propriedades que geralmente são superiores às dos concretos convencionais, justificando assim a nomenclatura deste material compósito como concreto de pós reativos.

Richard e Cheyrezy (1996) obtiveram um concreto de pós reativos (CPR) de resistência à compressão extremamente alta, atingindo 810 MPa, por meio da aplicação de pressão durante o processo de endurecimento, cura térmica a 250 °C e utilização de fibras e agregados de aço. É importante destacar que para alcançar essa resistência tão elevada, é necessário consumo de cimento considerável, podendo ultrapassar os 700 kg/m³.

No que tange às características que garantem a durabilidade dos materiais à base de cimento Portland, estes estão diretamente relacionados à sua permeabilidade, uma vez que é por meio desse mecanismo que os agentes agressivos, como os íons cloreto, íons sulfato e dióxido de carbono, penetram no material (SANJUAN & MARTIALAY, 1997). A presença desses agentes pode resultar em reações químicas e físicas que comprometem a capacidade do concreto de alcançar a vida útil projetada (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

De acordo com Richard (1996), o conceito fundamental do concreto de pós reativos (CPR) é a busca por um material com a menor quantidade possível de defeitos, como microfissuras e poros, o que resulta em uma estrutura capaz de resistir a tensões mais elevadas. Isso é alcançado através do aumento da capacidade de resistência dos materiais constituintes e da obtenção de maior durabilidade. Seguindo essas diretrizes, é possível produzir concreto com partículas variando de 0,5µm a 2mm, resultando em uma mistura de alta densidade com mínimos espaços vazios no interior do concreto.

3.3 MATERIAIS

3.3.1 CIMENTO PORTLAND

A seleção do cimento Portland para o concreto de pós reativos é influenciada pela sua composição, quantidade de finos e compatibilidade com o aditivo superplastificante. É preferível escolher um cimento com menor quantidade de finos e alta pureza, que exigem mais água para hidratação. A utilização de um CP com alto módulo de sílica é indicado devido suas características reológicas, mas sua taxa lenta de pega pode ser um limitante (BIZ, 2001). A partir dessa perspectiva, é indicado por Soto (2014) que o cimento Portland comum (CP-I) é muito indicado para o CPR, embora hoje o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) seja mais utilizado por alguns autores. Quanto ao superplastificante, é importante determinar o ponto de saturação para garantir seu efeito na mistura. A adição máxima de aditivo reduz a relação água/cimento, melhorando as propriedades mecânicas do concreto.

3.3.2 SÍLICA ATIVA

De acordo com ISAIA et al. (2011), a sílica ativa é fundamental dentro da mistura do CPR sua utilização como adição mineral para a produção de concreto de pós reativos (CPR) é baseada em sua forma arredondada e tamanho, que podem ser até 100 vezes menores que o cimento. Devido a dimensão de suas partículas, seu uso é justificado pelo preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento, pelo aumento das propriedades reológicas, pela produção de hidratos secundários, entre outros.

Não obstante, segundo Vanderlei (2004), o tamanho das partículas da sílica ativa também contribui para a diminuição da exsudação interna e superficial, tendo impacto significativo na microestrutura e na zona de transição entre a pasta e o agregado, bem como entre a pasta e a armadura. No concreto de pós reativos, a proporção de sílica ativa em relação ao cimento é geralmente de cerca de 0,25. Essa taxa favorece um empacotamento mais eficiente e se aproxima da quantidade necessária para consumir a cal produzida pela hidratação do cimento. Além disso, no CPR, a hidratação do cimento Portland não é totalmente concluída, e a sílica excedente desempenha o papel de microfiller. (VANDERLEI, 2004).

3.3.3 PÓ DE QUARTZO

Dentro da mistura do CPR o pó de quartzo é utilizado como um fíler. Este, trata-se um pó fino, de cor branca, com alto teor de pureza, constituído por mais de 99% de dióxido de silício, em sua grande parte cristalino (FÁVERO, 2016).

O concreto de pós reativos incorpora pó de quartzo com o objetivo de otimizar a compactação dos materiais. Para esse fim, as partículas do pó de quartzo devem ter um tamanho na faixa de 5µm a 25µm, apresentando um valor médio de 10µm, sendo assim da mesma classe granulométrica que o cimento portland. A partir disso, ao ser adicionado, o pó de quartzo preenche os espaços vazios que existem entre os grãos de areia e também intensifica as reações pozolânicas durante o processo de tratamento térmico (BIZ, 2001; VANDERLEI, 2004).

3.3.4 AREIA

A areia é o agregado miúdo que possui o maior diâmetro máximo dentro da mistura do concreto de pós reativos (CPR) e essa escolha é justificada pela busca de menor permeabilidade e melhor homogeneização dos materiais na mistura (BIZ, 2001). Dito isso, é importante definir que a granulometria desempenha um papel fundamental no concreto de pós reativos, visto que é crucial que ela seja cuidadosamente definida para evitar a formação de vazios na mistura. (RICHARD & CHEYREZY, 1995).

A areia utilizada no CPR deve compreender um diâmetro médio de 250µm, sendo geralmente respeitados os limites entre 150 e 600µm. A escolha do tipo de areia varia, pode ser realizada através do peneiramento de pedra britada ou pela extração de agregado miúdo natural, sendo que a primeira opção resulta em grãos altamente angulares, enquanto a segunda possui grãos mais arredondados. Ambas são adequadas para a produção de CPR, porém o uso do agregado miúdo natural é preferível, pois requer um consumo ligeiramente menor de água, o que é um ponto importante no CPR e nos concretos como um todo. (VANDERLEI, 2004).

No que se trata do módulo de finura das areias utilizadas na composição do concreto de pós reativos, tem-se que, segundo AITCIN (2000), o agregado miúdo utilizado no concreto de alto desempenho (CAD) deve ter um módulo de finura entre 2,7 e 3,0, indicando um agregado miúdo mais grosso. Essa característica é vantajosa, considerando que o CAD, assim como o CPR que é um concreto de ultra alto desempenho, já possuem uma grande quantidade de

partículas finas. Ao utilizar uma areia mais grossa, é possível reduzir a relação água/materiais secos na mistura, reduzindo-se assim também a água/cimento, o que resulta em um aumento na resistência do concreto.

3.3.5 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante desempenha um papel fundamental no concreto de pós reativos, pois permite reduzir ao máximo a relação água/cimento (a/c) sem comprometer a consistência (relacionada à relação água materiais/secos, de fato), uma vez que a sua necessidade se dá pela quantidade de finos da mistura e quantidade de água que seria necessário para atender essa quantidade de finos ser igualmente alta, dessa forma, a adoção de um superplastificante é de extrema importância para a preservação das qualidades esperadas no CPR. A dosagem adequada do superplastificante é determinada experimentalmente e pode ser influenciada pelo tipo de cimento utilizado. Para esse fim, são realizados ensaios de compatibilidade, como o cone de Minislump e o cone de Marsh, conforme destacado por Soto (2014).

Num consenso geral, a aplicação do aditivo superplastificante se deve pela combinação de alguns fatores como o aumento da trabalhabilidade do concreto sem a mudança da composição, a diminuição da relação água/cimento e, conseqüentemente, o aumento da resistência e durabilidade, além da redução da quantidade do cimento para minimizar os efeitos de retração e tensões internas (RICHARD & CHEYREZY, 1995).

3.3.6 FIBRA DE POLIPROPILENO

O CPR é comumente produzido utilizando microfibras de aço, que têm o propósito de melhorar a ductilidade do material. Neste estudo, optou-se por empregar microfibras poliméricas, as quais possuem um módulo de elasticidade menor em comparação às fibras de aço geralmente utilizadas e contribuem de forma limitada para aprimorar a ductilidade e resistência à tração do concreto. No entanto, essas fibras poliméricas podem auxiliar na redução dos efeitos de retração, que são comuns em concretos com elevados teores de cimento, como ocorre no CPR (ANDRADE, 2015). De forma semelhante, Vanderlei (2004) acrescenta que essas microfibras têm um comprimento de 6 mm e um diâmetro de 12 μm , sendo comumente empregadas para minimizar a ocorrência de fissuras de retração plástica no concreto em sua

fase fresca. Quando o concreto atinge a fase endurecida, essas fibras podem prolongar a resistência ao fogo, uma vez que se fundem, deixando pequenos espaços vazios que permitem a dissipação da pressão de vapor.

3.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Certas características distintas podem ser observadas no CPR (Concreto de Pós Reativos) durante o seu estado fresco. De acordo com os estudos realizados com este tipo de material constatou-se que o CPR exhibe uma consistência extremamente baixa, permitindo que o material flua facilmente sem a necessidade de compactação adicional (BITTENCOURT et al., 2017). Além disso, é evidente sua elevada viscosidade e consistência devido à baixa relação água/cimento e à utilização de superplastificantes, o que possibilita a moldagem em formas complexas e o preenchimento de espaços estreitos sem a necessidade obrigatória de vibrador.

É importante destacar também que esse concreto de ultra alto desempenho apresenta uma menor tendência à segregação devido à baixa quantidade de água e à presença de finos, quando comparado ao concreto convencional, o que contribui para a manutenção da homogeneidade do concreto (ISAIA, TUTIKIAN, HELENE, 2011). Vale ressaltar que as características mencionadas podem variar de acordo com a formulação específica do UHPC e os aditivos utilizados.

No que diz respeito ao teor de ar incorporado, o concreto de pós reativos pode apresentar um teor de ar incorporado maior em comparação ao concreto convencional. Essa característica pode ser atribuída à presença do aditivo superplastificante, conforme explicado por Soto (2013), que facilita a formação de bolhas de ar durante a mistura mecânica, resultando em maiores valores de teor de ar incorporado. Devido à viscosidade plástica do concreto de pós reativos, foi observada uma dificuldade na liberação do ar aprisionado, o que pode ter levado à sua acumulação na superfície, mesmo com a realização do adensamento.

Por fim, as melhores propriedades obtidas no estado fresco do CPR concedem a ele benefícios também na parte estética e de acabamento da estrutura pela sua diminuição das falhas de concretagem o que acarreta em prejuízo para obra (AÏTCIN, 2000).

3.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

O Concreto de Pós Reativos (CPR) destaca-se pela sua alta resistência mecânica com um bom desempenho estrutural, baixa porosidade e alta densidade, alta durabilidade, boa resistividade elétrica e baixa permeabilidade (SOTO, 2013).

No que se trata de resistência mecânica o CPR apresenta valores superiores comparados ao concreto convencional. Segundo estudos realizados por Silva et al. (2017), o CPR apresenta uma elevada resistência à compressão e à flexão, o que o torna adequado para aplicações que demandam alta capacidade de suporte de carga. Através da otimização da composição e do processo de cura, é possível obter resistências superiores a 200 MPa, conferindo ao CPR um desempenho estrutural excepcional. Segundo AITCIN (2000) isso se deve pela microestrutura ser compacta e principalmente pela zona de transição, fenômeno tido como uma zona de fragilidade em concretos com agregados graúdos, ser praticamente inexistente.

Quando trata-se da estrutura compacta que o CPR apresenta é importante destacar sua relevância por ser um material de baixa porosidade e alta densidade. Essa característica está ligada a sua durabilidade de forma que, segundo Ishikawa (2010) (POR SOTO, 2013), um concreto que apresente uma absorção inferior a 6% é um concreto convencional de grande durabilidade. Dessa forma, como o CPR apresentou valores quase 5 vezes menor em relação à absorção que o concreto convencional nas pesquisas realizadas por Soto (2013), é possível concluir que o Concreto de pós reativo agrega uma grande compacidade à estrutura, característica intrínseca à durabilidade.

No que diz respeito a Durabilidade, é importante vincular que esta característica nos materiais à base de cimento Portland está estreitamente ligada à permeabilidade, que é o mecanismo responsável pela entrada de agentes agressivos (Sanjuan e Martin, 1997). A penetração desses agentes pode resultar em reações químicas e físicas que comprometem a vida útil do concreto (Mehta e Monteiro, 2008). No caso do concreto de pós reativos, sua durabilidade provavelmente é favorecida devido ao princípio do empacotamento de partículas finas, resultando em uma estrutura densa e com baixa porosidade, o que dificulta a ação de agentes patológicos. No entanto, são escassos os estudos específicos nessa área que investigam o processo de degradação das estruturas nesse material, o que se torna um dos objetivos deste trabalho (SOTO, 2013).

Uma outra característica relevante é a resistividade elétrica que desempenha um papel fundamental no acompanhamento da corrosão das estruturas de concreto, pois está relacionada ao controle do fluxo de íons que se difundem no interior do concreto (Helene, 1993). Segundo Soto (2013), o concreto de pós reativos apresenta valores de resistividade maior que o do concreto convencional, podendo chegar a ser 2,3 vezes maior.

3.6 PRINCIPAIS TRABALHOS OU PESQUISAS NA ÁREA

De acordo com Aitcin(2000) e Richard (1996), as propriedades de resistência do concreto de ultra alto desempenho (CPR) colocam esse material em uma posição intermediária entre o concreto convencional e o aço, o que requer que os projetistas repensem as formas estruturais e as metodologias de projeto e dimensionamento para aproveitar ao máximo as qualidades que o CPR tem para oferecer. Essas propriedades permitem a criação de estruturas ou elementos com grande liberdade de definição geométrica.

De forma semelhante, de acordo com Miranda (2008), o concreto de pós reativos (CPR) se destaca como um material extremamente versátil, posicionando-se entre os concretos de ultra alto desempenho. Sua aplicação tem sido amplamente explorada em diversos contextos, como a construção de estruturas leves, tabuleiros para pontes, vigas, colunas, pré-fabricados de túneis, placas de revestimento de fachada e passarelas. Além disso, o CPR tem demonstrado potencial em outras áreas da construção civil, incluindo obras hidráulicas e de saneamento, armazenamento de rejeitos radioativos e peças para indústrias mecânicas, nas quais são necessárias elevada resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade.

No caso de estruturas já construídas com CPR, existem alguns casos famosos no Canadá. A passarela em Sherbrooke, uma ponte para pedestres e ciclistas sobre o rio Magog, por exemplo, na qual as armaduras passivas tradicionais do concreto armado foram substituídas por fibras de aço de pequenas dimensões. Ela foi construída ainda em meados dos anos 90 e possui um comprimento de vão de 56 metros e é constituída de concreto de pós reativo encapsulado em tubos metálicos de paredes finas (SOTO, 2013). Outra obra que utilizou do concreto de pós reativo foi a estação de trem na cidade de Shawnessy, também no Canadá. Nessa, foram utilizadas cascas côncavas de concreto sem a presença de nenhum tipo de armadura, apenas fibras.

A produção de tubos para transporte de água, efluentes de esgoto e outros líquidos do saneamento básico, é uma das oportunidades de utilizar o CPR pelo fato deste ter um alto custo porém suas características agregarem a utilização nesse nicho, pois garante menor permeabilidade, redução do tempo de manipulação e instalação, peças leves que facilitam transporte, etc (Vanderlei, 2004).

Outro destino que ainda está sendo muito estudado é na utilização para armazenamento de rejeitos radioativos. A partir de um estudo de Torrenti (1996), o concreto de pós reativos (CPR) é um material adequado para a fabricação de Contêineres de Alta Integridade (CAI) utilizados no armazenamento de rejeitos radioativos. O CPR apresenta baixa porosidade, excelentes propriedades mecânicas e é de fácil fabricação, tornando-se uma escolha viável para garantir a integridade e durabilidade dos contêineres. O concreto de pós reativos surge como uma opção viável para diversos tipos de projetos na área da construção civil, incluindo obras hidráulicas, de saneamento e estruturas para armazenamento de rejeitos radioativos, entre outros (Vanderlei, 2004).

Outra construção que ganhou notoriedade foi a Passarela da Paz, em Seul, na Coreia do Sul. Ela se destaca pelo uso do CPR que agrega pequenas espessuras de concreto em seu tabuleiro, com impressionantes 3 cm, arco de sustentação de 123 metros de vão (ISAIA, TUTIKIAN, HELENE, 2011). De acordo com Graybeal (2013), conforme uma pesquisa realizada pela FHWA, no período de 1997 a 2013, aproximadamente 105 estruturas, abrangendo principalmente o setor de infraestrutura, como vigas de pontes, passarelas, barreiras de proteção e juntas construtivas, foram construídas globalmente utilizando concreto de pós reativos (CPR).

3.7 GRAFENO

3.7.1 OBTENÇÃO

De acordo com Martínez et al. (2013), com o crescente interesse da ciência de materiais na nanotecnologia, há uma demanda em expansão por novos produtos que possam agregar e melhorar as características dos materiais existentes. Entre esses materiais, destacam-se aqueles à base de carbono. O carbono é considerado um dos materiais mais abundantes, podendo ser encontrado na forma de grafite, diamante ou carbono amorfo. Além disso, é possível sintetizá-

lo em nanoestruturas, como nanotubos e grafeno, que apresentam características promissoras em diversas áreas (Martínez et al., 2013).

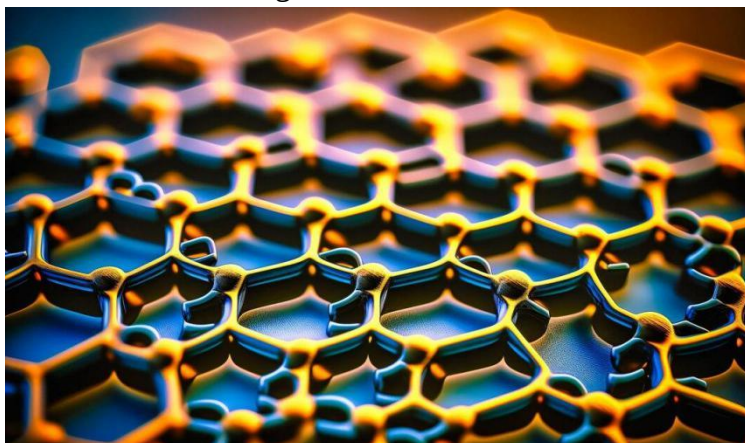
Segundo Yuan et al. (2014) e Narksitipan e Thongtem (2014), o carbono, além de ser abundante e versátil, pode assumir diversas estruturas dependendo dos métodos de síntese utilizados, resultando em diferentes características para o produto final. Essas estruturas incluem fulerenos, nanotubos de carbono, diamante, grafite e grafeno. Cada uma dessas formas possui propriedades distintas e aplicações específicas na área da nanotecnologia.

O grafeno é um material relativamente novo que apesar de muito recente e ainda pouco difundido é muito visado pela ciência de materiais por se apresentar promissor devido a suas características. No ano de 2004, pesquisadores renomados do Centro de Nanotecnologia da Universidade de Manchester, sob a liderança dos cientistas André Geim e Konstantin Novoselov, alcançaram um marco importante ao isolar pequenos fragmentos de grafeno a partir do grafite.(NOVOSELOV et al., 2004). Essa conquista abriu caminho para a exploração de novas possibilidades no estudo e desenvolvimento do grafeno e tal avanço representa um marco significativo na área da nanotecnologia e tem despertado grande interesse científico e industrial.

Conforme mencionado por Ding et al. (2012), a obtenção de grafeno a partir do grafite pode ser realizada por vários métodos, incluindo vapor químico, crescimento epitaxial e exfoliação micromecânica do grafite, entre outros. No entanto, de acordo com os autores, o método mais eficiente para produção em grande escala é a modificação química do grafite. Esse processo envolve a reação do grafite com agentes oxidantes fortes, seguida da esfoliação por meio de ultrassom, resultando na formação do óxido de grafeno (OG). Posteriormente, o óxido de grafeno pode ser reduzido quimicamente ou termicamente, resultando no óxido de grafeno reduzido (OGR).

No campo dos nanomateriais, o estudo do grafeno tem sido de grande relevância. Novoselov et al. (2004) conseguiu obter grafeno em laboratório por meio da esfoliação micromecânica do grafite. O grafeno é uma monocamada plana de átomos de carbono interligados, com hibridização em sp^2 , formando uma estrutura bidimensional que se assemelha a uma rede de favo de mel.

Figura 6: Estrutura em forma de favo de mel do grafeno.



Fonte: freepik (2023)

De acordo com Orcutt (2013), atualmente, a caracterização e o posicionamento de múltiplos grafenos têm se mostrado um desafio. No entanto, a nanotecnologia e a nanoengenharia estão desenvolvendo métodos de síntese, separação e posicionamento dessas estruturas. Esses avanços estão viabilizando a implementação de novas tecnologias e aplicações relacionadas ao grafeno. Conforme mencionado por Babak et al. (2014), um produto derivado da síntese do grafeno é o óxido de grafeno (OG), que apresenta características ainda mais atraentes para a indústria da construção civil. O OG é sintetizado por meio da esfoliação do grafite, que pode ser realizada por meio de uma suspensão coloidal, seguida de esfoliação mecânica, química ou eletroquímica.

De acordo com Edwards et al. (citado por Caires, 2015), o óxido de grafeno (OG) pode adquirir uma variedade de características em seu produto final, dependendo do método de síntese utilizado. Geralmente, o OG é preparado por meio da oxidação de flocos de grafite. Esse processo confere ao OG propriedades de hidrofiliabilidade, dispersibilidade e compatibilidade com diversas matrizes poliméricas.

Conforme destacado por Shamaila et al. (2016), as características do óxido de grafeno (OG) dependem tanto do grafite de partida quanto das condições de reação durante a síntese, como o tempo de oxidação, a temperatura e os agentes oxidantes utilizados. Esses fatores exercem uma forte influência sobre a reatividade e as propriedades dos materiais resultantes. Desse modo, ao elaborar um produto com OG, é crucial ter um bom conhecimento da qualidade do grafite utilizado, do processo de síntese do grafeno a partir dele e, consequentemente, do processo de oxidação envolvido.

3.7.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

O grafeno tem sido amplamente reconhecido como uma promissora alternativa ao silício e ao diamante devido às suas notáveis propriedades eletrônicas, mecânicas e térmicas, além de apresentar alta condutividade. No entanto, embora existam diversos métodos de síntese disponíveis, ainda é necessário otimizar a produtividade e reduzir os altos custos associados a esse processo. Além disso, os métodos de caracterização modernos exigem a transferência do grafeno para um substrato específico, o que pode comprometer a eficiência dessa etapa. Portanto, a ciência está em busca do desenvolvimento de novos métodos de identificação rápidos e eficazes para superar as limitações inerentes à produção desse material (Novoselov et al., 2012).

Ainda sobre essas limitações atuais, é incontestável que as notáveis propriedades do grafeno proporcionam uma ampla gama de possibilidades em aplicações científicas e industriais. No entanto, atualmente, as etapas de caracterização e posicionamento de múltiplos grafenos representam um desafio significativo. Sua estrutura possui propriedades únicas, como alta resistência à fratura, alto módulo de Young e alta condutividade térmica, aproximadamente $5 \times 10^3 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ (Ding et al., 2012). Felizmente, a nanotecnologia e a nanoengenharia estão avançando no desenvolvimento de métodos de síntese, separação e posicionamento dessas novas estruturas, tornando viáveis os avanços que podem ser implementados futuramente (Orcutt, 2013).

Ainda que o grafeno apresente grande potencial, existem algumas limitações. De acordo com Saafi et al. (2015), é importante considerar que o grafeno não possui uma dispersão eficiente em líquidos devido à sua alta superfície e energia superficial. Essa característica resulta na aglomeração das partículas de grafeno, o que pode levar à diminuição dos efeitos desejados em muitos trabalhos. Por essa razão outros produtos derivados do grafeno são postos em evidência, como é o caso do óxido de grafeno.

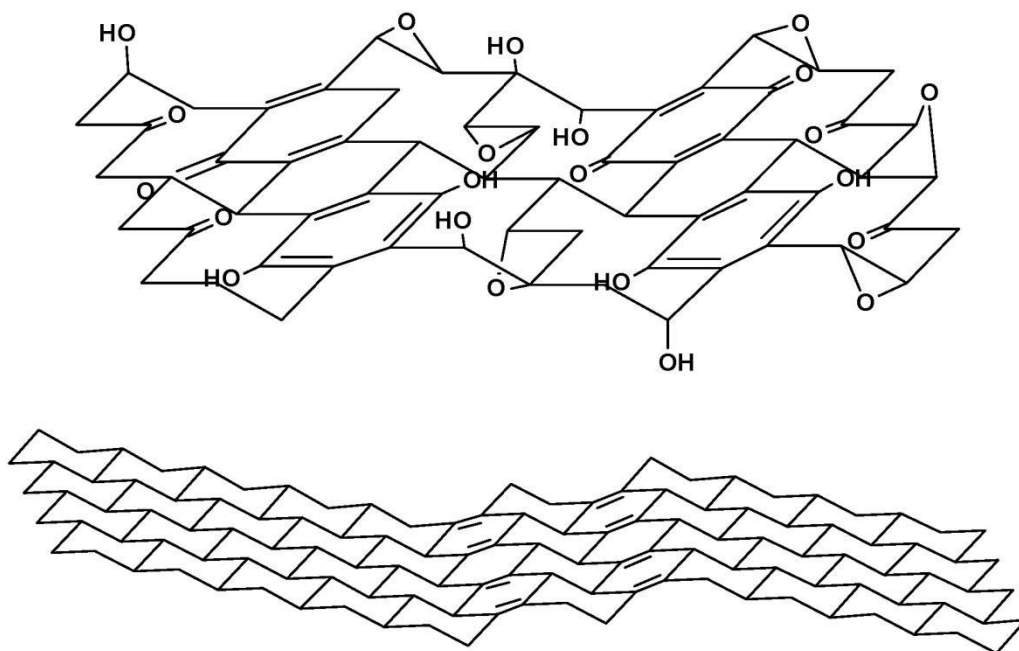
De acordo com Wick et al. (2014), os óxidos de grafeno oferecem vantagens em relação ao grafeno, como uma melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso. Do mesmo modo, como exposto por Vieira e Vilar (2016), o óxido de grafeno é uma forma de grafeno que contém grupos funcionais de oxigênio em sua superfície como representado na Figura 7. Essa estrutura

única confere ao grafeno várias propriedades superiores, como alta condutividade elétrica e térmica, boa transparência, boa resistência mecânica, flexibilidade intrínseca e uma área superficial específica considerável.

Por outro lado, os óxidos de grafeno são estruturas derivadas do grafeno que possuem grupos funcionais oxigenados, como hidroxila, carbonila e epóxi, presentes em sua superfície e extremidades. Esses óxidos de grafeno apresentam vantagens em relação ao grafeno, como melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso (WICK et al., 2014).

De acordo com Wick et al. (2014), os óxidos de grafeno oferecem vantagens em relação ao grafeno, como uma melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso. Do mesmo modo, de acordo com Vieira e Vilar (2016), o óxido de grafeno é uma forma de grafeno que contém grupos funcionais de oxigênio em sua superfície como representado na Figura 7. Essa estrutura única confere ao grafeno várias propriedades superiores, como alta condutividade elétrica e térmica, boa transparência, boa resistência mecânica, flexibilidade intrínseca e uma área superficial específica considerável.

Figura 7: Estrutura do óxido de grafeno proposta por Dékány.



Fonte: DREYER (2009)

Após a oxidação, as folhas de óxido de grafeno (OG) tornam-se densamente oxigenadas, contendo grupos funcionais, como hidroxila e epóxi, em seus planos basais, e grupos carbonila e carboxila nas bordas das folhas (Lerf et al., 1998). Essa presença de grupos funcionais confere ao OG uma natureza hidrofílica e excelente capacidade de dispersão em água (Stankovich et al., 2006). De acordo com Stankovich et al. (2006), a esfoliação do óxido de grafeno é o método mais estável para produzir suspensões de folhas bidimensionais de carbono. O óxido de grafeno apresenta um módulo de elasticidade de aproximadamente 1,0 TPa e uma área superficial específica em torno de 2.630 m²/g, o que o torna vantajoso em relação a outros produtos nanomateriais existentes atualmente (Rehman et al., 2018).

3.7.3 GRAFENO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O óxido de grafeno tem se destacado como um nanomaterial de grande importância para ser utilizado como adição cimentícia. Isso se deve aos inúmeros benefícios que oferece às propriedades dos materiais cimentícios.(SHARMA; KOTHIYAL, 2016). De acordo com Marcondes (2012), pesquisas realizadas nas áreas de cimento e nanotecnologia têm demonstrado que algumas adições de nanocompósitos ao cimento permitem modificações importantes na sua microestrutura, o que por sua vez proporciona compostos cimentícios com uma estrutura mais resistente e durável e menos porosa. Isso ocorre porque o óxido de grafeno atua como agente de preenchimento de vazios, promovendo a nucleação e facilitando a formação de produtos de hidratação. Além disso, sua presença possibilita uma distribuição mais uniforme desses produtos (CHU et al., 2020).

Pesquisas recentes têm apontado os óxidos de grafeno como uma alternativa vantajosa em relação ao grafeno devido à sua melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso (WICK et al., 2014). Nesse contexto, o óxido de grafeno tem sido objeto de amplos estudos, especialmente no campo dos materiais cimentícios (BARBOSA, 2015). Estudos realizados por Pan et al. (2015) sugerem que o óxido de grafeno possui excelente dispersibilidade em água e notáveis propriedades mecânicas, indicando um grande potencial como adição em compósitos cimentícios. Além disso, Mohammed et al. (2015) enfatizam que a elevada área superficial específica e as dimensões do óxido de grafeno contribuem para melhorar a hidratação das partículas de cimento, estimulando pontos de nucleação e reduzindo a formação de vazios. Esses efeitos positivos influenciam diretamente na durabilidade dos compósitos cimentícios.

De acordo com Sharma et al. (2016), a durabilidade é uma preocupação fundamental na indústria da construção, pois materiais duráveis não apenas reduzem os custos de manutenção, mas também asseguram a vida útil estipulada em projeto. No caso das argamassas, quando expostas a agentes agressivos, sua vida útil pode ser comprometida. No entanto, uma possível solução para esse problema consiste na incorporação do óxido de grafeno (OG) à argamassa, o que contribui para a diminuição da penetração de agentes agressivos através do preenchimento dos poros da pasta de cimento pelo OG.

Ainda sobre a inclusão do OG em argamassas temos que a adição de óxido de grafeno nestas pode ser feita de duas formas diferentes: em forma de pó ou como uma dispersão coloidal (Mohammed et al., 2015). Embora o óxido de grafeno apresente boa dispersão em água, ainda ocorre uma disseminação razoável das nanopartículas de carbono nas argamassas de cimento (Kim et al., 2017). Isso ocorre devido às fortes interações de van der Waals e à presença de grupos hidrofílicos, resultando em aglomerações que podem ser minimizadas pela adição de surfactantes, como superplastificantes de policarboxilato, para melhorar a consistência da argamassa (Babak et al., 2014).

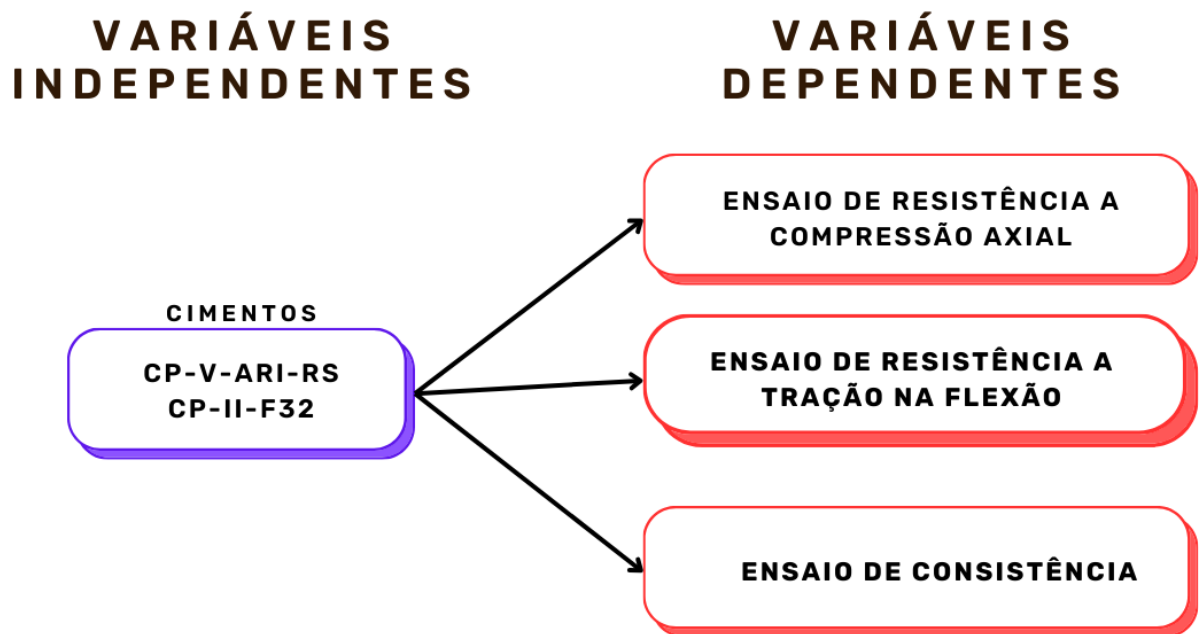
A presença de óxido de grafeno nas argamassas pode resultar em uma melhoria na resistência à compressão e à flexão, graças às ligações efetivas e a um processo de hidratação mais eficaz (Mohammed et al., 2015). Estudos também mostraram que o óxido de grafeno pode afetar o crescimento e a distribuição dos produtos de hidratação do cimento, influenciando a microestrutura das argamassas (Jinchang e Yeming, 2018). Dessa forma, o efeito da adição de óxido de grafeno nas argamassas leva a uma redução nos vazios da pasta, tornando os materiais cimentícios mais resistentes e duráveis.

Outra opção de inserção do óxido de grafeno é na tinta. De acordo com uma pesquisa realizada na Inglaterra, o grafeno pode ser utilizado como agente impermeabilizante quando combinado com tinta, o que pode ser benéfico para a aplicação em revestimentos e compósitos, além de prevenir reações de oxidação na área revestida (ALENCAR; SANTANA, 2018).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a análise da influência dos diversos tipos de cimentos que são vendidos no município de Aracaju/SE encontrados na região metropolitana de Aracaju foi adotado o roteiro de procedimentos a partir dos materiais e métodos. A figura 8 representa o diagrama que relaciona as variáveis dependentes e independentes do trabalho:

Figura 8: Roteiro laboratorial.



Fonte: Autor Próprio

4.1 MATERIAIS

4.1.1 CIMENTO PORTLAND

Foi selecionado as três opções de cimentos comumente encontradas na região da Grande Aracaju, sendo elas: o CP-V-ARI-RS (atualmente nomeado de Cimento Uso Estrutural Super Forte) exposto na figura 10 e CP-II-F-32 (atualmente nomeado de Cimento Uso Geral), exposto na figura 11, ambos da empresa MIZU Cimentos do Grupo POLIMIX Aglomerantes e o CP-II-F-32 da empresa Poty Cimentos do Grupo Votorantim, conforme exposto na Figura 9.

Figura 9: Cimento CP II F 32 da empresa Poty Cimentos.



Fonte: VOTORANTIM Cimentos.

Não foi possível localizar nenhuma análise ou relatório realizada pela empresa Votorantim das características específicas referentes ao desempenho dele segundo os parâmetros estabelecidos pela NBR 16697:2018.

Figura 10: CP V ARI RS da empresa MIZU Cimentos.



Fonte: MIZU Cimentos.

Este contém suas características químicas conforme a norma NBR 16697:2018 conforme a tabela 1:

Tabela 1: Propriedades químicas do CP-V-ARI-RS

Ensaio químicos	Resultado	NBR 16697:2018
Resíduo insolúvel (%)	3,2	$\leq 7,5$
Perda ao fogo (%)	5,4	$\leq 6,5$
Óxido de magnésio (%)	2,8	—
Trióxido de enxofre (%)	3,4	$\leq 4,5$
Cal livre (%)	1,7	—

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos OUTUBRO 2023

O mesmo ainda contém suas características físicas conforme a norma NBR 16697:2018 segundo a tabela 2:

Tabela 2: Propriedades físicas do CP-V-ARI-RS

Ensaio físicos	Resultado	NBR 16697:2018
Massa específica (g/cm ³)	3,1	—
Blaine (cm ² /g)	4	—
Resíduo peneira #200 (%)	0,1	$\leq 6,0$
Resíduo peneira #325 (%)	1,3	—
Expansibilidade à quente (mm)	0,7	$\leq 5,0$
Início de pega (min)	170	≥ 60

Fim de pega (min)	224	≤ 600
Consistência normal (%)	31,3	—

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos OUTUBRO 2023

O CP-V-ARI-RS também apresenta suas características dentro dos ensaios mecânicos conforme a norma NBR 16697:2018 conforme as tabela 3:

Tabela 3: Propriedades mecânicas do CP-V-ARI-RS

Ensaio mecânico	Resultado	NBR 16697:2018
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	17,7	$\geq 14,0$
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	31	$\geq 24,0$
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	37,7	$\geq 34,0$
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	45,4	—

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos OUTUBRO 2023

A partir do cimento CP-II-F32, representado na figura 11, tem-se um cimento também conforme a NBR 16697:2018 segundo os relatórios obtidos pela empresa.

Figura 11: Cimento CP II F 32 da empresa MIZU Cimentos.



Fonte: MIZU Cimentos.

Este contém suas características químicas conforme a norma NBR 16697:2018 conforme a tabela 4:

Tabela 4: Propriedades químicas do CP II F 32

Ensaio químicos	Resultado	NBR 16697:2018
Resíduo insolúvel (%)	7,38	$\leq 7,5$
Perda ao fogo (%)	9,36	$\leq 12,5$
Óxido de magnésio (%)	2,34	—
Trióxido de enxofre (%)	3,12	$\leq 4,5$
Cal livre (%)	1,52	—

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos NOVEMBRO 2023

O mesmo contém suas características físicas conforme a norma NBR 16697:2018 segundo a tabela 5:

Tabela 5: Propriedades físicas do CP II F 32

Ensaio físicos	Resultado	NBR 16697:2018
Massa específica (g/cm³)	3,01	—
Blaine (cm²/g)	4236,67	—
Resíduo peneira #200 (%)	0,33	≤ 12
Resíduo peneira #325 (%)	5,85	—
Expansibilidade à quente (mm)	1,0	$\leq 5,0$

Início de pega (min)	195,56	≥ 60
Fim de pega (min)	233,33	≤ 600
Consistência normal (%)	29,42	—

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos NOVEMBRO 2023

O CP II F 32 também apresenta suas características dentro dos ensaios mecânicos conforme a norma NBR 16697:2018 conforme as tabela 6:

Tabela 6: Propriedades mecânicas do CP II F 32

Ensaio mecânico	Resultado	NBR 16697:2018
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	17,7	$\geq 14,0$
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	31	$\geq 24,0$
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	37,7	$\geq 34,0$
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	45,4	—

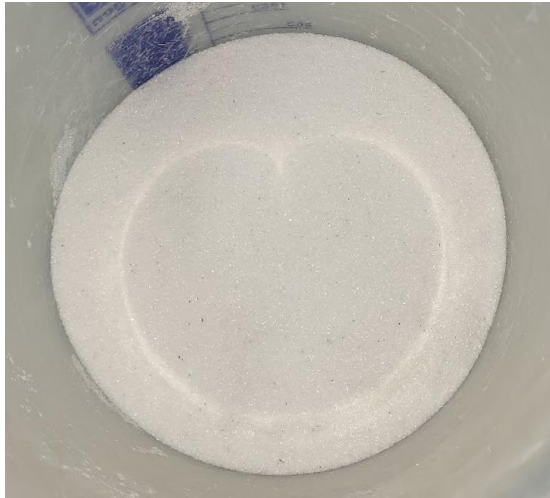
Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos NOVEMBRO 2023

4.1.2 AREIA

A matéria-prima empregada consiste em areia de quartzo exposta na figura 12, uma variante de dióxido de silício (SiO_2) caracterizada por sua elevada pureza. Esta areia exibe uma composição com teores de SiO_2 de 99,9% e $\leq 0,001\%$ de Fe_2O_3 . Notavelmente, a areia de quartzo ostenta uma dureza considerável, sendo classificada com um índice 7 na escala de Mohs. Sua coloração pode variar entre transparente e incolor, dependendo da pureza do material. Além disso, destaca-se por sua estabilidade química, baixa condutividade térmica e um ponto de fusão aproximado de 1720 °C. O material foi adquirido em estado previamente

peneirado e ensacado, apresentando uma massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$ e um diâmetro médio de partícula de $0,358 \text{ mm}$.

Figura 12: Areia de quartzo.

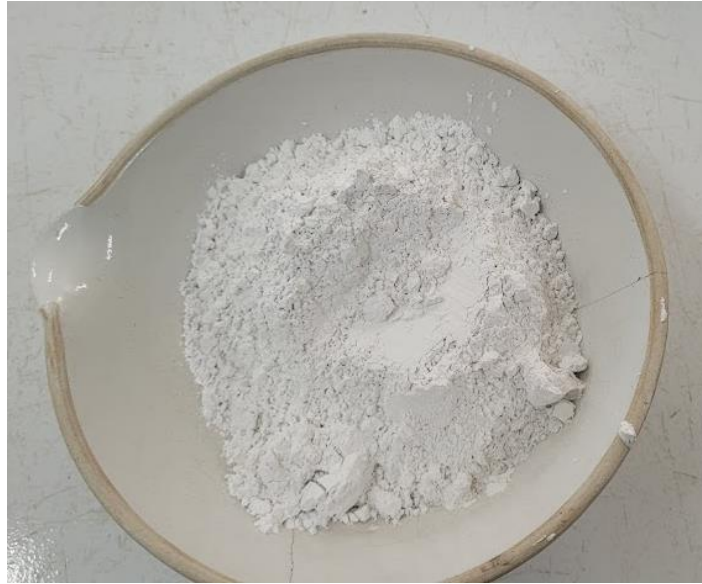


Fonte: Autor Próprio

4.1.3 PÓ DE QUARTZO

O pó de quartzo utilizado, exposto na figura 13, possui características análogas a areia de quartzo por ser, assim como ela, uma variante baseada em dióxido de silício (SiO_2) de elevada pureza, dureza, estável quimicamente, que apresenta baixa condutividade térmica e alto ponto de fusão. O pó foi adquirido já peneirado e ensacado, possuindo $2,63 \text{ g/cm}^3$ de massa específica e diâmetro médio de $25 \mu\text{m}$.

Figura 13: Pó de quartzo

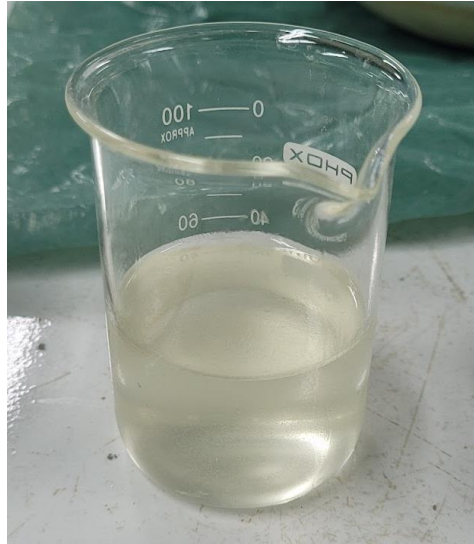


Fonte: Autor Próprio

4.1.4 ADITIVO HIPERPLASTIFICANTE

Na presente pesquisa, utilizou-se o hiperplastificante SILICON NS HIGH 210, desenvolvido pela Tecnosil, exposto na figura 14. Este aditivo orgânico é formulado com policarboxilatos de última geração, sendo classificado como aditivo redutor de água tipo 2 - RA2/Superplastificante. Caracteriza-se por apresentar uma consistência física líquida viscosa, com coloração variando de mel a castanho. Sua densidade está ente 1,05 e 1,07 g/cm³, e o teor de cloretos é mantido abaixo de 0,1%.

Figura 14: Aditivo hiperplastificante



Fonte: Autor Próprio

4.1.5 SÍLICA ATIVA

A sílica, apresentada na figura 15, empregada no presente estudo foi do tipo não densificada, fornecida pela empresa Tecnosil. Os dados fornecidos pela empresa indicam um teor de SiO_2 superior a 90%, uma massa específica de 2.220 kg/m^3 e uma massa unitária inferior a 350 kg/m^3 . A superfície específica dessa sílica é aproximadamente $19000 \text{ m}^2/\text{kg}$, e suas partículas são esfericamente moldadas, com um diâmetro médio de $0,2 \mu\text{m}$.

Figura 15: Sílica ativa.



Fonte: Autor Próprio

4.1.6 MACROFIBRAS

Para o reforço com macrofibras optou-se pela utilização do tipo sintética para reforço de concreto fornecida pela Macrofibra do Brasil, designada como Macrofibra Duristeel FF54. Esta macrofibra exibe uma coloração cinza e possui um formato em multifilamento encapsulado, frisado com pós arranjo, proporcionando uma ancoragem excelente. As propriedades da Macrofibra Sintética para Reforço de Concreto (MFSR) foram disponibilizadas pela empresa e estão detalhadas na tabela 7:

Tabela 7: Propriedades físicas da Macrofibra Duristeel FF54

Propriedades físicas	
Peso específico (g/cm³)	0,97
Material	Polipropileno
Comprimento (mm)	54
Resistência à tração (MPa)	250

Resistência ao alcali	Alta – Ensaio UFSCar LCP 13118
Absorção de água	Zero
Conformidade	ASTM C-1116/C1550-03/1609-12; JSCE-SF4/1984 e recomendações NBR 16940:2012
Quantidade de fios/kg	410.000 fios encapsulados

Fonte: Adaptado de Macrofibra do Brasil

4.1.7 ÓXIDO DE GRAFENO

As nanofolhas de grafeno, mostradas na figura 16, foram adquiridas da Strem Chemicals Inc., sob o código 06-0225.

Figura 16: Pó de quartzo.



Fonte: Autor Próprio.

Este material consiste em folhas submicrométricas, apresentando um diâmetro inferior a $2\text{ }\mu\text{m}$ e uma área superficial de $300\text{ m}^2/\text{g}$. Demonstram uma densidade aparente variando entre $0,2$ a $0,4\text{ g/cm}^3$, com um teor de oxigênio inferior a 2% em massa e um teor de carbono superior

a 98% em massa. Estas nanofolhas de grafeno são fornecidas na forma de pó preto. As propriedades detalhadas do material (OG) são apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8: Propriedades típicas das nanofolhas de óxido de grafeno.

Propriedades	Paralelo à superfície	Perpendicular à superfície
Condutividade térmica (W/m.K)	3.000	6
Expansão térmica (m/m/K)	$4-6 \times 10^6$	$0,5-1 \times 10^6$
Módulo de elasticidade (GPa)	1.000	—
Resistência à tração (GPa)	5	—
Condutividade elétrica (S/m)	10^7	10^2

Fonte: Adaptado da Strem Chemicals Inc.

4.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A análise tem como base a preparação de quatro traços do concreto de pós reativos nos quais foram analisados seus resultados para o discernimento da influência do cimento em cada uma delas. Todos os traços possuíram a mistura de cimento portland, pó de quartzo, areia de quartzo, sílica ativa, óxido de grafeno, microfibras sintéticas de reforço estrutural, água e superplastificante a base de policarboxilato.

Para dosagem utilizou-se de uma relação água/cimento de 0,25, valor ligeiramente superior ao encontrado nas literaturas de referência como Vanderlei (2004) e Soto (2014), dada a baixa eficiência do aditivo dito hiperplastificante utilizado na pesquisa.

O óxido de grafeno foi adicionado na proporção de 0,02% da massa de cimento, o aditivo hiperplastificante foi dosado em 3% da massa cimento e as microfibras sintéticas de reforço

estrutural foram dosadas em 0,4% do volume da mistura total do CPR. Para fins de análise foram realizados quatro tipo de amostra sendo a piloto que não continha microfibra na mistura e outros 3 tipos de amostras com a presença da microfibra variando apenas o cimento utilizado, que foram: CP-V-ARI-RS da MIZU Cimentos, CP-II-F-32 da MIZU Cimentos e CP-II-F-32 da POTY Cimentos. As amostras foram ilustradas na tabela 9.

Tabela 9: Proporções de misturas das amostras de CPR.

Amostras	Cimento	Sílica ativa	Areia	Pó de quartzo	HP	Água	MFSR	OG
CP5MIZUSF	1	0,246	1,1	0,235	0,03	0,25	0	0,02%
CP5MIZU	1	0,246	1,1	0,235	0,03	0,25	0,4%	0,02%
CP2MIZU	1	0,246	1,1	0,235	0,03	0,25	0,4%	0,02%
CP2POTY	1	0,246	1,1	0,235	0,03	0,25	0,4%	0,02%

Fonte: Autor próprio

Todos os pós componentes do CPR foram adicionados e misturados na argamassadeira durante 1 minuto. Após a mistura do material o mesmo foi reservado em um recipiente. A água de amassamento foi dividida em duas partes iguais, em uma metade foi adicionado o óxido de grafeno e na outra foi diluído o aditivo hiperplastificante.

Devido ao volume do recipiente do misturador e ao volume do traço trabalhado, quando utilizado da rotação em alta velocidade parte dos insumos eram expulsos do misturador, comprometendo a mistura. Dessa forma, foi adotado o roteiro de Andrade (2015), no qual para adaptação as últimas adições de 12,5% de água foram feitas com a adição do óxido de grafeno, representado na tabela10:

Tabela 10: Procedimento da mistura do concreto

Materiais	Tempo	Velocidade
20% dos materiais secos +50% da água + 100% aditivo	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Lenta
20% da mistura dos materiais secos+ 12,5% da água	3 min	Rápida

Fonte: Andrade (2015).

Dado o roteiro de Andrade (2015) como parâmetro, foi adicionado 50% da água de amassamento junto com 100% do aditivo hiperplastificante em 20% da mistura seca, sendo eles misturados durante 3 minutos em velocidade lenta. Após esse tempo colocou-se mais 20% da mistura seca e mais 12,5% da água já com o óxido de grafeno, repetindo essa adição por mais duas vezes em velocidade lenta, na quarta adição foi realizado o mesmo procedimento porém com o misturador em velocidade alta.

Assim que o processo de mistura era concluído, eram feitos inicialmente a preparação para realização dos ensaios de estado fresco e de estado endurecido. Inicialmente foi preparado a base para realização do ensaio de índice de consistência para reutilização na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão.

4.2.2 ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A partir das características do concreto de pós reativo foi realizado o ensaio de índice de consistência regido pela norma NBR 13276:2016.

Figura 17: mesa de consistência (*flow table*)



Fonte: Autoria própria

A figura 17 mostra a mesa de consistência utilizada nesse trabalho.

4.2.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Todo o ensaio foi reproduzido conforme as regras da NBR 5739 (ABNT, 2018) que rege os ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. No ensaio foram adotados moldes cilíndricos com dimensões de 50 milímetros de diâmetro e 100 milímetros de altura.

Após elaborados, os corpos de prova foram deixados de repouso por 24 horas e colocados para realização de cura úmida por 28 dias. Passado o período de cura os mesmos foram limpos e regularizados para realização dos rompimentos.

Figura 18: Prensa com apoio para ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autor Próprio

A avaliação da resistência à compressão foi conduzida no laboratório de ensaios do Instituto Federal de Sergipe (IFS) na presa representada na Figura 18. Os corpos de prova foram dispostos na posição vertical dentro da prensa hidráulica de ensaio EMIC MEU-100, que possui uma capacidade de 1000 kN. Por meio dessa máquina, foi aplicada uma carga de compressão de maneira gradual e controlada nas extremidades superior e inferior dos corpos de prova.

4.2.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A determinação da resistência à tração na flexão dos concretos foi conduzida de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 12142 (ABNT, 2010).

O carregamento nos modelos prismáticos foi realizado empregando três pontos, com dois pontos de apoio na parte inferior e um ponto de aplicação de carga na parte superior.

Figura 19: Prensa com apoio para ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autor Próprio

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram executados, assim como os ensaios de resistência à compressão axial, nas instalações do laboratório de ensaios do Instituto Federal de Sergipe (IFS), utilizando a mesma prensa representada na Figura 19 da marca EMIC MEU-100 com capacidade de 1000 kN, sendo alterado apenas os suportes e configuração.

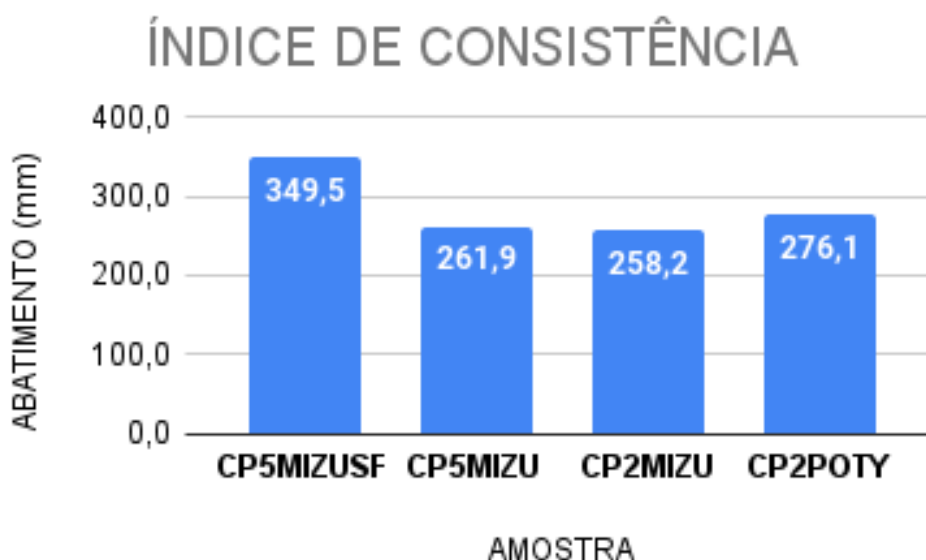
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção será apresentado os resultados dos ensaios realizados e toda análise pertinente a pesquisa.

5.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os resultados de consistência são representados na Figura 20 a seguir.

Figura 20: Resultados obtidos pelo ensaio de consistência no flow table.



Fonte: Autor Próprio.

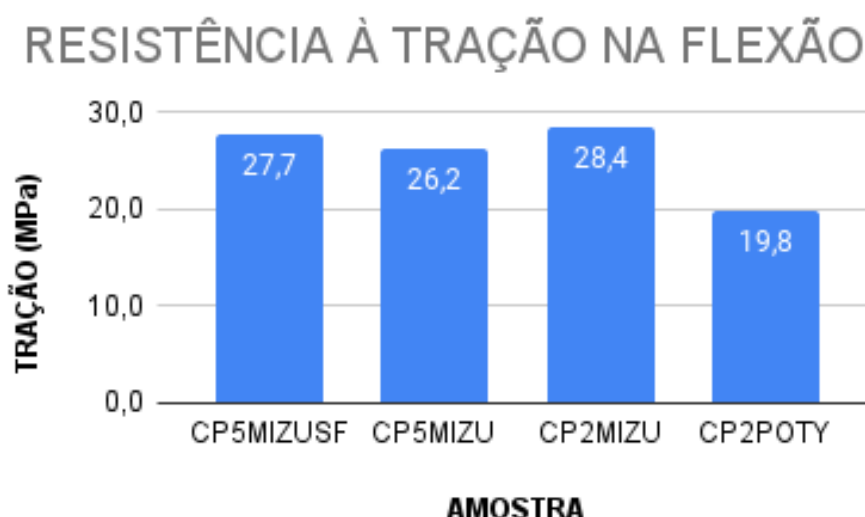
A partir da análise dos resultados é possível identificar uma redução considerável do índice de consistência quando adicionado a microfibras no CPR. O resultado da amostra CP5MIZUSF é 32,11% maior do que a média das amostras utilizando a microfibras na mistura. Quando analisados os valores de espalhamento que contém microfibras, percebe-se uma congruência de valores. Isto é, os valores dispersam muito pouco com valor de 9,43 de desvio padrão. Logo, a mudança de cimento no que diz respeito à consistência não apresentou valores significativos. Ademais, nota-se que a amostra utilizando o cimento CP 2 F 32 da Mizu sendo o menos fluido e para o mesmo tipo de cimento porém da marca Poty tem-se a maior fluidez, ambos com valores respectivos de 258,2 e 276,1 milímetros.

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Pelo fato da resistência a tração ser a principal fragilidade do concreto, é importante fazer uma análise dessa característica para comparação do concreto de pós reativo e verificar da possibilidade da mudança de cimento ser algo significativo para mudança desse ponto fraco.

A figura 21 a seguir expressa os resultados de resistência a tração na flexão dos concretos produzidos.

Figura 21: Tabela com valores de resistência a tração nas amostras de CPR.



Fonte: Autor próprio

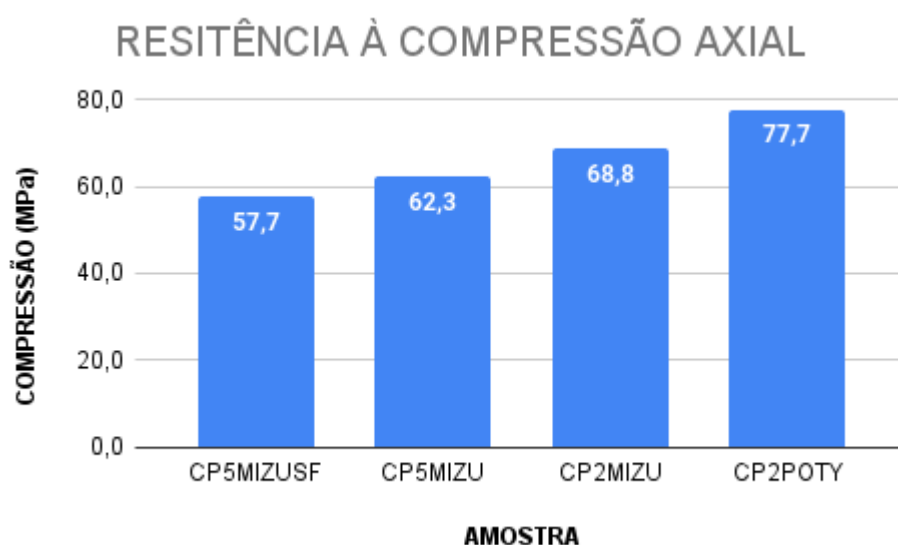
A partir dos resultados obtidos pelo rompimento das amostras de CPR tem-se um resultados relativamente parecidos, sem muita dispersão dos dados apresentando um valor de desvio padrão de 3,9. O mais resistente foi a amostra CP2MIZU contendo o cimento CP-2-F-32 da empresa Mizu com valor de resistência igual a 28,4 MPa, seguido dela tem-se as amostras CP5MIZUSF e CP5MIZU com, respectivamente, 27,7 e 26,2 MPa. Destes, mostrou-se desempenho muito semelhantes apresentando uma dispersão pequena com valor de desvio padrão de 1,15. Por último tem-se a única amostra feita com cimento da empresa Poty apresentando resistência a tração de 19,8 MPa, o que transmite uma queda proxima a 30% da capacidade de resistência a tração quando comparado a amostra CP2MIZU. Cabe salientar que esse último concreto obteve resistência à tração menor do que os compósitos produzidos sem macrofibras, evidenciando uma possível baixa eficiência deste cimento.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A prerrogativa para execução dos ensaios do índice de resistência à compressão axial, regidos pela NBR 5739 (ABNT, 2019) foi analisar a principal característica das estruturas de concreto que é sua resistência à compressão. Nesse, cada amostra de CPR foi rompida pela prensa hidráulica após o período de 28 dias de cura úmida.

Através dos resultados obtidos foi possível realizar análises - a figura 22 apresenta a média dos resultados obtidos média dos corpos de prova.

Figura 22: Valores de resistência à compressão nas amostras de CPR.



Fonte: Autor próprio

O menor valor obtido foi da amostra PILOTO que alcançou 57,7 MPa, que é um valor consideravelmente alto para um concreto, porém não quando trata-se de um CUAD (concreto de ultra alto desempenho) como o CPR. Esse, apresentou uma queda de 20 MPa em relação ao mais resistente, o que representa uma redução de 26% da capacidade de resistência.

A amostra CP2POTY foi a amostra mais resistente com a resistência média de 77,7 MPa. É um valor razoavelmente bom para a metodologia utilizada, visto que outras pesquisas de referência como Andrade (2015) apresentou valores semelhantes. De modo geral, o valor obtido foi satisfatório dado a metodologia de cura apenas úmida utilizada, visto que em

trabalhos já citados no capítulo 3 – Revisão de literatura, para resultados de resistência extremamente elevados, a cura é realizada sob altas pressão e temperatura.

Ao analisar as variações entre os tipos de cimento verificou-se uma proximidade dos valores resistidos por cada amostra, apesar de apresentar um valor de desvio padrão de 8,67. Houve uma divergência do que era esperado para os resultados, visto que as amostras que utilizaram o cimento dito superestrutural que é o tipo CP-V-ARI-RS apresentou menores resistências que as amostras utilizando o cimento nomeado “toda obra” do tipo CP-II-F32.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados, conclui-se que o melhor cimento para utilização em CPR's foi o Poty em termos de resistência à compressão. Os cimentos CP V- ARI MIZU e CPII-F32 MIZU resultaram satisfatórios, conforme o constatado na bibliografia consultada. O único que seria praticamente inviável pra usos em concreto de ultra alto desempenho foi o cimento CPV-ARI sem fibras. Assim, considerando um panorama geral, todas as amostras apresentaram valores coerentes com a literatura, apresentando bons valores de consistência no ensaio no estado fresco e boas resistências nos ensaios de estado endurecido para uma cura úmida de 28 dias. Vale ressaltar que alguns resultados alcançados foram ligeiramente inferiores a literatura, porém dentro do esperado para uma aplicabilidade de concreto em cura úmida.

O cimento CP-II-F32 que obteve os melhores resultados de resistências e maior fluidez quando analisados com a utilização da microfibras, todavia, no que diz respeito à tração houve uma queda significativa de resistência o que pode-se traduzir como uma baixa eficiência do cimento para esse tipo de esforço.

De modo geral, era esperado maior fluidez das amostras como um todo dado a utilização de um aditivo novo dito como hiperplastificante, que tem a premissa de ser superior ao aditivo superplastificante. Esse, apresentou-se pouco eficaz para a perspectiva que foi esperada dele, porém, não chegou a apresentar valores negativos, apenas não agregou de forma superior aos resultados da literatura com uso de superplastificante. Essa situação pode ser controlada com a utilização de um aditivo superplastificante mais concentrado e de melhor qualidade.

Por fim, vale acrescentar que é perceptível a possibilidade de alcançar altas resistências em futuras pesquisas se houver um excelente aditivo superplastificante e a preservação de uma quantidade menor de água, seguindo o aconselhado por boa parte da literatura no valor de 0,2. Dessa forma, existem altas chances de conseguir resistências à compressão próximas de 100 MPa apenas com cura úmida por 28 dias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AİTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000
- AİTCIN, P. C. **The durability characteristics of high performance concrete: a review**. Cement and Concrete Composites 25, p. 409–420, mai, 2003.
- AİTCIN, P. C.; RICHARD, P. **The pedestrian/bikeway bridge of Sherbrook**. In: 1st International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, Paris: France, 1996.
- AİTCIN, Pierre-Claude. **Binders for durable and sustainable concrete**. CRC Press, 2007.
- ALENCAR, E.; SANTANA, D. **Processos de obtenção do grafeno, suas aplicações e sua importância para o Brasil**. Centro Oswaldo Cruz. 2018. Disponível em: http://revista.oswaldocruz.br/Content/pdf/Edicao_16_Alencar_Eduardo.pdf. Acesso em: 28 maio 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State of the art report on high strength concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.
- ANDRADE, T. C. S. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- 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 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
- BABAK, F.; ABOLFAZL, H.; ALIMORAD, R.; PARVIZ, G. **Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites**. The Scientific World Journal, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi-nlm->

nih.ez107.periodicos.capes.gov.br/pmc/articles/PMC3915539/. Acesso em: [19 de junho de 2023].

BARBOSA, D. F. **Influência do óxido de grafeno em argamassas de cal hidráulica natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Nova Lisboa, 2015.

BIZ, C.E. **Concreto de pós reativos**. Campinas: UEC, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BONNEAU, Oliver et al. **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete international, v. 18, n. 4, p. 47-49, 1996.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. **Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF): análise das propriedades do material e especificações de projeto**. Mackenzie Presbyterian University, Campinas, SP, Brazil; University of São Paulo, Polytechnical School, São Paulo, SP, Brazil; University of Campinas, School of Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Campinas, SP, Brazil. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000400011>. Acesso em: [19 de junho de 2023].

CHU, H. et al. **Effect of graphene oxide on mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete prepared from recycled sand**. Nanomaterials, v. 10, 2020.

DING, J. N. et al. **The influence of temperature, time and concentration on the dispersion of reduced graphene oxide prepared by hydrothermal reduction**. Diamond and Related Materials, v. 21, p. 11–15, 2012.

DREYER, D. R. et al. **The chemistry of graphene oxide**. Chemical Society Review, v. 39, p. 228-240, 2010.

EDWARDS, R. S.; COLEMAN, K. S. **Graphene synthesis: relationship to applications**. Nanoscale, v. 5, n. 1, p. 38–51, 2013.

FÁVERO, Rafael Burin. **Caracterização mecânica de material compósito cimentício avançado à base de pós reativos**. 2016.

FERREIRA, Gabriel Alves. Et al. **Concreto de pós reativos: Uma análise teórica sobre as novas tendências**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed.

06, Vol. 09, pp. 22-33. Junho de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pos-reativos>

Freepik. **Um close da distinta estrutura em forma de favo de mel do grafeno, um material leve e forte.** Disponível em: https://img.freepik.com/fotos-premium/um-close-da-distinta-estrutura-em-forma-de-favo-de-mel-do-grafeno-um-material-leve-e-forte_674594-4585.jpg?w=1060. Acesso em: 03 jul. 2023.

GRANDES CONSTRUÇÕES. **Concreto hoje.** (2018). Disponível em: <https://grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/como-tornar-o-concreto-de-ultra-alto-desempenho-mais-acessivel/> Acesso: 10 dez. 2023.

GRAYBEAL, B. et al. **Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community.** United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2013.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado.** Livre docência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap, v. 36, 2011.

JINCHANG, P.; YEMING, W. **Graphene oxide on the microstructure and mechanical properties of cement based composite material.** Frattura ed Integrità Strutturale, v. 45, p. 156-163, 2018.

KIM, B. et al. **The effects of graphene oxide flakes on the mechanical properties of cement mortar.** In: The 2017 World Congress on: Advances in Structural Engineering and Mechanics, Korea, 2017.

LAFARGE. **Aplicação de painéis pré-moldados no estádio Jean Bouin na França.** Disponível em: http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/3_6_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_ductal/Site_ductal/AllKeyProject/KeyProjectDuctal%2520Page_1385395657489/Content%2520KeyProjectDuctal Acesso 10 DEZ 2023.

MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

MARTÍNEZ, L. M. P. et al. **Nanotubos e Grafeno: Os primos mais jovens na família do carbono!** Química, v. 128, p. 21-27, julho 2013. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/8300>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MIRANDA, C.R. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química.** Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

MOHAMMED, A. et al. **Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties.** Construction and Building Materials, v. 84, p. 341-347, 1 jun. 2015.

NOVOSELOV, K.S *et al.* **Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films.** Science Vol 306, Issue 5696, p. 666-669, oct, 2004.

NOVOSELOV, K. S. et al. **Room-temperature electric field effect and carrier-type inversion in graphene films.** Nature, 2004.

ORCUTT, M. **O grafeno poderia tornar os centros de dados e supercomputadores mais eficientes.** 2013. Disponível em: http://www.technologyreview.com.br/read_article.aspx?id=43964. Acesso em: 19 de junho de 2023.

REPETTE, W. L. **Concretos de Última Geração: Presente e Futuro.** In: ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, Cap 49, 2005.]

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes.** Cement and Concrete Research 25, p.1501-1511, oct, 1995.

RUSSELL, Henry G. et al. **Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community.** United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2013.

SANJUÁN, M. A.; MARTIALAY, R. M. **Variability of the concrete air permeability coefficient with time**. Building and Environment, 1997

SHARMA, S. K.; KOTHIYAL, S. C. **Graphene oxide and its derivatives as cement admixtures: A review**. Construction and Building Materials, v. 106, p. 1-17, 2016.

SHAMAILA, S.; SAJJAD, A. K. L.; IQBAL, A. **Modifications in development of graphene oxide synthetic routes**. Chemical Engineering Journal, v. 294, p. 458–477, 2016.

SILVA, A. L. S. et al. **Análise do Grafeno Segundo sua Utilização na Construção Civil Seguindo os Conceitos Sustentáveis**. RCT - Revista de Ciência & Tecnologia, v. 8, p. 1-16, 2022. ISSN 2447-7028.

SOTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade**. 2013. 58 f. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, G. Concreto: Ciência e Tecnologia. Florianópolis: Ibracon, 2011. Cap. 36. Vol. 2

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

VILAR, Eudésio Oliveira. **Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 11, n. 2, p. 54-57, 2016.

WICK, P. et al. **Classification framework for graphene-based materials**. Angewandte Chemie, Switzerland, v. 53, p. 7714-7718, 2014.

YUAN, B. et al. **Preparation of functionalized graphene oxide/polypropylene nanocomposite with significantly improved thermal stability and studies on the crystallization behavior and mechanical properties**. Chemical Engineering Journal, v. 237, p. 411–420, 2014.

