

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE



CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



ARTHUR JUNQUEIRA SOUZA

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ÓXIDO DE GRAFENO E MACROFIBRAS
SINTÉTICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL**

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



ARTHUR JUNQUEIRA SOUZA

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ÓXIDO DE GRAFENO E MACROFIBRAS
SINTÉTICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL**

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 Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Souza, Arthur Junqueira.

S719c Concreto de pós reativos com óxido de grafeno e macrofibras sintéticas de reforço estrutural. / Arthur Junqueira Souza. – Aracaju, 2023.

79 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira.
Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Óxido de grafeno. 2. Pós reativos. 3. Concreto de ultra alto desempenho. 4. Macrofibra sintética. 5. Resistência. I. Pereira, Carla Cristina Nascimento Santos. II. Título.

CDU 691.32

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SERGIPE CAMPUS ARACAJU**

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

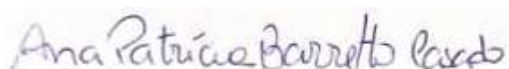
TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 265

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ÓXIDO DE GRAFENO E
MACROFIBRASSINTÉTICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL**

ARTHUR JUNQUEIRA SOUZA

Esta monografia foi apresentada às 9 horas do dia 21 de julho de 2023, 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(a). MSc. Ana Patrícia Baretto Casado

(IFS – Campus Aracaju)



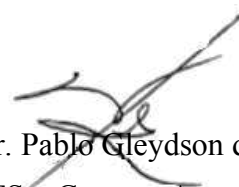
Prof(a). MSc. Emiliana de Souza Rezende
Guedes

(IFS – Campus Aracaju)



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

(IFS – Campus Aracaju)
Orientadora



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

AGRADECIMENTOS

Aos queridos colegas e amigos feitos durante o curso,

Hoje, ao chegar ao final desta etapa tão significativa em nossas vidas, não posso deixar de expressar a mais profunda gratidão a cada um de vocês. Ao longo desses anos de curso de graduação, compartilhamos momentos inesquecíveis, desafios superados e conquistas alcançadas juntos.

Primeiro, aos amigos que fiz logo no início, Ana, Yasmin, Carla e Sara. Sou grato por ter encontrado em cada uma de vocês, um apoio incondicional, uma verdadeira parceria, uma fonte de inspiração e um motivo para persistir diante dos desafios. Cada incentivo e cada momento compartilhado foram importantes para me manter motivado e determinado a alcançar meus objetivos.

Em especial, Ana e Yasmin, agradeço também por todas as boas lembranças que criamos juntos, desde as reuniões de estudo, os momentos de descontração no intervalo das aulas e amizade verdadeira. Vocês tornaram essa jornada mais especial e enriquecedora, fazendo esses anos voarem depressa, mesmo com muitas atribuições. A união que construímos é um presente que levarei para sempre em minhas lembranças.

Em seguida, agradeço às amizades adquiridas, à medida que o curso avançava e as turmas se misturavam. A união que surgiu durante a pandemia para estudos e provas, se transformou em companheirismo e amizade. Agradeço a Adelson, Antonio Vinicius, Jeremias e Leandro o encontro do meio do caminho, que persistiu até o final. OS SOBREVIVENTES.

Meus sinceros agradecimentos a cada um de vocês, por fazerem parte dessa história e por compartilharem essa caminhada de aprendizado e crescimento.

Desejo que a vida os recompense com muito sucesso, felicidade e realizações em todas as áreas de suas vidas. Que nossos caminhos sigam se cruzando e que nossa amizade perdure ao longo dos anos.

Muito obrigado a todos vocês!

RESUMO

O Concreto de Pós Reativos (CPR) é um tipo de concreto que utiliza adições minerais especiais, em substituição parcial ao cimento Portland, eliminando totalmente os agregados graúdos. O CPR é composto por partículas muito pequenas, com diâmetro inferior a 2 mm. Esse compósito apresenta alta resistência à compressão, bem como resistência à tração e flexão quando adicionadas fibras para aumentar sua ductibilidade e auxiliar no controle de fissuras, entretanto, as fibras ainda não conseguiram eliminar completamente as fissuras primárias do concreto. Recentemente, os pesquisadores têm se concentrado em nanomateriais baseados em carbono para reduzir a formação e propagação de microfissuras, melhorando assim as propriedades mecânicas e a durabilidade do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD). Nesse contexto, este trabalho apresenta uma investigação experimental sobre a consistência e como melhorar a resistência à compressão e resistência à tração na flexão do CPR, utilizando diferentes proporções de óxido de grafeno (OG), combinado com Macrofibras Sintéticas de Reforço Estrutural (MFSR). O teor de MFSR foi mantido em 0,4% em volume de concreto, enquanto as adições de nanofolhas de GO variaram de 0,00% a 0,04%, em massa de cimento, com uma relação água/aglomerante de 0,20. O estudo demonstra que a fluidez do CPR diminui gradualmente com o aumento do conteúdo de nanofolhas de OG. Os resultados também mostram que o teor ideal de nanofolhas de GO, sob cura úmida imersa em água, é de 0,02% para resistência à compressão e 0,03% para a resistência à tração na flexão. Para ambos teores, as resistências aumentam por volta de 20%, demonstrando que a adição de OG pode ser eficaz para aumentar a resistência à tração na flexão do CPR, mas que ainda necessita de mais estudos na combinação com MFSR.

Palavras-chave: Óxido de grafeno; Concreto de pós reativos; Concreto de ultra alto desempenho; Macrofibras sintéticas de reforço estrutural; Resistência.

ABSTRACT

Reactive Powder Concrete (RPC) is a type of concrete that utilizes special mineral additions, partially replacing Portland cement and completely eliminating coarse aggregates. RPC is composed of very small particles, with a diameter smaller than 2 mm. This composite exhibits high compressive strength as well as tensile and flexural strength when fibers are added to enhance ductility and assist in crack control. However, fibers have not yet completely eliminated primary cracks in concrete. Recently, researchers have focused on carbon-based nanomaterials to reduce the formation and propagation of microcracks, thereby improving the mechanical properties and durability of Ultra High-Performance Concrete (UHPC). In this context, this study presents an experimental investigation into the consistency and how to improve the compressive strength and flexural tensile strength of RPC by using different proportions of graphene oxide (GO) combined with Macro Synthetic Reinforcement Fibers (MSRF). The MSRF content was maintained at 0.4% by volume of concrete, while the additions of GO nanosheets ranged from 0.00% to 0.04% by mass of cement, with a water/binder ratio of 0.20. The study demonstrates that the flowability of RPC gradually decreases with increasing content of GO nanosheets. The results also show that the optimal content of GO nanosheets, under moist curing submerged in water, is 0.02% for compressive strength and 0.03% for flexural tensile strength. For both contents, the strengths increase by approximately 20%, demonstrating that the addition of GO can effectively enhance the flexural tensile strength of RPC, but further studies are needed regarding the combination with MSRF.

Keywords: Graphene oxide; Reactive powder concrete; Ultra-high-performance concrete; Macro synthetic reinforcement fibers; Strength..

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivos gerais	20
2.2	Objetivos específicos.....	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Concreto de Pós Reativos	21
3.2	Princípios do Concreto de Pós Reativos.....	23
3.2.1	Aumento da homogeneidade.....	24
3.2.2	Aumento da compacidade.....	25
3.2.3	Refinamento da microestrutura	26
3.2.4	Aumento da ductibilidade	27
3.3	Materiais típicos do CPR.....	27
3.3.1	Cimento Portland.....	27
3.3.2	Areia Fina.....	28
3.3.3	Pó de Quartzo	29
3.3.4	Aditivo Superplastificante.....	29
3.3.5	Sílica Ativa.....	30
3.3.6	Fibras.....	30
3.4	Produção do CPR.....	32
3.5	Reologia.....	33
3.6	Propriedades do CPR.....	35
3.6.1	Resistência à compressão	35
3.6.2	Resistência à tração.....	36
3.6.3	Tenacidade	39
3.7	Durabilidade	40
3.8	Aplicação do CPR.....	41
3.9	Nanomateriais de Carbono	44
3.9.1	Grafeno.....	46
3.9.2	Óxido de Grafeno	47
3.10	Síntese de Nanomateriais à base de Grafeno	48
3.11	Compósitos Cimentícios e o Óxido de Grafeno	49

3.11.1	Pastas.....	50
3.11.2	Argamassas.....	51
3.11.3	Concretos de Ultra Alto Desempenho	51
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	55
4.1	Materiais	55
4.1.1	Cimento Portland.....	55
4.1.2	Areia.....	56
4.1.3	Pó de quartzo	56
4.1.4	Superplastificante	57
4.1.5	Sílica ativa	57
4.1.6	Macrofibras	57
4.1.7	Óxido de grafeno	58
4.2	Teste preliminar de fluidez.....	58
4.3	Traço das misturas e preparação dos corpos de prova	59
4.4	Ensaio de Índice de consistência	61
4.5	Ensaio de resistência à compressão axial.....	62
4.6	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	Índice de Consistência	63
5.2	Resistência à compressão	64
5.3	Resistência à tração na flexão	66
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
6.1	Sugestão para próximos trabalhos.....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz do concreto convencional (CC), concreto de alto desempenho (CAD) e CUAD sem e com fibras	22
Figura 2 – Variações no espalhamento da mistura quando utilizadas diferentes relações água/aglomerante e aditivos superplastificantes.....	34
Figura 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície das fibras: (a) – (b) fibra em estado natural; (c) – (d) fibra extraída e limpa; e (e) – (f) fibra após mistura	38
Figura 4 – Comparativo de concretos com e sem reforço de fibras metálicas	39
Figura 5 – Quantidades e diâmetros de poros em concretos de classe de resistência C30 e C80 e em CPR de 200 MPa com e sem aplicação de cura térmica.....	41
Figura 6 – Seções transversais de estruturas com mesma capacidade portante em diferentes materiais	42
Figura 7 – Ponte de Pedestres Seonyu	42
Figura 8 – Estação de VLT de Shawnessy: (a) Estação pronta; (b) estruturas brancas em CPR	43
Figura 9 – Ferrovia Qinghai – Tibet	44
Figura 10 – Estrutura dimensional do grafeno, fulereno, nanotubo e grafite.....	45
Figura 11 – Esfoliação química para obtenção de OG e OGR.....	49
Figura 12 – imagens da interface entre fibra e a matriz cimentícia aos 7 dias: (a) corpo de prova de referência sem OG; (b) corpo de prova com 0,02% de OG sob cura padrão; e (c) corpo de prova com 0,2% de OG sob cura a vapor	54
Figura 13 – Roteiro de trabalho.....	55
Figura 14 – Argamassadeira eletromecânica de eixo vertical	59
Figura 15 – Mesa de fluidez (flow table).....	61
Figura 16 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na consistência das amostras de CPR	63
Figura 17 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na resistência à compressão das amostras de CPR.....	64
Figura 18 – Resultados das resistências à compressão potenciais dos corpos de prova de cada traço.....	65

Figura 19 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na resistência à tração na flexão das amostras de CPR.....	66
Figura 20 – Resultados das resistências à tração potenciais dos corpos de prova de cada traço	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades químicas do CP-V-ARI-RS.....	56
Quadro 2 – Propriedades físicas do CP-V-ARI-RS.....	56
Quadro 3 – Propriedades mecânicas do CP-V-ARI-RS.....	56
Quadro 4 – Propriedades físicas da Macrofibra Duristeel FF54	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição típica de CPR em massa.....	24
Tabela 2 – Comparação das propriedades mecânicas dos concretos.....	24
Tabela 3 – Propriedades das fibras pesquisadas	37
Tabela 4 – Propriedades dos materiais constituintes	50
Tabela 5 – Propriedades típicas das nanofolhas de óxido de grafeno	58
Tabela 6 – Proporções de misturas das amostras de CPR.....	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
CAA	Concreto Autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
cp	corpo de prova
CP	Cimento Portland
CPR	Concreto de Pós Reativos
CPR 200	Concreto de Pós Reativos com resistência de 200 MPa
CPR 800	Concreto de Pós Reativos com resistência de 800 MPa
CRF	Concreto Reforçado com Fibra
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro III
HNO ₃	Ácido Nítrico
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
IFS	Instituto Federal de Sergipe
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
KClO ₄	Perclorato de Potássio
KMnO ₄	Permanganato de Potássio
MFA	Microfibra de Aço
MFSR	Macrofibra Sintética de Reforço
Mn ₂ O ₇	Óxido de Manganês VII

Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sódio
NBR	Norma Brasileira
NTC	Nanotubo de Carbono
OG	Óxido de Grafeno
OGR	Óxido de Grafeno Reduzido
OPC	<i>Ordinary Portland Cement</i>
SiO ₂	Dióxido de Silício
SP	Superplastificante
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
VLT	Veículo Leve sobre Trilho

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angstrom
°C	temperatura em graus Celsius
µm	micrômetro
Ω	Ohm
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
d	diâmetro
g	grama
GPa	giga Pascal
J	Joule
K	temperatura em Kelvin
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

S Siemens

TPa tera Pascal

W Watt

1 INTRODUÇÃO

O surgimento do concreto remota os tempos da Roma antiga, este material teve como componentes a cal hidráulica, usada como material cimentício, e a pozolana, advinda das proximidades do Monte Vesúvio, no qual ficou conhecido como cal pozolânica (KAEFER, 1998). Com o contato com a água, estes materiais adquiriam a capacidade de endurecer. Com esta nova descoberta, os romanos passaram a adotar essa mistura em suas construções.

O desenvolvimento do concreto se deve a evolução dos estudos de diversos pesquisadores ao longo do tempo, desde dos fundamentos da elasticidade, de Robert Hooke, a descoberta da natureza exotérmica da reação da cal virgem com a água, por Joseph Moxon, os fundamentos da teoria das vigas, desenvolvida por Charles Augustin Coulomb, criação da fórmula que determina a carga máxima de uma coluna antes desta flambar, a combinação do ferro com pedra natural na era moderna, entre outros, até a criação do cimento Portland.

O material mais usado desde o patenteamento do cimento Portland, em 1824, por Joseph Aspdin, é o concreto (KATTAR; ALMEIDA, 1999). Seu grande consumo se deve a características como: a facilidade de execução; sua versatilidade, que não é encontrada em outros materiais construtivos; sua alta capacidade plástica, adquirindo as mais variadas formas; durabilidade; alta resistência à compressão, além da facilidade de adquirir os materiais que o compõe.

O Concreto Convencional (CC), como conhecemos hoje, é composto da união básica de um aglomerante, que é o cimento, agregados, como brita e areia, além da água. Sua formação consiste da reação química oriunda da hidratação do cimento pela água, formando uma pasta que se combina com os agregados da mistura, gerando uma estrutura monolítica proveniente da formação de cristais de sílica.

Os diferentes componentes que podem ser misturados na formulação do concreto têm por objetivo atender as diferentes características e necessidades da construção a que se é destinado. De acordo com Neville e Brooks (2013, p.2), “o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras.”

Apesar do Concreto Convencional já apresentar elevada resistência à compressão, este pode continuar sendo insuficiente para alguns casos, devido às demandas da própria construção civil e suas tecnologias, com projetos arquitetônicos mais arrojados, estruturas mais desafiadoras e pressão populacional dos centros urbanos. É neste contexto que surgiu a

necessidade de se desenvolver novas misturas com capacidade e propriedades superiores ao CC, cumprindo os novos desafios construtivos de forma eficiente.

Concretos de alta resistência (CAR), autoadensáveis (CAA), de alto desempenho (CAD) e reforçado com fibras (CRF) representam importantes avanços para a construção civil, oferecendo propriedades vantajosas tanto no estado fresco quanto no endurecido, além de proporcionarem um aspecto econômico favorável através do aumento da durabilidade das estruturas (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

Inicialmente, as melhorias do concreto eram focadas apenas em aumentar a resistência à compressão. As primeiras estruturas de concreto armado tinham resistência limitada a 15 MPa. Posteriormente, foram desenvolvidos concretos com resistência à compressão superior a 70 MPa e 140 MPa, todos com a redução da relação água/cimento como base, mas com altos consumos de cimento por metro cúbico, o que limitou o seu uso e gerou pouco interesse (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022). Somente com a popularização dos aditivos redutores de água e adições minerais de maior desempenho, os concretos de alta resistência começaram a ser mais utilizados, culminando no desenvolvimento dos CAD.

Possuindo, basicamente os mesmos princípios básicos e matérias-primas, o CAD se difere do CC em relação as suas proporções projetadas ou planejadas, não se limitando apenas à alta resistência mecânica, mas também propriedades como trabalhabilidade adequada, excelente acabamento, integridade e durabilidade em ambientes agressivos. A resistência mecânica não é o único fator que define o CAD, outras propriedades podem ser consideradas para um desempenho diferenciado. Por isso, concretos como o CAA podem ser considerado concretos de elevado desempenho, mesmo sem apresentarem resistência diferente do convencional. Sendo assim, o termo "alto desempenho" refere-se a uma necessidade específica, não necessariamente à resistência elevada.

Assim como a busca pela evolução do concreto fez o CAD superar o CC, os desafios da construção moderna levaram a mesma busca pelo aperfeiçoamento do CAD, levando ao desenvolvimento de compósitos que podem chegar a resistências à compressão maiores que 200 Mpa, como o Concreto de Pós Reativos (CPR), sendo também chamado de Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD).

No CPR, a origem do termo "pós" se deve à presença de uma grande quantidade de materiais finos na composição, enquanto o termo "reativos" é uma referência à capacidade desses pós de reagir com os compostos formados durante a hidratação do cimento,

especialmente quando expostos a altas temperaturas e pressões durante o processo de cura (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

As propriedades do CUAD são uma combinação das encontradas no CAD, no CRF e no CAA, podendo afirmar que o CUAD é uma mistura desses três tipos de concreto, incorporando simultaneamente as características e benefícios de cada um deles (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

As propriedades mecânicas excepcionais e a excelente durabilidade tornaram o CUAD uma escolha cada vez mais frequente para infraestrutura e edifícios (LARRARD; SEDRAN, 1994; FERRIER *et al.*, 2015). Geralmente, essa performance superior está relacionada com fatores como a reduzida relação água/aglutinante e alta densidade de empacotamento de partículas (MENG; KHAYAT, 2018). Apesar da baixa relação água/cimento, o CPR apresenta um grande número de fissuras, em escalas microscópicas ou macroscópicas, o que torna o CPR frágil e sujeito a danos sob cargas externas variáveis. (RICHARD; CHEYREZY, 1995; ABID *et al.*, 2017). Por isso, melhorar suas resistências à tração e à flexão relativamente baixas continua sendo uma questão desafiadora.

Recentemente, diferentes tipos e tamanhos de fibras foram introduzidos no CPR como reforços primários. O princípio de funcionamento era preencher as micro ou microfissuras dentro da matriz do CPR com a alta rigidez e alta razão de aspecto das fibras, melhorando assim a ductilidade do concreto (LI; LEUNG, 1992; XU; HAO; LI, 2012; BRANSTON *et al.*, 2016). O desempenho do CUAD na tração e flexão é significativamente melhorado pela presença de microfibras de aço, cujo efeito é influenciado pelo formato da fibra, razão de aspecto, fração volumétrica, orientação e distribuição da fibra, bem como pela aderência entre a fibra e a matriz cimentícia na estrutura do CUAD (HANNAWI *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2016; ABRISHAMBAF; PIMENTEL; NUNES, 2017; SOVJÁK, 2017; SONG *et al.*, 2018).

Apesar de terem obtido bons resultados, esses métodos ainda não conseguiram inibir de forma fundamental as fissuras primárias do concreto e, em alguns casos, podem até introduzir poros na matriz, podendo aumentar os defeitos do concreto (WANG *et al.*, 2020).

Os pesquisadores começaram a focar no campo da nanotecnologia, principalmente baseada em carbono, para reduzir defeitos iniciais de materiais de concreto e inibir a formação e propagação de microfissuras em escala nanométrica ou micrométrica. Ao incorporar nanopartículas no CPR, é possível refinar o tamanho dos poros na matriz de cimento e melhorar a resistência de união interfacial do CPR (WANG *et al.*, 2020).

Comparado aos nanotubos de carbono (NTC), nanofibra de carbono e nanofolhas de grafite, o óxido de grafeno (OG) é hidrofílico (ALATAWNA *et al.*, 2020) e tem sido empregado para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade da pasta de cimento, argamassa e concreto. Mais recentemente, avanços foram feitos no acoplamento de OG com fibra para melhorar as propriedades de compósitos à base de cimento, predominantemente o desempenho à flexão (LUO *et al.*, 2021).

Este estudo apresenta uma análise experimental da consistência em estado mole e das resistências à compressão, tração na flexão do CPR, em estado duro, empregando nanofolhas de OG, em diferentes porcentagens, por massa de cimento, com macrofibras sintéticas de reforço estrutural, a fim de obter ganhos de desempenho do concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O trabalho tem como objetivo geral a análise dos resultados frente às resistências à compressão e tração na flexão do concreto de pós reativos com adição de óxido de grafeno em diferentes teores, utilizando macrofibras sintéticas de reforço estrutural.

2.2 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a consistência e fluidez das diferentes misturas desenvolvidas em diferentes teores de óxido de grafeno.
- b) Analisar a eficácia da macrofibra sintética nos ganhos de resistência do CPR.
- c) Comparar as resistências à compressão e tração na flexão, em diferentes teores de óxido de grafeno com os corpos de prova de referência, sem e com macrofibras.
- d) Elaborar diagramas das resistências obtidas.
- e) Determinar porcentagem ótima de óxido de grafeno para o teor de macrofibra utilizada.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Concreto de Pós Reativos

O avanço das pesquisas, a necessidade de estruturas mais eficientes em ambientes mais agressivos e exigências de obras militares levaram ao surgimento do Concreto de Pós Reativos. Conhecido também como Ductal®, o CPR, compósito cimentício de ultra alta resistência, foi desenvolvido pelos pesquisadores Pierre Richards e Marcel Cheyrezy, no laboratório de Bouygues, localizado na França, em parceria com as empresas Lafarge e Rhodia, em 1990 (AÏTCIN; RICHARD, 1996). A primeira obra conhecida a utilizar estrutura com CPR foi a passarela de Sherbrooke, para pedestres e ciclistas, no Canadá, construída em 1998, com 60m de comprimento (BIZ, 2001).

O CAD, com sua composição microestrutural, alcançou máxima resistência à compressão na ordem de 100 MPa ou mais, entretanto, para o nível exigido de resistências mais elevadas, o agregado graúdo torna-se o elo mais fraco do concreto. Segundo Li (2011), utilizar agregados com granulometria bem definida causa diminuição de vazios, o que gera um aumento da resistência à compressão do concreto.

Como mencionado por Tutikian, Isaia e Helene (2011), sob a ótica da granulometria, o CPR é uma argamassa e não um concreto, ao qual pode ser misturado com fibras. Eles também mencionam que a eliminação de agregados graúdos e o tamanho médio das partículas de 0,2 mm, dá origem ao seu nome, Concreto de Pós Reativos. Devido as propriedades serem as mesmas do concreto em grau mais elevado, o termo “concreto” sobrepujou em função do seu desempenho.

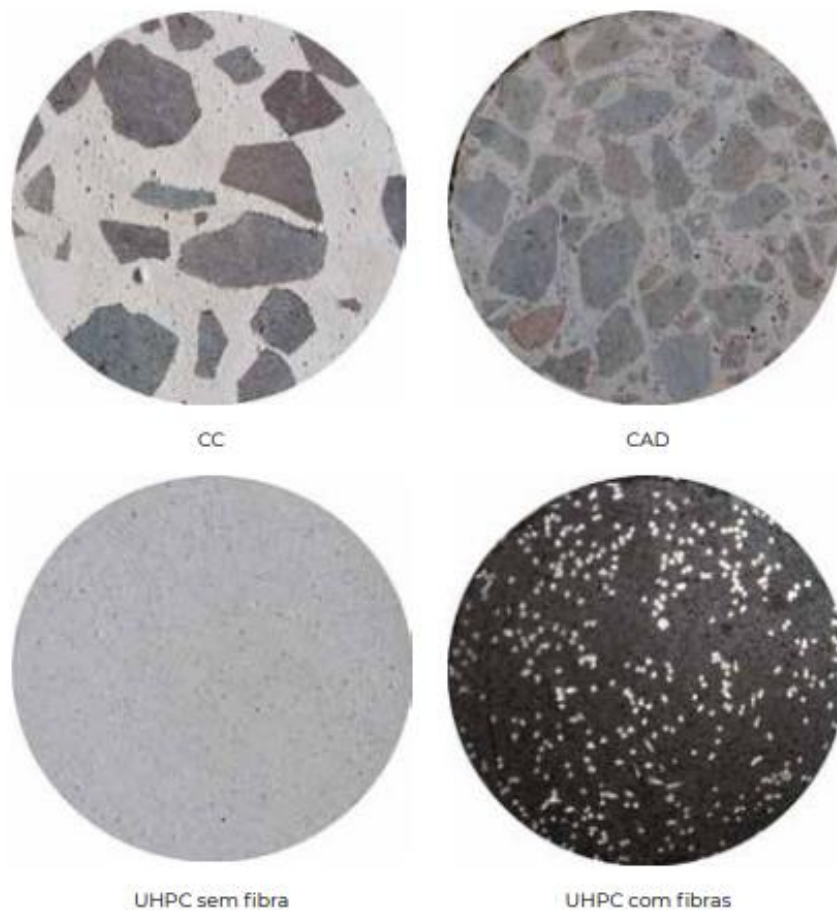
As propriedades aprimoradas do CPR estão ligadas à elevada homogeneização da mistura, pela eliminação de agregados graúdos, relação água/cimento inferior ao CC, utilização de aditivos superplastificantes e por consequência, a diminuição de vazios internos, o que otimiza o empacotamento das partículas finas, conferindo ao concreto, uma maior densidade, assim como menor porosidade e microfissuração, pela melhor distribuição de cargas sobre as partículas finas, elevando sua resistência e diminuindo sua permeabilidade.

De acordo com Levy (2005), devido aos menores poros e que não possuem conexão entre si, os concretos de resistência elevada estão menos sujeitos à agentes agressivos presentes no meio, o que aumenta sua durabilidade, de modo consequente, aumenta a vida útil do projeto da estrutura.

Apesar da elevada durabilidade e capacidade de atingir resistências superiores a 200 MPa, o CPR, assim como os concretos convencionais e os de alto desempenho, apresenta comportamento frágil. Ao se adicionar fibras de aço à mistura, as fibras controlam o surgimento de fissuras na matriz do concreto, melhoram suas características de resistência à tração, flexão, tenacidade e ao impacto, além do concreto ter ganho de ductibilidade. Para Biz (2001), a aplicação de fibra no concreto diminui a trabalhabilidade, que deve ser compensada pela utilização de aditivos superplastificantes.

Na Figura 1, a matriz do CC, CAD e CUAD sem fibras e com fibras revela a estrutura característica de cada tipo de concreto. Pode-se observar a diferença na zona de transição, que é a região mais frágil do concreto, apresentando uma maior relação água/cimento e presença de vazios (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

Figura 1 – Matriz do concreto convencional (CC), concreto de alto desempenho (CAD) e CUAD sem e com fibras



Fonte: Christ, Tutikian e Helene, 2022

As propriedades mecânicas e físicas superiores do CPR permitem reduções consideráveis da seção das estruturas, principalmente aquelas que estão sujeitas à compressão, portanto, há ganhos econômicos pela menor necessidade de agregados, cimento, água e aço, tanto na compra, quanto no transporte destes materiais, assim como o melhor aproveitamento das áreas de um empreendimento que utilize esse tipo de concreto.

3.2 Princípios do Concreto de Pós Reativos

Como mencionado por Richard e Cheyrezy (1995), devem ser aplicados os seguintes princípios básicos para a fabricação do CPR:

- Aumento da homogeneidade pela eliminação de agregados graúdos;
- Melhoria da densidade pela otimização da distribuição granulométrica, e aplicação de pressão antes e durante a pega;
- Melhoria da microestrutura por tratamento térmico pós-cura;
- Aumento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço de pequeno porte;
- Manter os procedimentos de mistura e moldagem o mais próximo possível da prática existente.

Os autores ainda acrescentam que a aplicação dos três primeiros princípios produz uma matriz com alta resistência à compressão, mas com ductilidade não superior à da argamassa convencional. A inclusão de fibras contornaria o problema, melhorando a resistência à tração e também permite a obtenção do nível de ductilidade necessário. Já as medidas relativas à composição, que são homogeneidade e densidade, são conceitos base do CPR, sendo aplicadas em todos os casos. Quando se menciona melhorar o desempenho durante sua produção, pode-se aplicar pressão e cura térmica. Visando as dificuldades tecnológicas envolvidas, como a aplicação de pressão, e/ou seu custo, como a aplicação de tratamento térmico, requer avaliação da aplicação do CPR para cada caso.

Segundo Biz (2001), o Concreto de Pós Reativos tem como característica uma quantidade de cimento elevada, material em pó e sílica ativa, além de uma pequena quantidade de água na mistura, dispondo de uma relação água/(cimento + sílica), que pode chegar a um valor de 0,14. O autor ainda acrescenta que o CPR foi classificado segundo a divisão de duas famílias, os CPRs de 200 MPa e 800 Mpa.

A Tabela 1 apresenta composições típicas destas famílias e a Tabela 2 demonstra algumas propriedades desse concreto.

Tabela 1 – Composição típica de CPR em massa

	CPR 200				CPR 800	
	Sem fibras		Com fibras		Agregado silicoso	Agregado de aço
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica Ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia 150-600 µm	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	—
Pó de quartzo d=10 µm	—	0,39	—	0,39	0,39	0,39
Superplastificante (Poliacrilato)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra de aço l=12 mm	—	—	0,175	0,175	—	—
Fibra de aço l=3 mm	—	—	—	—	0,63	0,63
Agregados de aço <800 µm	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de compactação	—	—	—	—	50 MPa	50 MPa
Temperatura de cura térmica	20 °C	90 °C	20 °C	90 °C	250–400 °C	250–400 °C

Fonte: Richard e Cheyrez (1995)

Tabela 2 – Comparação das propriedades mecânicas dos concretos

Propriedades	CC	CAD	CPR
Resistência à compressão (MPa)	20–50	60–80	200–800
Resistência à flexão (MPa)	4–8	6–10	15–140
Energia de fratura (J/m ²)	130	140	1000–40000
Deformação última de tensão (10 ⁻⁶)	100–150	100–150	2000–8000

Fonte: Dugat *et al.* (1995 *apud* VANDERLEI, 2004)

3.2.1 Aumento da homogeneidade

O concreto convencional possui uma estrutura heterogênea, formado pela ligação da pasta de cimento com os diferentes tamanhos de agregados. Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), por apresentar mais falhas em sua microestrutura e reter mais água de exsudação, o que prova uma zona de transição maior, os agregados devem ter dimensão máxima característica limitada.

A heterogeneidade do concreto convencional pode apresentar problemas como o surgimento de deformações diferenciais, devido aos agregados e a pasta de cimento terem módulo de elasticidade diferentes, causando fissuras nas interfaces destes e reduzindo sua resistência, como mencionado por Metha e Monteiro (2008). Já Vanderlei (2004) diz que, entre

os módulos de elasticidade do agregado e da pasta, mecanicamente, há diferença; já fisicamente, há diferença entre os coeficientes de expansão térmica da pasta endurecida e do agregado; e quimicamente existe diferentes retrações.

Os agregados de concreto convencional são materiais rígidos, assim a aplicação de forças de compressão, surgem fissuras na pasta, pelo aparecimento de tensões de tração e cisalhamento na interface pasta/agregado. Sendo que o tamanho da fissura está relacionado com o diâmetro do agregado (VANDELEI, 2004).

A ideia do CPR é a substituição do agregado graúdo por areia fina, proporcionando um menor volume de vazios, devido ao empacotamento dos agregados, uma melhor distribuição granulométrica, eliminação da zona de transição e aumento da superfície do esqueleto granular. Para Richard e Cheyrezy (1995), como o tamanho do agregado é reduzido significativamente, também serão bem menores as microfissuras de origens mecânicas, oriundas de cargas externas; químicas, devido à retração autógena e termomecânicas, causadas por expansões diferentes entre a pasta e o agregado quando submetidos à cura térmica.

3.2.2 Aumento da compacidade

Com a otimização da distribuição granulométrica, melhor as partículas serão compactadas, por consequência, maior será a compacidade e resistência à compressão (RICHARD e CHEYREZY, 1995). Além desta otimização da distribuição dos grãos, a compacidade também é influenciada pela aplicação de pressão. Segundo Vanderlei (2004), uma maneira eficaz de aumentar a densidade e, consequentemente a resistência à compressão, é a aplicação de pressão de confinamento ao concreto fresco antes e durante a concretagem.

Ainda segundo o autor, a pressão aplicada apresenta três efeitos positivos, sendo, a diminuição do ar incorporado em poucos segundos; a compensação da retração química pela redução da porosidade, devido à aplicação contínua da pressão durante o endurecimento do concreto; e remoção do excesso de água, caso a aplicação da pressão seja realizada no concreto fresco, em uma fôrma que não seja totalmente à prova d'água, na qual esta água será expelida, sem que haja a extrusão das partículas sólidas finas.

Quando todos os efeitos de pressão ocorrem, é possível aumentar a densidade relativa em mais de 6%, e a resistência à compressão é altamente dependente dessa densidade. A resistência à tração não aumenta muito significativamente com a aplicação de pressão (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

3.2.3 Refinamento da microestrutura

É sabido que concretos de resistência normal e mesmo os de alto desempenho apresentam piores resultados de resistência à compressão e permeabilidade quando submetidos a tratamento térmico de 60°, 80° ou 95°C. Esta cura aumenta a resistência inicial desses concretos, em comparação com a cura normal à temperatura ambiente, mas acaba reduzindo suas resistências finais. A cura térmica altera a microestrutura do concreto, aumentando a porosidade. (BIZ, 2001).

Como dito por Richard e Cheyrezy (1995), para o Concreto de Pós Reativos, quando este é tratado termicamente, formam-se hidratos cristalinos, que melhoram as propriedades mecânicas do material. Este tratamento é iniciado após a pega do cimento e pode ser feito em ambiente com vapor d'água ou ar quente. Já Biz (2001), comenta que essa cura térmica tem efeito vantajoso na resistência, pois incita e acelera novas reações pozolânicas. Quando acompanhada por pressão de confinamento, esse tratamento possibilita a diminuição de porosidade e ganho de resistência à compressão.

Richard e Cheyrezy (1995b, *apud* VANDERLEI, 2004) comenta que os motivos da melhora das propriedades mecânicas ainda não são claros, entretanto, é sabido que além da desidratação da pasta aglomerante endurecida na cura térmica, a reação da cal com a sílica ativa, há a formação de cristais. Para temperaturas menores que 200°C, forma-se tobermorita, já para temperaturas maiores que 200°C, ocorre a formação de truscottita, girolita, xonotlita e hillebrandita a altas temperaturas, dependendo da relação cal/sílica ativa.

Zanni *et al.* (1996) mostram aumento do comprimento e montante da cadeia de hidratos C-S-H e a reação pozolânica com a sílica ativa e o pó de quartzo, no estudo de reações de hidratação. Utilizou-se no estudo, a variação de temperatura da cura térmica de 20°C, 90°C, 200°C e 250°C, assim como o tempo de duração. Os resultados mostraram que houve aumento da cadeia C-S-H com o aumento da temperatura e uma modificação na microestrutura acima de 200°C no CPR. O aumento da temperatura do tratamento térmico acelera expressivamente a atividade pozolânica da sílica ativa e do pó de quartzo, sendo a duração dessa cura necessária à hidratação e atividade pozolânica.

Os ensaios realizados por Richard e Cheyrezy (1995) mostram que a cura térmica a 90°C estimula o crescimento da hidratação do cimento, como também o comportamento pozolânico da sílica ativa e pó de quartzo. Os ensaios constatarem também, que não é vantajoso adotar temperaturas superiores a 90°C em modelos que não são comprimidos antes da pega do cimento; e que há melhoras significativas nas propriedades mecânicas em modelos

comprimidos e tratados à temperatura inferiores ou igual a 90°C. Para temperaturas de 20°C as atividades pozolânicas não são relevantes, entretanto, podem ser melhoradas um pouco com a adição de sílica ativa, e o tamanho dos cristais de C-S-H são pequenos.

3.2.4 Aumento da ductibilidade

De acordo com Vanderlei (2004), o Concreto de Pós Reativos, sem a adição de fibras, tem comportamento elástico-linear e apresenta baixa energia de fratura, de no máximo 30 J/m². Para a melhoria da ductibilidade, são utilizadas fibras de módulo de elasticidade elevado, no que encaminha para a escolha por fibras metálicas, fibras de carbono ou de polímeros.

A dosagem das fibras é feita de modo experimental e são utilizadas em percentuais que variam entre 1,5% e 3% do volume do concreto (RICHARD e CHEYREZY, 1995). Os autores também comentam que 2%, ou aproximadamente 155 kg/m³ de fibras, é o ideal no quesito econômico.

3.3 Materiais típicos do CPR

A fabricação do Concreto de Ultra Alto Desempenho exige um importante critério de seleção dos materiais para garantir as características necessárias a qual se é destinado. O CPR consisti da mistura de cimento Portland, areia fina, pó de quartzo, aditivo superplastificante e sílica ativa. Apesar de grande uso, as fibras de aço não são intrínsecas ao CPR, seu uso é destinado a melhorar características como ductibilidade e resistência à tração, quando desejado. Vanderlei (2004) considera as fibras de aço como uma inclusão especial.

3.3.1 Cimento Portland

Segundo Cordeiro (2001), o cimento Portland é um material pulverulento, aglomerante hidráulico, e seus componentes são hidratados quando misturados com água, e após o endurecimento, não se decompõem mesmo que seja novamente submetido à água.

O tipo de cimento tem grande influência nas características do CPR, o que é fundamental devido a sua alta resistência mecânica. A seleção do cimento Portland para CPR é baseada em duas propriedades: sua composição e teor de finos e compatibilidade com aditivos de alta eficiência (GUSMÃO, 2017).

De acordo com Neville (2016), um aumento na finura significa um aumento na quantidade de sulfato de cálcio (CaSO_4) necessária para retardar a pega, pois em cimentos mais finos, a quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) disponível para hidratação inicial é maior. Quanto mais fino for o cimento, maior será a necessidade de água para se ter uma pasta de consistência normal. Em termos de composição, Copolla *et. al.*, (1997) diz que é preferível usar um cimento mais puro e com menos quantidade de finos, pois cimentos com alta finura Blaine não são considerados satisfatórios, quando usados em CPR, devido aos requisitos de água necessária para sua hidratação.

Richard e Cheyrezy (1995) dizem que o cimento com as melhores propriedades reológicas e mecânicas é o cimento com alto teor de sílica. No entanto, este tipo de cimento sofre de uma velocidade de pega muito lenta, o que inviabiliza a sua utilização em determinadas aplicações, além de não poder controlar as adições que já estão dentro do cimento. Cimento convencional de pega rápida e de alto desempenho oferece comportamento mecânico muito similar, apesar de maior demanda de água.

O cimento mais indicado por Bonneau *et al.* (1996) para se fazer o CPR é o cimento Portland comum (CP-I). Mesmo que possua uma maior demanda de água, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V-ARI) é preferível por outros autores.

Para a produção do CPR, a compatibilidade do cimento com o aditivo de alto desempenho é fundamental, já que o aditivo é um componente que permite uma baixa relação água/cimento quando utilizado (GUSMÃO, 2017).

3.3.2 Areia Fina

A seleção do agregado de partículas menores é desejável devido à maior superfície específica, que permite a distribuição de tensões incidentes e redução de contato, prevenindo potenciais falhas localizadas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Esta escolha se baseia pela ciência de que o agregado é o ponto fraco da matriz, devido à transferência de tensões (AÏTCIN, 2000).

A definição da areia a ser utilizada, leva-se em consideração sua composição mineral, diâmetro médio das partículas, composição granulométrica, forma das partículas, dosagem da mistura em massa (VANDERLEI, 2004).

Neste contexto, Biz (2001) diz que a utilização de areia como agregado de diâmetro máximo no CPR, se justifica pela obtenção de uma menor permeabilidade do concreto, em conjunto de uma melhor homogeneização dos materiais, de modo a garantir a se evitar vazios

e ausência de poros capilares no compósito. Richard e Cheyrezy (1995) recomendam uso exclusivo de agregados miúdos com diâmetro médio de 250 μm , limitado por diâmetro máximo de 600 μm e mínimo de 150 μm , garantindo a não interferência das partículas finas da areia com as maiores de cimento, que variam de 80 a 100 μm .

A areia fina pode ser obtida peneirando-se pó de brita (areia fina artificial), no qual os grãos são muito angulares, ou simplesmente extraindo areia natural de grão fino, sendo estes mais arredondados. Ambos os tipos de areia podem ser usados para produzir CPR, no entanto, a demanda de água é menor para areia natural, por isso seu uso é preferível (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

3.3.3 Pó de Quartzo

Biz (2001), menciona que o pó de quartzo com diâmetro máximo entre 5 e 25 μm é utilizado para a produção de CPR. O material será adicionado à mistura para ajudar a fechar o pacote granulométrico e preencher os vazios entre os grãos de areia. Yazici, Deniz e Baradan (2013) complementam esclarecendo que, apesar de o pó de quartzo ser considerado um material inerte, ele se torna reativo e catalisa as reações pozolânicas quando passado por tratamento térmico.

3.3.4 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante é de fundamental importância para a produção do CPR, por manter a relação água/aglomerante o mais baixa possível, assim como a manutenção de boa plasticidade. Estes aditivos têm a capacidade de reduzir a quantidade de água necessária para a mistura de um determinado concreto em até três a quatro vezes, em comparação com os aditivos redutores de água convencionais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A determinação da dosagem do superplastificante é experimental e influenciada pelo tipo de cimento e testes de compatibilidade, como o cone Minislump e o cone Marsh (BIZ, 2001).

Com a adição da quantidade máxima de aditivo, a relação água/aglomerante pode ser diminuída ao limite mínimo, aprimorando as propriedades mecânicas do CPR. O que deve ser levado em consideração, porém, é o teor de sólidos e a natureza da cadeia polimérica do aditivo. Atualmente os mais eficientes são os baseados em policarboxilatos com cerca de 40 a 45 % de teor de sólidos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A proporção típica de superplastificante (SP) utilizada em concretos convencionais é de aproximadamente 1%, em relação à massa do cimento. Essa quantidade pode ser adicionada à mistura sem causar problemas de exsudação excessiva ou retardo na pega. (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para o CPR, Vanderlei (2004) diz que os SPs mais indicados são os à base de poliacrilato ou policarboxilato, tendo quantidade entorno de 1,5% a 2,5% em massa de cimento, enquanto Yiğiter *et al.* (2012) consideram uma taxa de 3% a 5% de superplastificante.

3.3.5 Sílica Ativa

A sílica ativa é a adição mineral recomendada para os CPR devido à forma de suas partículas, bem arredondadas, e o tamanho delas, cerca de 100 vezes menor do que o cimento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Segundo Richard e Cheyrezy (1995), as principais finalidades da sílica na formulação do CPR são:

- Preenchimento dos vazios entre as partículas da próxima classe superior (cimento);
- Melhora das características reológicas pelo efeito de lubrificação resultante da esfericidade perfeita das partículas básicas;
- Produção de hidratos secundários por reação pozolânica com a cal resultante da hidratação primária.

Neville (2016) comenta que as reduzidas partículas que compõem a sílica ativa, quando em contato com o hidróxido de cálcio gerados por efeito da hidratação do cimento, aceleram a reação, devido à alta capacidade reativa da sílica. Essas pequenas partículas entram facilmente entre os espaços deixado pelas partículas de cimento, provocando como consequência, uma melhora no empacotamento. Tutikian, Isaia e Helene (2011) complementam com a recomendação da utilização de sílica em grandes quantidades, sendo de 25% o percentual de substituição da quantidade de cimento pela sílica ativa. Nessas quantidades, não existe mais hidróxido de cálcio para ser consumido, então, a sílica teria função de microfiller, atuando no preenchimento de pequenos vazios dos agregados e na zona de transição.

3.3.6 Fibras

A adição de microfibras à composição do CPR torna-o mais flexível e capaz de suportar grandes deformações. A incorporação de fibras reforça a resistência mecânica do concreto, reduz a retração, melhora a capacidade de resistir a impactos e aumenta sua resistência ao fogo. (DAWOOD; RAMLI, 2011).

Como o comportamento da matriz do CPR é mais linear e elástico, Richard e Cheyrezzy (1995) dizem que as fibras de aço devem ser utilizadas para proporcionar o aumento da ductilidade da mistura.

A grande diferença do CPR para outros tipos de concreto está na eliminação da armadura passiva, isto se deve a adição das fibras de aço à mistura, conferindo ganho de ductibilidade, resistência à tração e a flexão, o que alavanca o nível do material (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Os autores ainda acrescentam que as dimensões das fibras estão na ordem de comprimentos de 13 mm e diâmetro de 0,15 mm.

A utilização de fibras de aço confere menor flexibilidade, o que contribui para melhorar a resistência à tração do concreto. Por outro lado, as fibras de polipropileno, que são mais flexíveis, auxiliam nas tensões geradas logo após as primeiras fissuras. (BANTHIA; GUPTA, 2004).

As fibras desempenham um papel crucial principalmente após a fissuração, onde a energia absorvida pelo compósito durante o processo de fratura é distribuída pelas fibras. Elas agem como pontes de transferência de tensão entre as partes fissuradas da matriz do material (VILLARES, 2001).

O desempenho da fibra no concreto depende de diversas características específicas. No entanto, para a classificação básica do material, as propriedades mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. Essas duas propriedades definem a capacidade de reforço que a fibra pode conferir ao concreto. (FIGUEIREDO, 2005).

Com a demanda cada vez maior pela utilização de fibras, de diferentes dimensões e materiais, surgiu as macrofibras sintéticas destinadas ao reforço do concreto, possuindo alto módulo de elasticidade e resistência à tração. Diferentemente das fibras de polipropileno convencionais, essas macrofibras foram desenvolvidas com o propósito de oferecer um reforço estrutural semelhante ao proporcionado pelas fibras de aço (FIGUEIREDO, 2011).

Devido aos teores de macrofibras sintéticas de reforço (MFSR) geralmente serem baixos, comumente abaixo de 1%, em volume, é importante que as fibras apresentem uma resistência superior à matriz circundante. Além disso, é desejável que as fibras tenham uma alta relação de aspecto, que é obtida dividindo-se o comprimento pelo diâmetro da fibra (LERCH *et al.*, 2017). Os autores acrescentam que as fibras ao serem submetidas a esforços de tração, ocorre a contração lateral das fibras devido ao alongamento longitudinal, resultando na ruptura das ligações entre as fibras e a matriz de concreto circundante.

Devido a algumas limitações da fibra de aço, a MFSR pode ser uma solução melhor para melhorar o desempenho, como: facilitar a estrutura de concreto leve; alta resistência à corrosão; melhor resistência à flexão residual após o surgimento de fissuras; menor largura de fissura e melhor desempenho em impacto, abrasão junto com uma superfície mais nivelada do que o concreto reforçado com fibra de aço tradicional (HASAN; AFROZ; MAHMUD, 2011).

Em pesquisas com CRF, Hasan, Afroz e Mahmud (2011) encontraram teor ótimo de MFSR de 0,42% para resistência à tração e 0,51% para resistências à compressão e ao cisalhamento. Ardeshana e Desai (2012) encontraram porcentagem ótima de 0,30% de macrofibras, mesmo em ambientes agressivos com Na_2SO_4 , aos 90 dias de idade.

Ao adicionar fibras, é possível comprometer a trabalhabilidade do composto, o que pode prejudicar sua capacidade de moldagem e enfraquecer sua resistência à compressão. O formato, concentração, dimensões e distribuição das fibras são os principais fatores que contribuem para esse efeito. Para melhorar a otimização das propriedades mecânicas e da permeabilidade, é possível combinar diferentes tipos e tamanhos de fibras (DAWOOD; RAMLI, 2011).

Para a hibridização de fibras e um material com ótima trabalhabilidade, elevada resistência e longa durabilidade, busca-se alcançar a proporção ideal de cada tipo de fibra (CHRIST, 2019). A utilização de diferentes tipos e tamanhos de fibras em conjunto ajuda a minimizar a formação e a propagação de fissuras. (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2003).

3.4 Produção do CPR

O processo de mistura para fabricação do CPR deve ser cuidadosamente preparado, principalmente quando se trata do tempo de mistura, que está diretamente ligado à qualidade do CPR. A dosagem da água deve ter alta precisão, a fim de obter uma relação água/cimento baixa, conferindo a manutenção da reologia do concreto fresco (características físicas no estado plástico) (VANDERLEI, 2004).

A ausência de agregados graúdos é substituída pelo uso de misturador forçado, sendo este um importante dispersador de pós, já que para o CC, os agregados graúdos contribuem com a dispersão e mescla dos componentes menores (VANDERLEI, 2004). Devido a essas características, a produção do CPR em obras que utilizam betoneiras ou caminhões betoneira é mais desafiadora. Isso ocorre porque a homogeneização dessa mistura é feita principalmente por gravidade, e a presença do agregado graúdo desempenha um papel fundamental no processo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Além disso, as condições de cura de alta temperatura e alta pressão necessárias são difíceis de operar em canteiros de obras tradicionais. Portanto, atualmente, a produção de CPR está restrita à indústria de pré-moldados, que utiliza usinas dosadoras de concreto e que podem gerar áreas de cura de alta temperatura e, em casos específicos, de alta pressão (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A ordem atribuída para a mistura do CPR é, segundo Vanderlei (2004): homogeneização de todos os materiais secos, adição de água de hidratação e superplastificante para fluidificação da pasta, e adição de fibras de aço pós homogeneização da pasta.

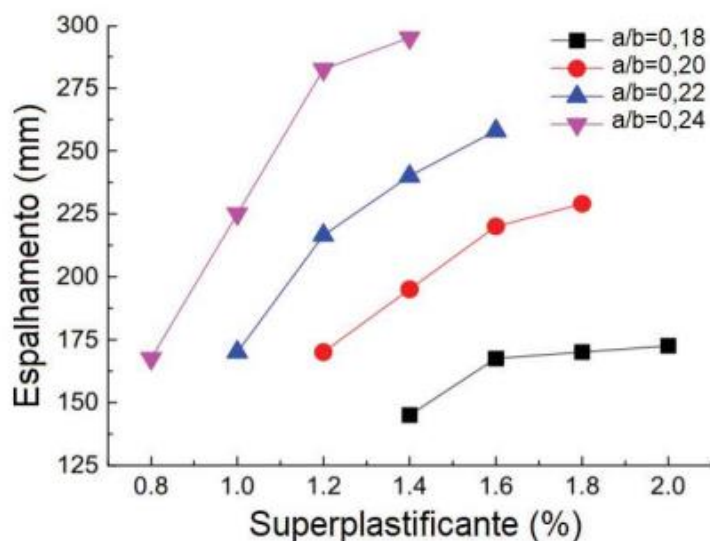
Para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas do CPR, recomenda-se a utilização de pressão nas peças na fase de endurecimento do concreto, reduzindo vazios nos momentos iniciais, já nos primeiros minutos, a compactação será aumentada pela eliminação do excesso de água e, por fim, depois de 6 a 12h, a porosidade química também é eliminada (BIZ, 2001).

3.5 Reologia

O CUAD possui propriedades mecânicas superiores e durabilidade em comparação com o concreto convencional devido à sua baixa relação água/cimento, alto teor de cimento e ausência de agregado graúdo, melhorando a homogeneidade da mistura. Além disso, o uso de altas dosagens de SP ajuda a garantir alta fluidez para atingir uma consistência autonivelante e melhorar a dispersão do sistema aglomerante. Além do SP, pesquisadores também têm utilizado outros tipos de aditivos químicos, como modificadores de viscosidade (MENG; KHAYAT, 2017) e desaerantes (MENG; KHAYAT, 2016; HUANG; GAO; JIA, 2019), para melhorar as propriedades mecânicas do CUAD.

A quantidade de água utilizada nas misturas de CUAD tem um impacto significativo na fluidez do material. Wang *et al.* (2017 *apud* CHRIST, 2019) mostram que quanto menor for a relação água/aglomerante, menor será a fluidez do CUAD, mesmo com um aumento significativo do aditivo superplastificante, como visto na Figura 1.

Figura 2 – Variações no espalhamento da mistura quando utilizadas diferentes relações água/aglomerante e aditivos superplastificantes



Fonte: Wang *et al.* (2017 *apud* CHRIST, 2019)

Christ (2019) evidencia que a relação água/aglomerante exerce uma influência maior na trabalhabilidade do que a quantidade de aditivo superplastificante, e que em relações abaixo de 0,20, a porcentagem de aditivo adicionado à mistura tem uma influência menor.

Para estudar as propriedades reológicas, é necessário compreender as características da pasta, argamassa e compósito de CUAD. Yahia (2011), Yahia e Khayat (2001, 2003) têm mostrado que as misturas de pasta de CUAD apresentam um comportamento não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, indicando a inadequação do modelo linear de Bingham. Modelos não lineares, como o modelo de Bingham modificado e o modelo de Herschel-Bulkley, podem ser aplicados para ajustar os dados de tensão de cisalhamento - taxa de deformação.

No entanto, há informações limitadas sobre o comportamento reológico de misturas de CUAD reforçadas com fibras. Martinie, Rossi e Roussel (2010) observaram uma relação semelhante entre as propriedades reológicas da argamassa e do CUAD, e identificaram que há uma concentração crítica de fibras, além da qual as propriedades reológicas do CUAD aumentam significativamente em comparação com as pastas ou argamassa. Diferentes estudos relataram comportamentos de fluxo linear (CHOI *et al.*, 2016; MENG; KHAYAT, 2017; ARORA, 2018) e não linear para pastas e argamassas de CUAD, atribuídos às diferenças nos intervalos de taxa de cisalhamento aplicados durante os testes reológicos e nos constituintes das misturas. Essas diferenças destacam a importância de conhecer os intervalos de taxa de

cisalhamento esperados durante o processamento do material para uma estimativa precisa das propriedades reológicas e previsão do comportamento de fluxo.

As propriedades reológicas do material à base de cimento também variam com o tempo, devido aos processos de floculação coloidal e nucleação de hidratação. Durante a fase inicial, quando a hidratação do cimento está em repouso, as mudanças nas propriedades reológicas são principalmente reversíveis, resultando em um comportamento tixotrópico (ROUSSEL *et al.*, 2012). Esse comportamento tixotrópico tem impacto direto na pressão exercida sobre a fôrma (ASSAAD; KHAYAT; MESBAH, 2003) e na estabilidade do material em repouso (ROUSSEL, 2006). Além disso, se o material permanecer em repouso por um longo período durante o processo de colocação, a tixotropia pode levar à perda de trabalhabilidade (ROUSSEL *et al.*, 2012). A tixotropia dos materiais à base de cimento é comumente avaliada em termos de tensão de escoamento estática e sua variação ao longo do tempo (OMRAN; NAJI; KHAYAT, 2011).

3.6 Propriedades do CPR

O Concreto de Pós Reativos é uma evolução do concreto convencional, que utiliza adições minerais especiais em substituição parcial ao cimento Portland e substituição total dos agregados graúdos. Essas modificações proporcionam ao CPR propriedades excepcionais que o diferenciam do concreto tradicional, como resistência mecânica elevada, durabilidade aprimorada e capacidade de autocompactação. Segue algumas das propriedades abordadas.

3.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro para avaliar outras propriedades do CPR, assim como o tipo e sua qualidade (VANDERLEI, 2004). A relação água/aglomerante utilizada está na faixa de 0,16 a 0,20, esta influencia diretamente na resistência, assim como a quantidade de fibras empregadas e a cura térmica. Nessa faixa, é preciso empregar aditivos para dispersar as partículas, já que a matriz consiste apenas em materiais extremamente finos (EIDE; HISDAL, 2012). O CPR terá melhor resistência à compressão, quanto maior for sua densidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

As principais normas de dimensionamento de estruturas de concreto apresentam valores máximos de água/cimento, isto se deve pela implicação direta da quantidade de água com a resistência à compressão. Além disso, a quantidade de água afeta a durabilidade e trabalhabilidade do concreto (PACHECO, 2016).

O estudo de Soliman e Tagnit-Hamou (2016) mostra um aumento da resistência em 8%, com a adição de 2% fibras para CUAD. Este aumento de resistência é devido, principalmente, pelo combate da propagação das fissuras provocadas pelo esforço axial durante o carregamento (FEHLING; BUNJE; LEUTBECHER, 2004).

O CPR é separado em duas categorias, os CPR 200, no qual sua resistência à compressão varia entre 170 a 230 MPa; e o CPR 800, que tem variação de resistência de 500 a 800 MPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram concretos com resistência à compressão de 200 MPa, quando a pressão limite é aplicada ao material ainda fresco e curado termicamente. Vanderlei (2004) comenta que essa pressão provoca a redução do ar incorporado, remove o excesso de água e compensa a retração química. O autor ainda diz que a cura térmica potencializa a resistência à compressão.

3.6.2 Resistência à tração

Com a adição de fibras de aço, ocorre aumento significativo da resistência à tração do CUAD, mesmo quando surge a primeira fissura, concedendo ao material uma maior ductibilidade e tenacidade quando comparado a misturas sem a incorporação de fibras (VOORT; SULEIMAN; SRITHARAN, 2008).

As excelentes propriedades mecânicas das fibras de aço como sua alta resistência, grande módulo de elasticidade, elevada durabilidade e alta ductibilidade, diante de um ambiente alcalino, fazem delas as mais usadas em Concretos de Ultra Alto Desempenho. Por essas características, a falha se mostrará sempre na ligação entre as fibras e a matriz do cimento (EIDE; HISDAL, 2012).

Fehling, Bunje e Leutbecher (2004) descrevem os principais aspectos a serem considerados para que as fibras apresentem os ganhos de ductibilidade e resistência à tração esperados:

- O teor de fibras a ser acrescentado;
- Comprimento e diâmetro das fibras;
- A relação entre o comprimento das fibras e o tamanho máximo do agregado;
- A aglomeração das fibras, quando utilizadas fibras compostas por diversos filamentos, se são facilmente desprendidos ou se há um acúmulo dos filamentos em um ponto;
- A orientação das fibras na mistura.

Além dos aspectos apresentados, a elevada influência dos benefícios da incorporação das fibras está relacionada com suas propriedades mecânicas. Fibras com módulo de elasticidade menor que o módulo da matriz terão ruptura antes das primeiras fissuras aparecerem, logo, não contribuirão para o aumento da resistência à tração (QUININO, 2015).

As propriedades mecânicas influenciadas pelo material das fibras e seu formato afetam a resistência à tração do CRF. Macrofibras com ancoragem, rugosidade da superfície, seção transversal, diâmetro e comprimento são propriedades que impactam no desempenho do concreto em relação às resistências de ligação e tração, como visto na pesquisa de Lerch *et al.* (2018).

No estudo foi utilizado macrofibras de polipropileno com comprimento entorno de 50 mm, módulo de elasticidade maiores que 1 GPa, seções transversais e superfícies diversas, como visto na Tabela 3.

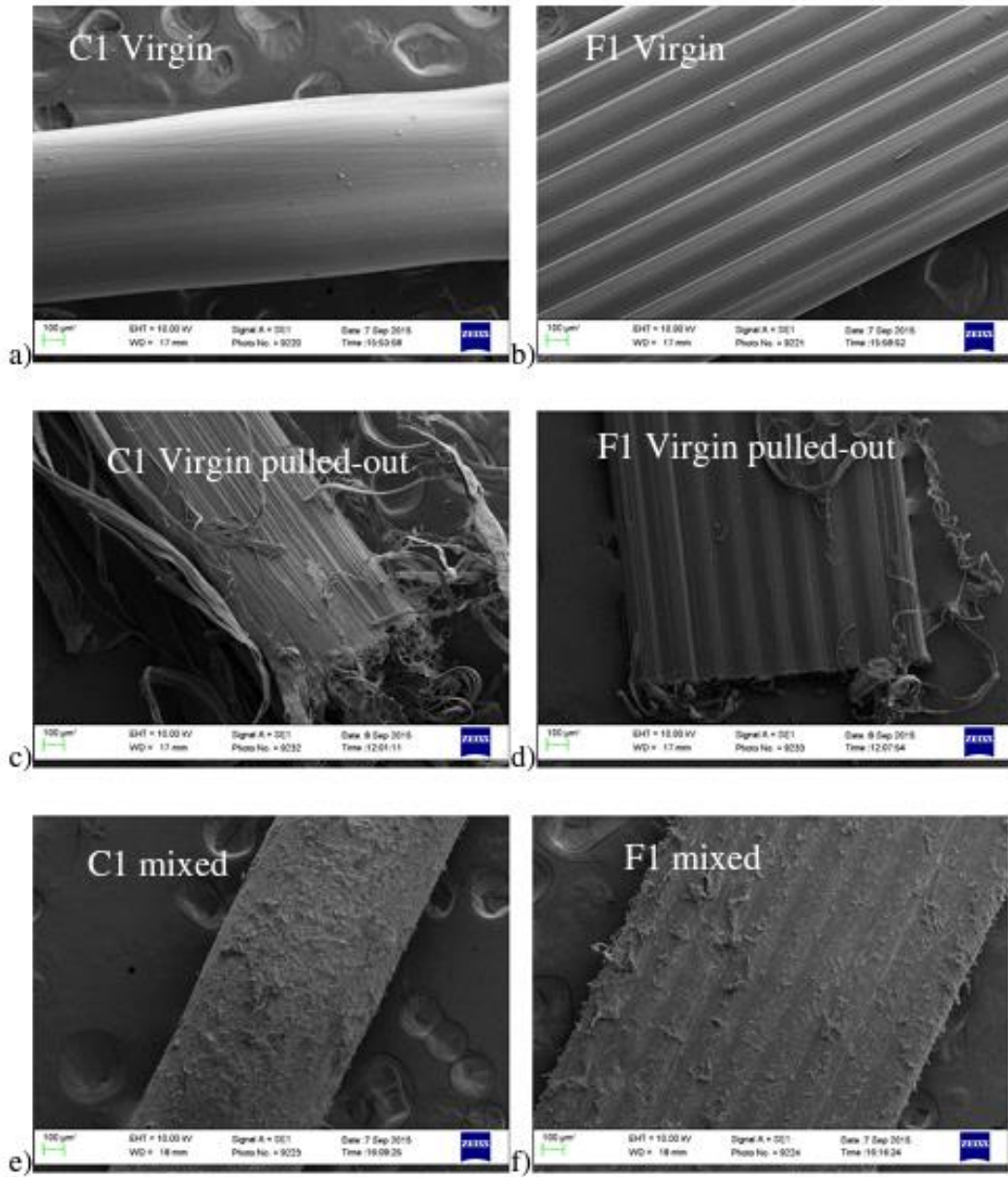
Tabela 3 – Propriedades das fibras pesquisadas

Nome da fibra comercial	Comprimento (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Diâmetro (mm)	Seção transversal	Deformidade da superfície
Geotex 500	50	1,62–2,70	0,74	Redonda	Frisado
Geotex 600	50	1,80–3,0	0,64	Plana	Corrugado (ambos lados)
Fibsol Macrosol	50	1,60–2,67	0,60	Plana	Corrugado (um lado)
EPC BarChip48	48	10	0,71	Irregular	Em relevo
EPC BarChip54	54	10	0,85	Irregular	Em relevo
EPC BarChip MQ58	58	> 7	0,68	Irregular	Em relevo/encapsulado
CHRYSO	50	5	0,69	Retangular	Torcido

Fonte: Adaptado de Lerch *et al.* (2018)

Um aumento substancial na resistência de ligação pode ser visto em algumas fibras. A razão para este aumento da resistência de união com a matriz é devido ao dano da superfície da fibra causado durante a mistura com os agregados que resulta em uma melhor ligação matriz–fibra. O estudo pôde concluir que a mistura tem um papel relevante no desempenho do concreto reforçado com macrofibras sintéticas. A mistura prolongada pode aumentar o desempenho, mas muita mistura, no entanto, reduz o desempenho. O tempo de mistura ideal depende do tipo de misturador, bem como do tipo de fibra. A Figura 2 mostra a superfície de dois tipos de macrofibra sintética antes e depois do processo de mistura.

Figura 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície das fibras: (a) – (b) fibra em estado natural; (c) – (d) fibra extraída e limpa; e (e) – (f) fibra após mistura



Fonte: Lerch *et al.* (2018)

A execução desse procedimento é viável somente em fibras com alta resistência à tração e módulo de elasticidade. Se as fibras utilizadas possuírem propriedades mecânicas inferiores às da matriz, o filamento se romperá antes que a resistência de aderência seja alcançada (CHRIST, 2019).

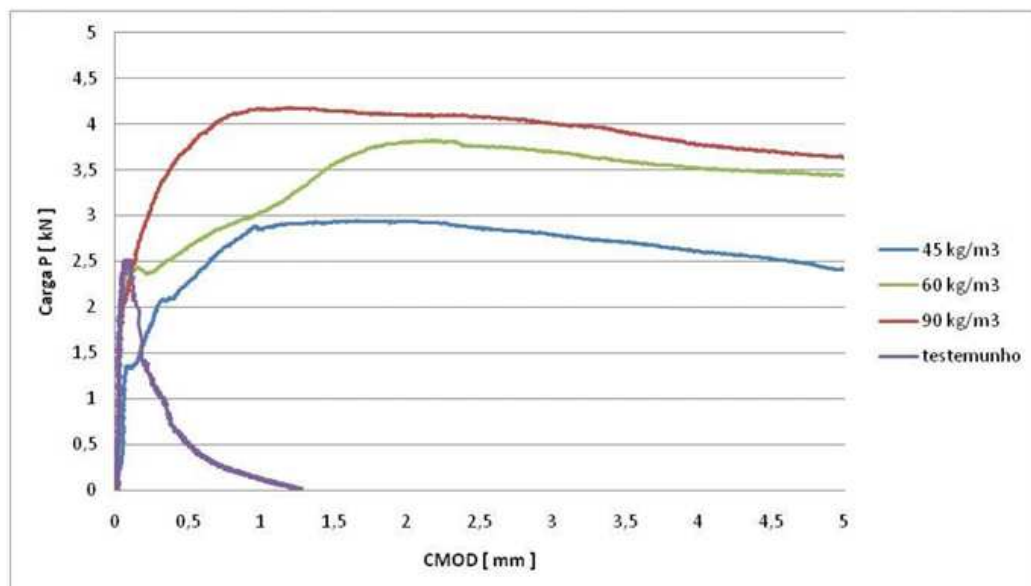
3.6.3 Tenacidade

Concretos de altíssimo desempenho não suportam grandes deformações sem a adição de fibras, por apresentarem comportamento frágil. A partir da aparição da primeira fissura, há uma rápida evolução da abertura, até culminar no rompimento do material. Com a adição de fibras na mistura, o CUAD passa a apresentar comportamento dúctil (BANTHIA; GUPTA, 2004).

Por proporcionarem uma maior conservação das tensões, ao se reforçar o compósito com fibras, no surgimento das primeiras fissuras, as fibras atuam transferindo tensões entre si, entretanto a resistência depende da capacidade do material de que são feitos e da resistência de ancoragem com a matriz do concreto (FEHLING *et al.*, 2014).

A capacidade do CUAD em suportar deformação e carga apresenta incremento considerável ao se adicionar fibras, contribuindo então, para o ganho de tenacidade do compósito. Quanto maior quantidade de fibras incorporadas, ao compósito, maior será sua capacidade portante (QUININO, 2015). Na Figura 3, pode-se observar o ganho na capacidade de se deformar, como em suportar cargas, para concretos reforçado com fibras, em comparação com concreto sem reforço.

Figura 4 – Comparativo de concretos com e sem reforço de fibras metálicas



Fonte: Quinino (2015)

3.7 Durabilidade

Quando as estruturas de concreto armado são projetadas e executadas de forma correta, atingem elevada durabilidade. A diminuição considerável da vida útil das estruturas de concreto armado é influenciada pela má especificação dos constituintes e dos elementos estruturais (DAL MOLIN *et al.*, 2016).

A agressividade do meio em que a estrutura está inserida e a qualidade do concreto estão intrínsecas à durabilidade de uma estrutura de concreto armado (PACHECO, 2016).

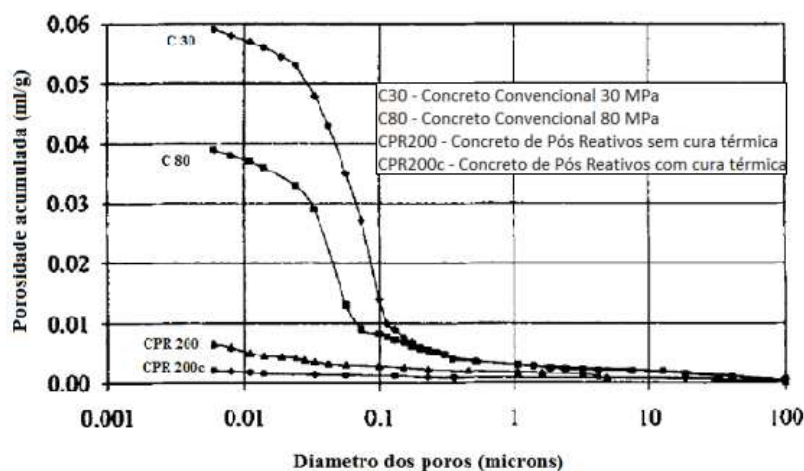
Um dos principais meios de degradação do concreto é a movimentação de íons, líquidos e gases pela sua estrutura. Com esta movimentação, se cria uma interação entre os compostos do concreto, causando perda da função do material dentro da estrutura, pela lixiviação desses compostos, e até degradação dos compostos hidratados. Estas movimentações são conhecidas como penetração, absorção e difusão (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

A permeabilidade dos materiais tem elevada importância na durabilidade das estruturas, visto que os ataques químicos por ácidos, sulfatos ou cloretos, ocorrem no interior do concreto, portanto substâncias agressivas devem conseguir penetrar no composto, o que acontece mais rapidamente em concretos de maior porosidade (NEVILLE; BROOKS, 2010).

A porosidade pode ser reduzida para garantir maior durabilidade ao concreto. Do volume total do concreto fresco, em torno de 15 a 20 %, é referente a quantidade de água da mistura, garantindo uma alteração expressiva na porosidade do concreto. Nem toda água da mistura será consumida, quando a relação água/cimento for superior, em massa, a 0,38, causando uma alteração significativa na permeabilidade (DAY, 2006).

Dependendo da mineralogia e composição química do cimento, a distribuição interna dos poros influencia na permeabilidade dos diferentes tipos de concreto (ROUX; ANDRADE; SANJUÁN, 1996). Os autores mostram que a quantidade de poros e seus diâmetros variam para cada tipo de concreto, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Quantidades e diâmetros de poros em concretos de classe de resistência C30 e C80 e em CPR de 200 MPa com e sem aplicação de cura térmica



Fonte: Adaptado de Roux, Andrade e Sanjuán (1996)

O desenvolvimento do CPR, assim como outros concretos de altíssimo desempenho, fornece grande durabilidade às estruturas, podendo ser categorizados como concretos ecológicos, pelo retardo de descarte à natureza, devido ao seu enorme tempo de utilização dos componentes que os formulam (AİTCIN, 2003).

3.8 Aplicação do CPR

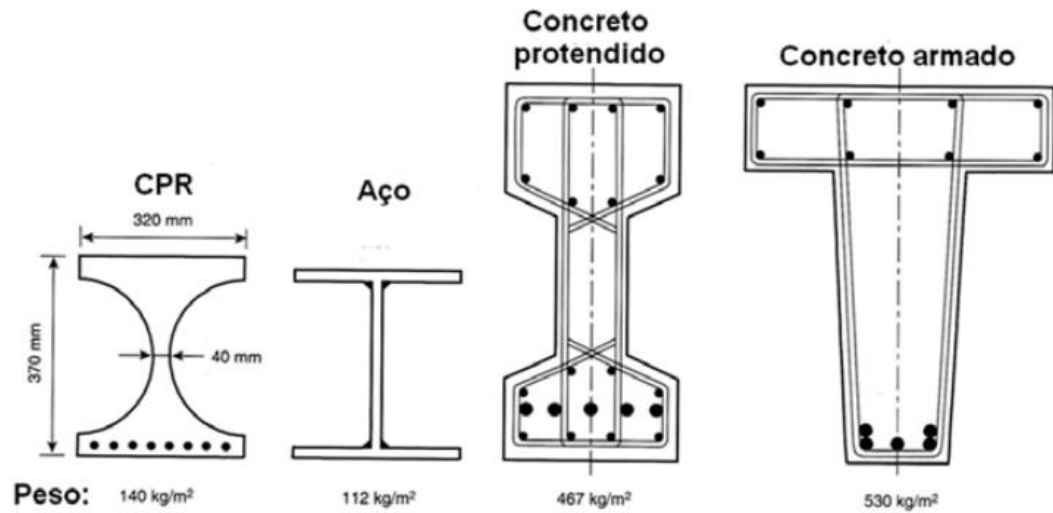
A demanda pela evolução da área de materiais de construção permitiu o surgimento do CPR. Suas propriedades únicas proporcionaram versatilidade à diferentes áreas da construção, produzindo elementos de geometrias variadas e redução da seção das estruturas.

A multifuncionalidade do CPR permite utilização em construções de estruturas espaciais leves, tabuleiro de pontes, vigas, colunas, passarelas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimentos de fachadas, entre outros (VANDERLEI, 2004).

Devido ao alto custo do CPR, é importante separá-los para utilizações onde suas propriedades serão aproveitadas, de forma a dar ganhos de desempenho e aumento de economia em materiais e logística, como na redução da utilização de aço, produção e transporte de estruturas mais leves, etc.

Além das propriedades mecânicas, entende-se que as estruturas com CPR alcancem alturas, resistências e vãos próximos à estrutura de aço, porém com custo inferior e durabilidade e esbeltez maiores (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Na Figura 5, como comparação, são representadas as seções de diferentes estruturas e materiais, com mesma capacidade portante.

Figura 6 – Seções transversais de estruturas com mesma capacidade portante em diferentes materiais



Fonte: Walraven (2000, *apud* TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011)

Um exemplo de obra com Concreto de Pós Reativos é a Ponte de Pedestres Seonyu, construída em Seoul, na Coreia do Sul. Ela foi criada pelo arquiteto francês Rudy Ricciotti, em comemoração ao centésimo aniversário das relações diplomáticas entre a Coreia do Sul e a França. A ponte foi construída sobre o rio Han, feita de piso de madeira e concreto armado, sendo sua matriz constituída de CPR, mostrada na Figura 6. A ponte apresenta uma estrutura leve, com um vão de 120 metros.

Figura 7 – Ponte de Pedestres Seonyu



Fonte: The Seoul Guide. Disponível em: <https://www.theseoulguide.com/seonyudo-bridge/>. Acesso em: 02 de abril de 2023.

A Estação de VLT de Shawnessy, em Calgary, Canadá, foi montada através de estruturas pré-moldadas e foi uma das primeiras a utilizar a tecnologia de CPR. Três escoras Ductal® são conectadas a cada uma das colunas para suportar o sistema de cobertura em dossel. Foram necessários 80 m³ de Ductal® branco com fibras orgânicas para suportar as 24 cúpulas, cada uma com 5 m de largura e 750 kg de peso. Os componentes de CPR na obra são as cúpulas, as colunas e os demais suportes de concreto, vistas na Figura 7.

Figura 8 – Estação de VLT de Shawnessy: (a) Estação pronta; (b) estruturas brancas em CPR



a)

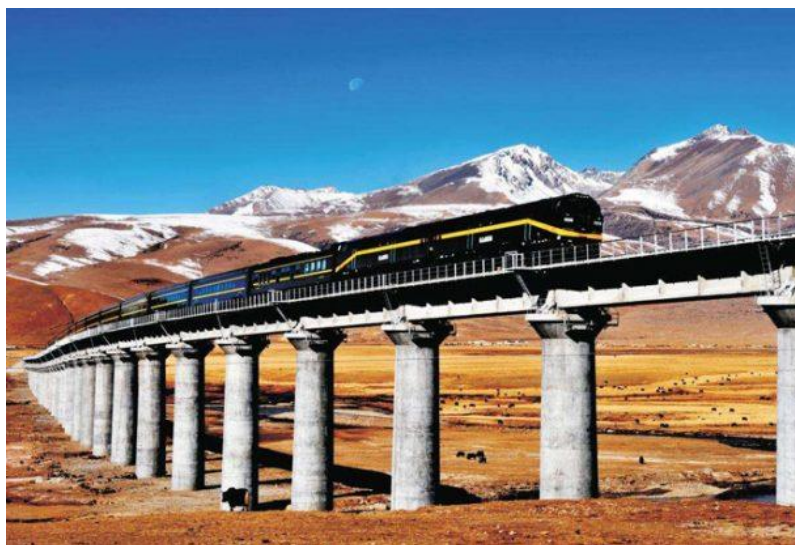


b)

Fonte: Ductal®. Disponível em: <https://www.ductal.com/en/shawnessy-lrt-station>. Acesso em: 02 de abril de 2023.

A ferrovia Qinghai-Tibet fica na região oeste da China, a uma altitude de mais de 4.000 metros. A ferrovia de 576 km começou a ser construída em terra congelada e pode ser vista na Figura 8. O mau clima e as tempestades de areia da tundra exigiam que o concreto da ponte tivesse propriedades mecânicas superiores e alta durabilidade. Por esses motivos, o CPR foi o concreto escolhido pelos chineses.

Figura 9 – Ferrovia Qinghai – Tibet



Fonte: Explore Tibet (2019). Disponível em: <https://www.exploretibet.com/blog/spectacular-scenery-of-the-qinghai-tibet-railway-to-lhasa/>. Acesso em: 02 de abril de 2023.

3.9 Nanomateriais de Carbono

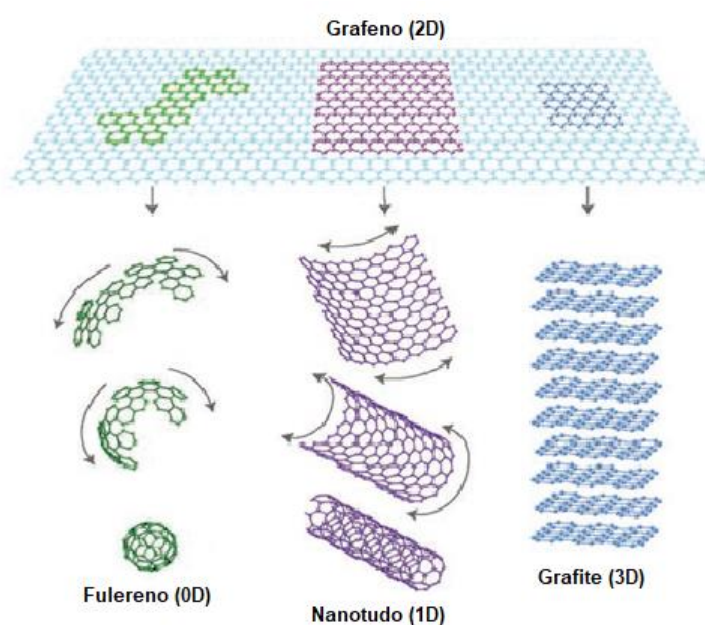
O carbono é um elemento de grande versatilidade, capaz de ser extremamente duro, como o diamante ou muito suave, como o grafite. Em um tempo curto de vida, o carbono, em escala nanométrica, pode se organizar em arranjos eletrônicos, com estruturas estáveis e configurações poliatômicas diversas, sendo conhecidos como formas alotrópicas. Estas estruturas diferenciadas permitem a formação de três hibridizações (sp , sp^2 e sp^3), com um preciso ordenamento espacial em torno de átomo central de carbono. As propriedades dos alótropos de carbono e geometria molecular são determinadas pela natureza e o número de ligação ao átomo de carbono (PIERSON, 1994).

O diamante e o grafite, de hibridização sp^3 e sp^2 , respectivamente, eram as únicas estruturas organizadas de carbono conhecidas até o início da década de 1920. Com o avanço dos estudos de substâncias formadas apenas por átomos de carbono e o surgimento de novas tecnologias, como o microscópio eletrônico e o espectroscópio, levaram à identificação de novas formas alotrópicas do carbono com hibridização do tipo sp^2 .

Em 1985, o fulereno, um composto molecular formado por uma estrutura esférica, representado pela fórmula C₆₀, foi descoberto por Robert F. Curl Jr., Sir Harold Kroto e Richard E. Smalley (KROTO *et al.*, 1985). Em 1991, Sumio Iijima, ao observar amostras de fulereno, notou a presença de outras estruturas formadas apenas por carbono, os nanotubos de carbono (IIJIMA, 1991). A partir do grafite, Andre Geim e Konstantin Novoselov isolaram e identificaram, em 2004, o grafeno (NOVOSELOV *et al.*, 2004).

Os nanomateriais à base de carbono estão possibilitando importantes avanços em diferentes áreas industriais e tecnológicas, devido às suas características diferenciadas, revelando novos efeitos e propriedades à medida que as pesquisas avançam. Esses materiais apresentam dimensões menores que 100 nm e podem ser classificados de acordo com sua arquitetura e direção espacial: partículas de dimensão zero (0D), unidimensional (1D) e bidimensional (2D). Nanomateriais de carbono, como fulereno, nanopartículas encapsuladas em carbono e nanodiamantes estão na categoria 0D, já as nanofibras e nanotubos de carbono encontram-se na categoria 1D, enquanto o grafeno e a nanoparede de carbono estão classificados na categoria 2D (MOSTOFIZADEH *et al.*, 2011). Além das estruturas em 0D, 1D e 2D, o carbono sp² pode formar estruturas tridimensionais (3D), como nas redes de nanotubos e nas infinitas camadas sobrepostas de carbono, o grafite, alótropo de carbono que possui uma estrutura cristalina formada por camadas mantidas por forças intermoleculares fracas (DE OLIVEIRA, 2016). A Figura 9 detalha diferentes estruturas alótropas do carbono.

Figura 10 – Estrutura dimensional do grafeno, fulereno, nanotubo e grafite



Fonte: Adaptado de Geim e Novoselov (2007)

3.9.1 Grafeno

O termo "grafeno" foi oficialmente definido, em 1994, pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), sendo utilizado para descrever uma única camada de grafite, que foi observada experimentalmente muito antes do seu isolamento e identificação em 2004 (NOVOSELOV *et al.*, 2004). Embora o termo tenha sido mencionado pela primeira vez em 1987, o conceito já era conhecido desde 1947, embora fosse apenas na teoria, já que não se sabia que uma estrutura bidimensional poderia existir fisicamente.

A monocamada do grafeno é composta por uma rede bidimensional de átomos de carbono com hibridização sp^2 , dispostos em uma estrutura hexagonal, similar ao favo de mel, em que as distâncias entre os átomos de carbono são de cerca de 1,42 Å, e sua espessura é equivalente a um átomo de carbono, com valor aproximado de 1 Angstrom = 10^{-8} cm (ZHAO *et al.*, 2010; PASTRANA-MARTÍNEZ *et al.*, 2013; CAMARGOS; SEMMER; DA SILVA, 2020).

Os pesquisadores do Centro de Nanotecnologia da Universidade de Manchester, liderados pelos cientistas André Geim e Konstantin Novoselov utilizaram um método simples que envolveu uma fita adesiva convencional e um processo de exfoliação mecânica, conseguindo isolar pequenos fragmentos de grafeno a partir do grafite oriundo de um lápis (NOVOSELOV *et al.*, 2004).

O grafeno é considerado o bloco de construção mais básico de alguns alótropos do carbono, e é por isso que sua forma é considerada a originária de outras estruturas alotrópicas do carbono, podendo resultar em fulereno ou em nanotubos, e as nanofolhas empilhadas dão origem ao grafite (GEIM; NOVOSELOV, 2007; FEI, 2018).

O grafeno é um material incrivelmente fino e forte, até mais forte que o diamante. Apesar de sua espessura de apenas um átomo, o grafeno é também flexível e extremamente duro. Além disso, ele tem a capacidade de conduzir eletricidade à temperatura ambiente, melhor do que qualquer outro material e é transparente, em parte devido à sua espessura extremamente fina, capaz de absorver apenas 2,3% da luz que incide sobre ele (NAIR *et al.*, 2008; GHUGE *et al.*, 2017). O conjunto de todas essas propriedades, incluindo sua alta resistência, flexibilidade, alta condutividade elétrica e térmica, estabilidade à altas temperaturas, além da capacidade para modificação química, tem despertado um grande interesse no grafeno.

Os resultados teóricos e os obtidos através de experimentos mostram que o grafeno é um material superior, quando comparado às propriedades especiais dos materiais existentes e conhecidos. O grafeno apresenta valores altíssimos de módulo de Young de 1 TPa e resistência

à tração de 130 GPa, enquanto o aço estrutural apresenta resistência de 400 Mpa, aproximadamente (LEE *et al.*, 2008; GHUGE *et al.*, 2017), módulo de elasticidade aproximada de 0,25 TPa (GÓMEZ-NAVARRO; BURGHARD; KERN, 2008), condutividade térmica em temperatura ambiente é de 5000 W/m.K, sendo que o diamante e o cobre são de 1000 W/m.K e 400 W/m.K, respectivamente (BALANDIN *et al.*, 2008; VIEIRA SEGUNDO; VILAR, 2016; GHUGE *et al.*, 2017), condutividade elétrica de $1 \times 10^8 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, já o cobre é de $0,6 \times 10^8 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (GHUGE *et al.*, 2017), mobilidade eletrônica de $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 100 vezes maior que silício, que é de $1,4 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ (GHUGE *et al.*, 2017) e resistividade de $1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, em confronto com a prata, que apresenta resistividade de $1,59 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ (GHUGE *et al.*, 2017). A área superficial apresentada é bastante elevada, com um valor de $2600 \text{ m}^2/\text{g}$, o que a torna significativamente maior do que as áreas superficiais observadas em grafite e nanotubos de carbono, de $10 \text{ m}^2/\text{g}$ e $1300 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente (VIEIRA SEGUNDO; VILAR, 2016).

3.9.2 Óxido de Grafeno

O óxido de grafeno é um nanomaterial plano derivado da oxidação do grafite, composto por camadas hexagonais de átomos de carbono interligados, bem como oxigênio e hidrogênio. Cada camada individual apresenta um formato irregular e uma espessura média de 1 nm (CHEN *et al.*, 2015). Por ser hidrofílico, o GO é solúvel em água e tem a capacidade de formar compósitos com o cimento, que possuem potencial para aumentar a resistência final e a durabilidade do material.

O óxido de grafeno, devido à presença de grupos funcionais oxigenados, possui uma condutividade elétrica reduzida em relação ao grafeno. No entanto, ainda pode exibir uma condutividade elétrica significativa, dependendo do nível de funcionalização e das condições de fabricação. Além disso, ele retém parte da resistência mecânica do grafeno, embora sua estrutura funcionalizada geralmente resulte em uma diminuição da força mecânica em comparação com o grafeno puro.

A polaridade do OG permite a sua dispersão em solventes polares, como a água, e este material também possui notáveis propriedades mecânicas, como um módulo de elasticidade variando entre 23 e 42 GPa, resistência à tração de 130 MPa e uma área superficial entre 700 e $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ (CHUAH *et al.*, 2014). Sua elevada área superficial faz do óxido de grafeno uma opção promissora como um material dispersante para outros nanomateriais (SUN *et al.*, 2020).

3.10 Síntese de Nanomateriais à base de Grafeno

O método de produção chamado esfoliação mecânica, pelo qual Novoselov e Geim receberam o Prêmio Nobel de Física em 2010, é capaz de isolar uma única camada de grafeno puro a partir do grafite (NOVOSELOV *et al.*, 2004). No entanto, esse método tem baixo rendimento, pela arcaicidade e eficiência, não sendo adequado para produção em larga escala. Nos últimos anos, têm sido estudadas outras alternativas sintéticas para a produção de grafeno. Esses métodos de produção podem ser classificados como "Bottom Up" e "Top Down" e estão relacionados com a escala maiores de produção.

Existem diferentes processos de produção de grafeno. No método Bottom Up, é possível sintetizar o material por meio de deposição química de vapor, crescimento epitaxial, que ocorre a partir da redução de carboneto de silício em alta temperatura e redução de monóxido de carbono (RODRÍGUEZ, 2015). Esses métodos resultam em lâminas perfeitas de grafeno, ideais para aplicações na área de eletrônica. No entanto, para produções em grande escala, esses métodos não são os mais indicados.

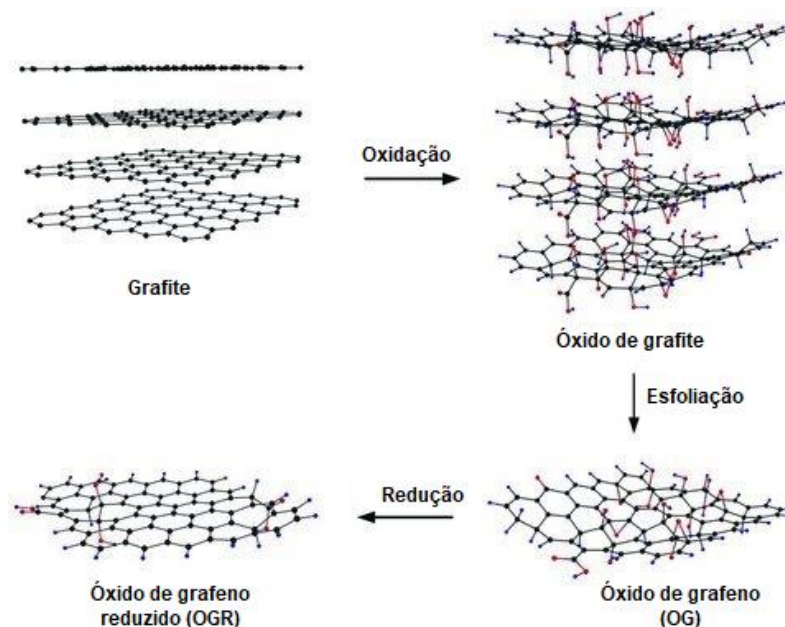
Por outro lado, nos métodos Top Down, o grafeno é obtido a partir da separação ou esfoliação de camadas do grafite. Isso apresenta uma grande vantagem, já que o grafite é um material de baixo custo e é possível de ser produzido em larga escala. A conversão química a partir do grafite é muito atrativa devido ao seu baixo custo e à sua alta escalabilidade.

Existem três métodos clássicos de síntese OG por oxidação química: o método de Brodie, que utiliza KClO_4 e HNO_3 ; o método de Staudenmaier, que emprega KClO_4 , HNO_3 e H_2SO_4 ; e o método de Hummers-Offeman, que utiliza H_2SO_4 , KMnO_4 e H_2O_2 . O OG produzido por esses métodos, contém geralmente grupos funcionais, como ácidos carboxílicos, hidroxilos e epóxidos, o que o torna conhecido como óxido de grafeno. No entanto, há também variações desses métodos clássicos que podem ser utilizadas para produzir o OG (MARCANO *et al.*, 2010).

O método comumente empregado para a obtenção do óxido de grafeno é uma variação do método de Hummers, como mencionado por Yu, Wang e Chen (2016). Como apontado por Chen *et al.* (2009), este método é amplamente utilizado por sua eficiência e simplicidade, além de apresentar um tempo de reação relativamente curto, conforme observado por Shahriary e Athawle (2014). Esse processo envolve o tratamento de grafite em pó com uma solução concentrada de H_2SO_4 , contendo KMnO_4 , que é facilmente convertido em Mn_2O_7 , um dos oxidantes mais eficientes utilizados na obtenção do óxido de grafeno, conforme descrito por

Hummers e Offeman (1958), resultando em óxido de grafeno, e eventualmente, óxido de grafeno reduzido (OGR), que pode ser visto na Figura 10, a seguir.

Figura 11 – Esfoliação química para obtenção de OG e OGR



Fonte: Adaptado de Advanced Materials 23, p. 1088, 2011

Existem duas formas de produzir suspensões coloidais aquosas de nanofolhas de óxido de grafeno, a partir do óxido de grafite. Uma delas é por meio da esfoliação, que pode ser feita via sonicação ou agitação intensa da mistura, por um longo período, como apontado por Park e Ruoff (2009). OG contém diversos grupos funcionais oxigenados reativos, como epóxi, hidroxilo, cetonas e grupos carboxila, conforme destacado por Maraschin (2016). Esses grupos funcionais tornam o OG hidrofílico, facilitando a sua dispersão em água e conferindo-lhe uma maior estabilidade coloidal (ARANTES, 2018).

3.11 Compósitos Cimentícios e o Óxido de Grafeno

Nos últimos tempos, o OG tem se destacado como um dos nanomateriais mais promissores para aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos cimentícios. Essa relevância pode estar relacionada ao fato de que o óxido de grafeno é hidrofílico, o que facilita sua dispersão em água, em comparação com outros nanomateriais à base de carbono, facilitando sua integração com pastas, argamassas e concretos.

3.11.1 Pastas

As resistências à compressão e à flexão da pasta cimento com OG, no estudo de Chuah *et al.* (2014), superam as de seu equivalente de cimento simples, em todas as idades, até 56 dias. Além disso, o pequeno desvio padrão na resistência destaca que o OG tem pouca influência na anisotropia de resistência. O surpreendente aumento é creditado à grande área superficial oferecida pela folha 2D de OG. O cimento reforçado com OG é benéfico, em termos de sua razão de aspecto superior, quando comparado às fibras convencionais, como ilustrado na Tabela 4. Em relação à reação, o OG tem um efeito de semeadura na cinética de hidratação do cimento, estimulando o crescimento de produtos de hidratação. Estudos iniciais sobre o modo de falha mostram que o cimento reforçado com OG apresenta comportamento dúctil. A forte ligação covalente na interface do OG, com os produtos de hidratação depositados na folha, torna o OG um material promissor para aprimorar a matriz de cimento.

Tabela 4 – Propriedades dos materiais constituintes

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro/espessura (nm)	Área superficial (m ² /g)	Razão de aspecto
Grafeno	1000	~130	0,8	2200	~0,08	2600	6000–600000
OG	23–42	~0,13	0,6	1800	~0,67	700–1500	1500–45000
NTC	950	11–63	12	1330	15–40	70–400	1000–10000
Fibra de carbono	7–400	0,4–5	1,7	1770	6000–20000	0,134	100–1000
Fibra polimérica (polipropileno e nylon)	3–5	0,3–0,9	18	900	18000–30000	0,225	160–1000
Fibra de vidro	72	3,45	4,8	2540	5000–10000	0,3	600–1500
Fibra de aço	200	1,5	3,2	7800	50000–900000	0,02	45–80

Fonte: Adaptado de Chuah *et al.*, 2014

Pan *et al.* (2015) reportaram que a adição de 0,05% de nanofolhas de óxido de grafeno (por peso de cimento) aumentou a resistência à compressão e à flexão de pastas de cimento Portland comum em 15 a 33% e 41 a 58%, respectivamente. Esse aumento pode estar relacionado com um melhor encaixe mecânico, interação entre microfissuras e nanofolhas de OG, promoção do processo de hidratação e formação de forças interfaciais poderosas entre grupos carboxílicos e produtos de hidratação.

3.11.2 Argamassas

O estudo realizado por Fang *et al.* (2017) investigou a utilização de areia reciclada proveniente de resíduos de demolição, na fabricação de argamassa com OG, com o objetivo de avaliar a resistência mecânica, trabalhabilidade e propriedades da argamassa obtida.

A argamassa foi preparada utilizando cimento Portland tipo 42.5R (alta resistência inicial e 42,5 MPa de resistência à compressão aos 28 dias), areia reciclada, SP de éter policarboxilato, água e OG em diferentes dosagens de 0,05%, 0,1% e 0,2%, em relação ao peso de cimento. Os pesquisadores observaram que quanto menor a quantidade de OG, melhor era a trabalhabilidade da argamassa reciclada. Entretanto, as resistências à compressão e flexão aumentaram à medida que se adicionava OG, para os 14 e 28 dias de cura. Para a resistência à flexão, houve um aumento de aproximadamente 22,0% e 41,3%, enquanto a resistência à compressão apresentou um incremento de 16,4% e 16,2%, respectivamente, com 0,2% de OG.

Os pesquisadores também observaram que o material, em escala nanométrica do OG, reduziu os poros na matriz cimentícia, resultando em um material mais denso, mesmo se tratando de uma argamassa produzida a partir de agregados reciclados, uma vez que este tipo de argamassa apresenta resistência mecânica reduzida, maior porosidade e menor durabilidade.

Lv *et al.* (2013) conduziram um estudo utilizando argamassa cimentícia composta por cimento Portland tipo 42.5R, areia e água, com adição de SP à base de policarboxilato, em diferentes proporções de OG (0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% e 0,05%), em peso de cimento. Foram realizados testes de resistência à tração, compressão e flexão. Os resultados indicaram que, até uma dosagem de 0,03% de OG, as resistências à tração, flexão e compressão aos 28 dias apresentaram aumentos de 78,6%, 60,7% e 38,9%, respectivamente. No entanto, verificou-se que as propriedades mecânicas foram reduzidas com o aumento da proporção de OG. Além disso, observou-se uma alteração na microestrutura do material cimentício. Com o aumento da dosagem de OG de 0,01% para 0,03%, houve um aumento na formação de cristais de hidratação com uma morfologia semelhante a flores, enquanto com 0,04% e 0,05%, os cristais apresentaram formatos poliédricos.

3.11.3 Concretos de Ultra Alto Desempenho

Wu *et al.* (2020) formularam corpos de prova (cp) constituídos de cimento Portland comum (OPC 42.5), sílica ativa, cinza volante, microfibras de aço, SP à base de policarboxilato, escória de alto forno moída e três tipos de areia de quartzo, para testes de resistência à

compressão e flexão, com diferentes teores de nanofolhas de OG (por peso de cimento), de 0,00% a 0,05%, sob cura padrão (Umidade relativa: $\geq 95\%$, temperatura: $21 \pm 2^\circ\text{C}$) aos 7 e 28 dias. Foi possível observar que tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à flexão do CUAD, melhoram à medida que a quantidade de nanofolhas de OG aumenta de 0,00% para 0,02%, enquanto os valores diminuem em 0,03% a 0,05%, em ambas as idades de 7 e 28 dias. Isso demonstra que a dosagem ótima de nanofolhas de OG para o CUAD com alto volume de materiais cimentícios suplementares sob cura padrão foi de 0,02. Com esta porcentagem, o valor da resistência à compressão e da resistência à flexão aos 28 dias foi de 122,1 MPa e 30,2 MPa, o que representa um aumento de 28,7% e 25,3%, respectivamente, em comparação com os corpos de prova de referência (sem adição de OG). Também foi possível observar, que tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à flexão aos 28 dias foram significativamente maiores do que aos 7 dias.

Tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à flexão dos corpos de prova diminuíram quando o teor de OG aumentou de 0,03% para 0,05%, em que a resistência à compressão correspondente aos 28 dias diminuiu de 122,1 MPa para 110,0 MPa, enquanto a resistência à flexão correspondente diminuiu de 30,2 MPa para 20,3 MPa. Além disso, as resistências à flexão das amostras de 0,04% e 0,05% foram ainda menores do que a resistência à flexão do corpo de referência, aos 7 dias e 28 dias.

Para os resultados dos testes de resistência à compressão e à flexão nos corpos de prova de CUAD, com teores de 0,00% a 0,05% de nanofolhas OG, sob cura a vapor aos 7 e 28 dias, foi observado que as resistências à compressão e à flexão aumentaram quando a dosagem foi aumentada de 0,00% para 0,04%, enquanto tais resistências diminuíram quando o teor foi de 0,05%. O valor da resistência à compressão e da resistência à flexão das amostras com 0,04% de OG, aos 28 dias, foi de 130,6 MPa e 28,8 MPa, respectivamente, representando um aumento de 8,8% e 16,1%, em comparação com os corpos de prova de referência.

No estudo de Lu e Ouyang (2017), a resistência à compressão do cp sem OG (referência) foi de 117,34 MPa, após 28 dias de cura. Com adições de nanofolhas de OG de 0,01% e 0,03%, por massa de cimento, as resistências à compressão foram de 126,52 MPa e 122,73 MPa, representando aumentos de 7,82% e 4,59%, em relação ao cp referência, respectivamente. Os corpos de prova preparados neste estudo apresentaram resistências à compressão superiores a 100 MPa, atendendo aos requisitos técnicos do CUAD. Após sete dias de cura, os cps de 0,01% e 0,03% mostraram aumentos na resistência à compressão de 3,66% e 4,55%, e aumentos na resistência à flexão de 11,88% e 6,95%, respectivamente, em comparação com o de referência.

A adição de pequenas quantidades de OG resultou em um aumento aparente na resistência, com uma concentração ótima de 0,01%, em massa de cimento. A capacidade de deformação do CUAD foi significativamente aumentada pela adição de nanofolhas, com um aumento no deslocamento de ruptura conforme o teor de OG aumentou.

Os resultados indicaram que os aditivos de OG melhoraram as resistências à flexão e à compressão dos compósitos de cimento, sendo o aumento na resistência à compressão menor do que o da resistência à flexão. Além disso, os aditivos melhoraram a capacidade de deformação do CUAD.

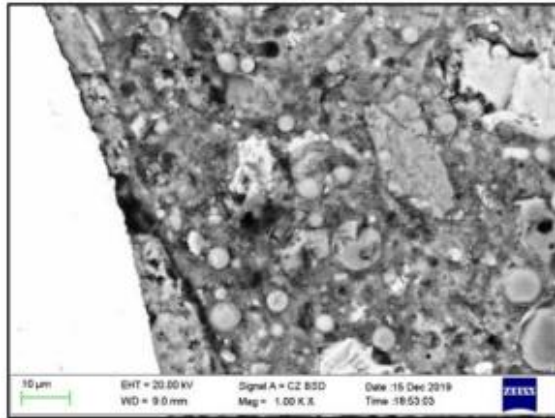
Utilizando cimento Portland comum (OPC 42.5), sílica ativa, cinza volante, microfibras de aço, superplastificante à base de policarboxilato, escória de alto forno moída, areia e pó de quartzo, Luo *et al.* (2021) testaram a resistência à compressão em diferentes períodos (7, 28 e 56 dias) de cura padrão e a vapor. A adição de OG melhorou a resistência à compressão, em comparação com os corpos de prova de referência, para um determinado teor de microfibras de aço (MFA). Sob cura padrão, a resistência aumentou inicialmente com o aumento do teor de GO, até atingir uma dosagem ótima de cerca de 0,02%. Para diferentes teores de MFA (0,5%, 1,0% e 1,5%), os valores de resistência à compressão, aos 56 dias, variaram de 119 MPa a 139 MPa, representando aumentos de 2,0% a 13,8%. A cura a vapor também resultou em resistência à compressão superior à do corpo de prova de referência, com uma dosagem ótima de GO em torno de 0,02%. A resistência à compressão, aos 56 dias, variou de 137 MPa a 158 MPa, para diferentes teores de MFA, representando aumentos de 2,2% a 6,4%.

A resistência à flexão do CUAD foi significativamente melhorada pela incorporação de óxido de grafeno, tanto na cura padrão, quanto na cura a vapor. A resistência à flexão aumentou à medida que o teor de OG foi incrementado de 0,0% para 0,02% e depois diminuiu de 0,02% para 0,03%, indicando uma dosagem ótima de 0,02%. Os resultados mostram aumentos na resistência à flexão, em diferentes teores de MFA, com melhorias de 2,4% a 37,7% para o CUAD com 0,5% de MSF e de 9,6% a 47,0% para o CUAD com 1,0% de MFA, ambos com a adição de OG. Para o CUAD com 1,5% de MSF, os incrementos variam de 21,9% a 32,4% com o acréscimo de OG. Quando aumentado a dosagem das fibras, a resistência teve uma crescente vertiginosa, em combinação com o OG.

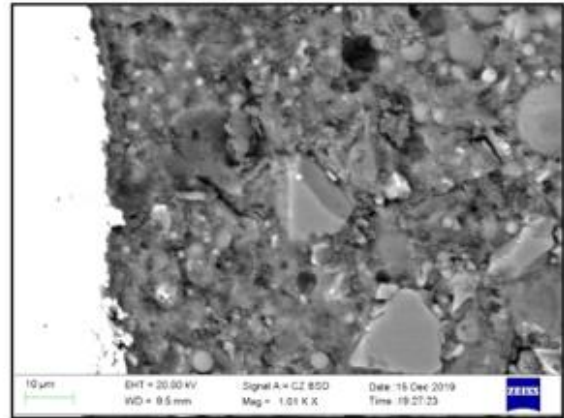
Conforme mostrado na Figura 11, a microestrutura da matriz do CUAD com OG não apresenta diferenças significativas, em relação à matriz sem OG. Isso pode explicar por que a resistência à compressão do CUAD com OG não foi aumentada de forma considerável. Em contraste, a resistência de aderência entre as fibras e a matriz do CUAD desempenha,

geralmente, um papel mais importante no aumento da resistência à flexão do que na resistência à compressão.

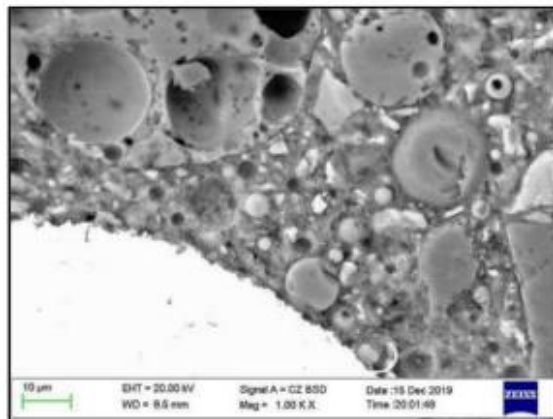
Figura 12 – imagens da interface entre fibra e a matriz cimentícia aos 7 dias: (a) corpo de prova de referência sem OG; (b) corpo de prova com 0,02% de OG sob cura padrão; e (c) corpo de prova com 0,2% de OG sob cura a vapor



(a)



(b)



(c)

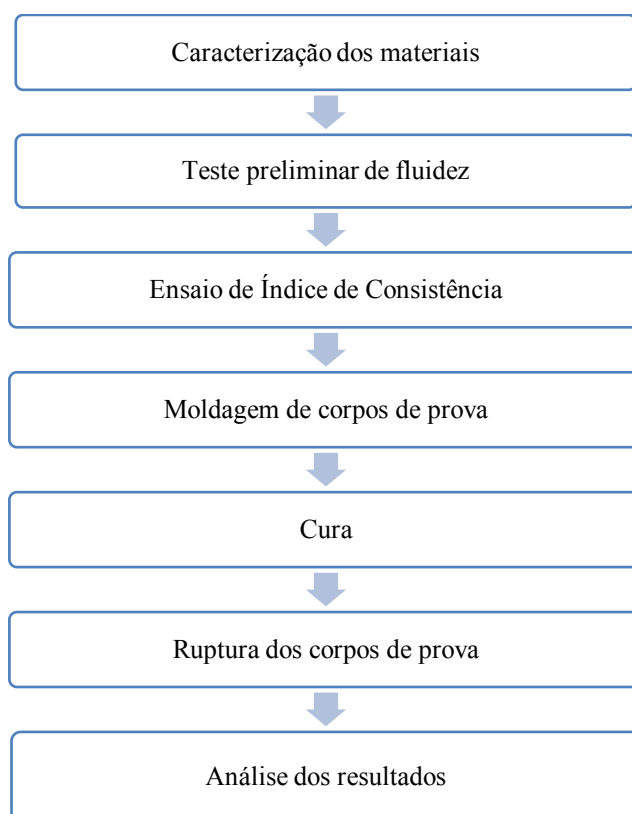
Fonte: Luo et al., 2021

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o entendimento da ação do óxido de grafeno no CPR com macrofibras de reforço sintéticas, foi elaborado o roteiro de trabalho a partir dos materiais e ensaios escolhidos.

Os procedimentos metodológicos foram os seguintes:

Figura 13 – Roteiro de trabalho



Fonte: Autoria própria

4.1 Materiais

4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, com resistência ao ataque de sulfatos, o CP-V-ARI-RS. Este é fabricado pela empresa Mizu, da organização Polimix. A composição e propriedades do cimento foram fornecidos pela empresa, em ensaios realizados em maio de 2023, mostradas nos Quadro 1, 2 e 3.

Quadro 1 – Propriedades químicas do CP-V-ARI-RS

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

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos

Quadro 2 – Propriedades físicas do CP-V-ARI-RS

Ensaio físico	Resultado	NBR 16697:2018
Massa específica (g/cm ³)	3,1	–
Blaine (cm ² /g)	4.466	–
Resíduo peneira #200 (%)	0,1	$\leq 6,0$
Resíduo peneira #325 (%)	1,1	–
Expansibilidade à quente (mm)	0,8	$\leq 5,0$
Início de pega (min)	197	≥ 60
Fim de pega (min)	256	≤ 600
Consistência normal (%)	30,5	–

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos

Quadro 3 – Propriedades mecânicas do CP-V-ARI-RS

Ensaio mecânico	Resultado	NBR 16697:2018
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	16,5	$\geq 14,0$
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	28,7	$\geq 24,0$
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	35,8	$\geq 34,0$
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	44,5	–

Fonte: Adaptado de Mizu Cimentos

4.1.2 Areia

A areia utilizada é a de quartzo, uma forma de alta pureza de dióxido de silício (SiO₂). Essa areia possui teores de 99,9% de SiO₂ e $\leq 0,001\%$ de Fe₂O₃. A areia de quartzo possui uma dureza relativamente alta, sendo classificada como 7 na escala de dureza de Mohs, podendo ser transparente e incolor, dependendo da sua pureza. Apresenta estabilidade química, baixa condutividade térmica e ponto de fusão de cerca de 1720 °C. A areia foi adquirida já peneirada e ensacada, apresentando 2,63 g/cm³ de massa específica e diâmetro médio de 0,358 mm.

4.1.3 Pó de quartzo

O pó de quartzo apresenta mesmas características já mencionadas na areia de quartzo, por apresentar mesmos componentes. Este pó foi adquirido já peneirado e ensacado, possuindo 2,63 g/cm³ de massa específica e diâmetro médio de 25 µm.

4.1.4 Superplastificante

O superplastificante aplicado na pesquisa foi o Silicon Premix 40205, fabricado pela Tecnosil, é um aditivo orgânico à base de policarboxilatos de última geração. É caracterizado como aditivo redutor de água tipo 2 – RA2/ Superplastificante. Apresenta aspecto físico líquido viscoso com coloração mel a castanho. Sua densidade é de aproximadamente 1,05 g/cm³ e teor de cloretos < 0,1%.

4.1.5 Sílica ativa

A sílica utilizada foi a não densificada, fornecida pela empresa Tecnosil, que indicou teor de SiO₂ > 90%, massa específica de 2.220 kg/m³ e massa unitária < 350 kg/m³. Sua superfície específica é de aproximadamente 19000 m²/kg e partícula esférica de diâmetro médio igual a 0,2 µm.

4.1.6 Macrofibras

Para a pesquisa, foi escolhida a macrofibra sintética para reforço de concreto, da empresa Macrofibra do Brasil, denominada de Macrofibra Duristeel FF54. Ela apresenta cor cinza e fator de forma em multifilamento encapsulado, frisado com pós arranjo, com excelente ancoragem. A empresa forneceu as propriedades da MFSR, mostrada no Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades físicas da Macrofibra Duristeel FF54

Propriedades físicas	
Material	Polipropileno
Peso específico (g/cm³)	0,97
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

Os agregados de nanofolhas de grafeno foram adquiridos da Strem Chemicals Inc., sob código 06-0225. Esses agregados são de folhas submicrométricas com um diâmetro $< 2 \mu\text{m}$ e área superficial de $300 \text{ m}^2/\text{g}$. Possuem uma densidade aparente de $0,2$ a $0,4 \text{ g/cm}^3$, teor de oxigênio $< 2\%$, em massa e teor de carbono $> 98\%$, em massa. São oferecidos na forma de pó preto. Na Tabela 5, é mostrado as propriedades fornecidas do OG.

Tabela 5 – 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 Teste preliminar de fluidez

Para testar a ação do aditivo superplastificante adquirido junto aos agregados e aglomerantes, foi realizado um teste preliminar, utilizando uma relação água/aglomerante de $0,18$ e 3% de SP, em massa de cimento. Os materiais secos foram misturados até ficarem homogêneos, em seguida, foi disperso o SP na água de amassamento, acomodada em um becker de vidro. Na argamassadeira eletromecânica de 5 L (Figura 14), da empresa Contenco, os materiais secos receberam o superplastificante diluído na água de amassamento. O processo de mistura, inicialmente começou em velocidade baixa, entretanto, percebeu-se uma demora na ação do superplastificante utilizado.

Figura 14 – Argamassadeira eletromecânica de eixo vertical



Fonte: Autoria própria

A partir de vários minutos sem melhoramento na fluidez do concreto, optou-se por aumentar a velocidade do misturador. Este feito acresceu significativamente a fluidez do concreto, a partir de 10 min de mistura, mesmo assim, para uma melhor consistência, em menor tempo, foi testada a relação água/aglomerante de 0,20 e um teor de 5% de SP, na qual proveu um melhor resultado.

4.3 Traço das misturas e preparação dos corpos de prova

Foram preparados seis traços de CPR, sendo cinco traços misturando cimento CP-V-ARI-RS, sílica ativa, areia de quartzo, pó de quartzo, óxido de grafeno (OG), macrofibras sintéticas de reforço estrutural (MFSR), água e superplastificante (SP) à base de policarboxilato. O traço restante difere dos outros por não conter macrofibras. A relação água/aglomerante foi de 0,20 para todas as misturas de concreto. O óxido de grafeno foi adicionado nas proporções de 0,00%, 0,01%, 0,02%, 0,03% e 0,04%, em massa de cimento e adição de 0,4% de macrofibras, em volume de concreto, nas misturas de CPR.

Em virtude da escolha dos moldes e utilizando o conceito que estabelece que a dimensão mínima dos moldes deve ser maior que três vezes a dimensão máxima do agregado, optou-se

por fragmentar a macrofibra, com tesoura, em três partes iguais de 18 mm, para uma melhor uniformidade e empacotamento das fibras.

As amostras de CPR foram denominadas CFOG00, CFOG01, CFOG02, CFOG03 e CFOG04 para os corpos de prova com adições de OG e macrofibras, representando as porcentagens de OG adicionada, já o corpo de prova com 0,00% de OG e sem fibras foi denominado de CSFOG00. As amostras CFOG00 e CSFOG00 são os corpos de prova referência. As proporções das misturas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Proporções de misturas das amostras de CPR

Amostras	Cimento	Sílica ativa	Areia	Pó de quartzo	SP	Água	MFSR	OG
CSFOG00	1	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0	0
CFOG00	1	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0,4%	0
CFOG01	0,9999	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0,4%	0,01%
CFOG02	0,9998	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0,4%	0,02%
CFOG03	0,9997	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0,4%	0,03%
CFOG04	0,9996	0,246	1,1	0,235	0,05	0,2	0,4%	0,04%

Fonte: Autoria própria

A areia e o pó de quartzo foram adicionados e misturados com o cimento e a sílica ativa na argamassadeira, por 1 minuto. Depois da mistura, o material foi despejado em um recipiente reservado.

Para a mistura contendo OG, a água de amassamento foi dividida, a primeira parte para a dispersão do OG, e a segunda parte, para a dissolução do superplastificante. Ambos materiais foram diluídos com água potável em um becker de vidro e agitados por 1 minuto. Na mistura sem OG, o SP foi dissolvido diretamente no recipiente da água.

Devido ao volume de capacidade do misturador ao se aumentar a velocidade do equipamento, apenas metade do material seco foi adicionado à panela do misturador, em seguida, o equipamento foi ligado em velocidade baixa. As dispersões diluídas de OG e SP foram então adicionadas ao material seco para misturar, até apresentar consistência de contrapiso (aparência de farofa úmida). Neste ponto, aumentou-se a velocidade do aparelho por 5 minutos, tempo para a mistura atingir a fluidez desejada. Daí, o restante do material seco é adicionado, aos poucos, em velocidade baixa, até o fim do despejo do material seco, depois aumenta-se a velocidade até a homogeneização dos materiais. A macrofibra estrutural foi adicionada pós homogeneização, em velocidade baixa. Finalmente, a mistura continuou por mais 1 minutos em velocidade rápida.

Para cada dosagem formulada, a mistura foi separada para os ensaios de estado fresco e estado endurecido. Após despejar as misturas em moldes untados, os corpos de prova para os testes de estado endurecido foram compactados manualmente com um soquete metálico. Todos os corpos de prova foram desmoldados, depois de 24 horas e em seguida, imersos em tanque com água para cura úmida, até completar a idade de 14 dias.

Os corpos de prova, com dimensões de 50 mm x 100 mm, foram preparados para ensaios de resistência à compressão axial, enquanto os corpos de prova com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm foram preparados para ensaios de resistência à tração na flexão.

4.4 Ensaio de Índice de consistência

Testes do índice de consistência foram realizados para determinar a fluidez do CPR, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019).

O espalhamento foi determinado medindo-se duas dimensões perpendiculares do diâmetro do círculo formado pelo escoamento do concreto após o término das batidas da mesa.

Figura 15 – Mesa de fluidez (flow table)



Fonte: Autoria própria

4.5 Ensaio de resistência à compressão axial

Para os ensaios de compressão axial foram utilizados dois moldes de formato cilíndrico com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para cada traço. O ensaio de compressão axial foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Após o período de cura, os corpos de prova foram removidos dos moldes e suas superfícies foram cuidadosamente niveladas e limpas. As extremidades superiores e inferiores dos cps estavam planas, lisas e perpendiculares ao eixo longitudinal.

A resistência à compressão foi medida no laboratório de ensaios do Instituto Federal de Sergipe (IFS), posicionando os corpos de prova verticalmente na prensa hidráulica de ensaio EMIC MEU-100, com capacidade de 1000 kN. A máquina aplicou uma carga de compressão gradual e controlada nas extremidades superior e inferior do corpo de prova.

4.6 Ensaio de resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão equivalente dos concretos foi determinada através do ensaio prescrito pela NBR 12142 (ABNT, 2010). Para o ensaio foram moldados dois corpos de prova prismáticos de 40 mm de largura, 40 mm de altura e 160 mm de comprimento, para cada traço.

Após cura, desmolde e avaliação das superfícies dos corpos de prova, estes receberam carregamento da prensa hidráulica. O carregamento aplicado nos modelos prismático foi realizado utilizando-se quatro pontos, com dois pontos de apoio na parte inferior e dois pontos de aplicação da carga na parte superior.

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados no laboratório de ensaios do Instituto Federal de Sergipe (IFS), e para isso foi utilizada uma prensa de marca EMIC MEU-100 com capacidade de 1000 kN.

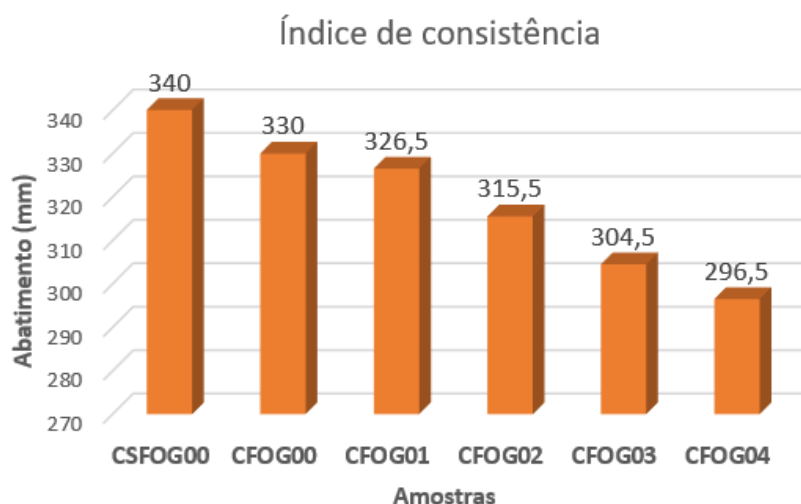
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de estado fresco e endurecido.

5.1 Índice de Consistência

Os resultados do índice de consistência, segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019), são apresentados na Figura 16. Comparando os resultados das amostras de referência (sem adição de OG), em relação à sem fibra, percebe-se perda de fluidez na amostra com macrofibra, obtendo 340 mm e 330 mm de espalhamento, respectivamente, representando uma redução de 2,94%. Ao se adicionar 0,01%, 0,02%, 0,03% e 0,04% de teor de OG, em massa de cimento, foi alcançado 326,5 mm, 315,5 mm, 304,5 mm e 296,5 mm de espalhamento, respectivamente. Isto representa uma diminuição de fluidez, em relação a amostra de referência com MFSR, de 1,06%, 4,39%, 7,73% e 10,15%, respectivamente. Os resultados mostram que a consistência foi aumentada com o a adição de fibras, em comparação às amostras referência e também pelo aumento do teor de nanofolhas de OG, tornando as amostras de CPR mais rija e menos fluida.

Figura 16 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na consistência das amostras de CPR



Fonte: Autoria própria

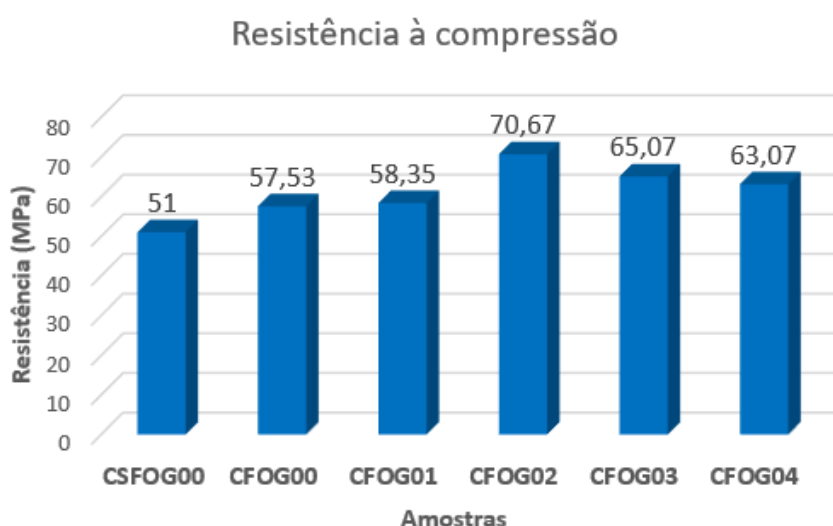
A redução da fluidez do concreto devido ao uso de OG pode ser atribuída à sua alta área superficial específica, o que resulta em uma menor disponibilidade de água para molhar adequadamente a mistura. Além disso, a diminuição da fluidez nas misturas de CPR

incorporadas por MFSR pode estar relacionada ao aumento da área superficial e à distribuição aleatória das fibras. Presume-se, então, que esses fatores combinados tenham causado uma diminuição na fluidez e aumento da consistência do concreto.

5.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos cps foi testada aos 14 dias, sob cura úmida submersa em tanque, de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2019) e está representada na Figura 17. Pode-se observar que a resistência à compressão aumenta, para um teor de MFSR de 0,4%, quando se compara as misturas referência, obtendo 51 MPa para a sem MFSR e 57,53 MPa para a com MFSR, representando um acréscimo de resistência de 12,80%. Fica claro também, que a resistência à compressão melhora à medida que o teor de OG aumenta, em comparação com os exemplares de referência. A resistência à compressão do CPR primeiro aumenta até 0,02%, mas depois começa a decrescer, indicando uma dosagem ótima de 0,02% de OG, quando submetido a cura úmida submersa. As resistências apresentadas para os teores de 0,01%, 0,02%, 0,03% e 0,04% de OG são 58,35, 70,67, 65,07 e 63,07 MPa, respectivamente. Quando comparadas com a resistência obtida pelo exemplar com fibras, o ganho de resistência dessas amostras foi de 1,43%, 22,84%, 13,11% e 9,63%, respectivamente.

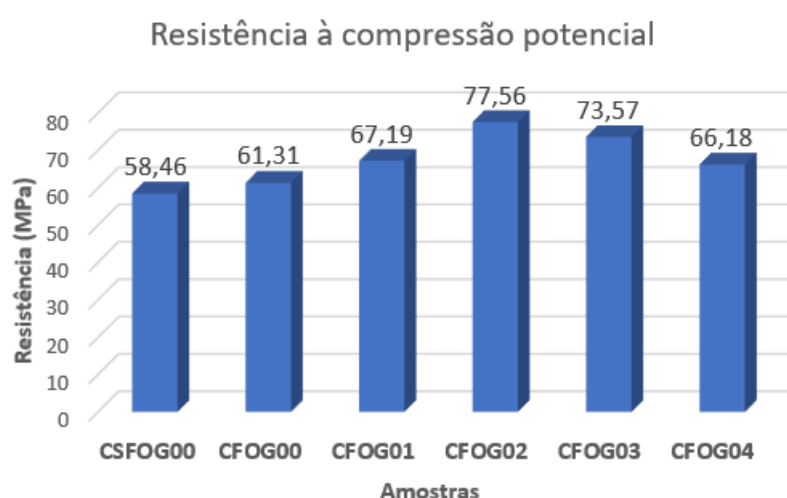
Figura 17 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na resistência à compressão das amostras de CPR



Fonte: Autoria própria

Quando analisado os corpos de prova individualmente, as resistências potenciais adquiridas, para cada traço foram de 58,46, 61,31, 67,19, 77,56, 73,57 e 66,18 MPa, para as amostras CSFOG00, CFOG00, CFOG01, CFOG02, CFOG03 e CFOG04, respectivamente, conforme demonstrado na Figura 18. O aumento de resistência adquirido pela mistura CFOG00, em comparação com a CSFOG00 foi de 4,88%, já para as misturas com teores de OG, em comparação com a CFOG00 foram de 9,59%, 26,50%, 20,00% e 7,94%, respectivamente.

Figura 18 – Resultados das resistências à compressão potenciais dos corpos de prova de cada traço



Fonte: Autoria própria

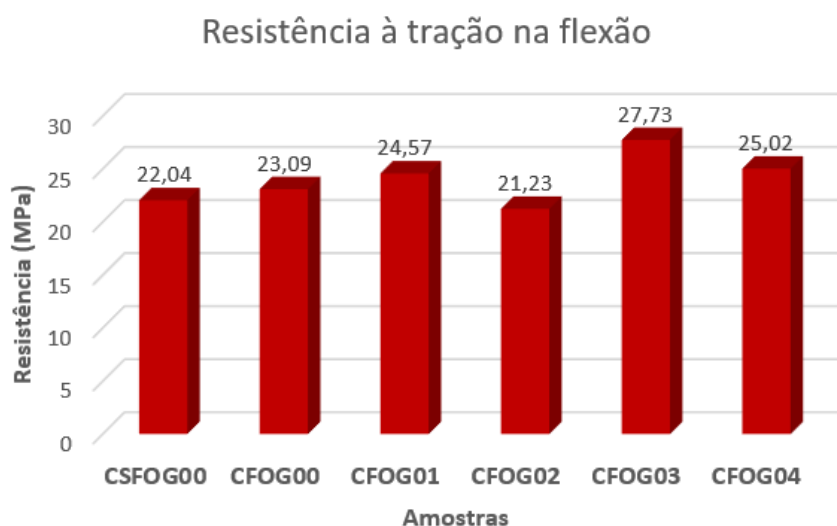
A melhoria na resistência à compressão pode ser atribuída à promoção da hidratação do cimento, refinamento da estrutura de poros, microestrutura compacta e aderência interfacial, resultantes da adição de OG. Além disso, o teor de MFSR pode reduzir o espaçamento entre as fibras, fornecendo maior suporte de carga e melhorando a resistência à compressão.

Apesar de adquirir bons resultados de resistência à compressão, para o CPR, era esperado resistências maiores que 100 MPa, aos 28 dias de idade. Para os resultados apresentados, mesmo sendo aos 14 dias, o que representaria em torno de 90% da resistência final, pode-se dizer que houve falta de compactação adequada dos corpos de prova, como também, a limitação em aplicar pressão ou cura térmica nas amostras, que são essenciais para atingir altas resistências. Por outro lado, o acréscimo de resistência em torno de 20% foi surpreendente, esse aumento é geralmente visto em pastas e argamassas, em concretos, mesmo de alto desempenho, não é padrão apresentarem ganhos maiores que 10%.

5.3 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão das amostras foi testada aos 14 dias, sob cura úmida submersa em tanque, de acordo com NBR 12142 (ABNT, 2010) e mostrada na Figura 19. Percebe-se que não houve aumento significativo ao acrescentar MFSR na matriz do concreto, quando comparadas as amostras referência, a sem fibra obteve uma resistência à tração de 22,04 MPa, enquanto a com fibra resultou em 23,09 MPa, representando uma adição de 4,76% na resistência, ganho menor do que a obtida na resistência à compressão, que foi de 12,80%. Ao se adicionar OG, há o aumento de resistência, inclusive maior do que o obtido ao se adicionar MFSR. É perceptível que a resistência à tração do CPR aumenta gradativamente até 0,03% e decresce em 0,04% de dosagem de óxido de grafeno, indicando uma dosagem ótima de 0,03% de OG. Há um decréscimo significativo na amostra com 0,02%, resultando em uma resistência menor que a mistura referência sem fibras, provavelmente por um erro no processo do ensaio. Em comparação com a amostra CFOG00, as misturas com 0,01, 0,03 e 0,04% de OG obtiveram acréscimo de resistência de 6,41, 20,01 e 8,36%, representando 24,57, 27,73 e 25,02 MPa, enquanto a de 0,02% tem redução de 8,05%, representando 21,23 MPa de resistência à tração na flexão.

Figura 19 – Resultados médios dos efeitos dos teores de OG na resistência à tração na flexão das amostras de CPR



Fonte: Autoria própria

Já as resistências potenciais obtidas, representadas na Figura 20, observa-se que a resistência à tração na flexão, para mistura referência CFSOG00 é de 22,11 MPa, enquanto a

CFOG00 foi de 24,14 MPa, o que representa 9,18% de acréscimo na resistência. Para as amostras com teores de 0,01, 0,02, 0,03 e 0,04% de OG, as resistências potenciais foram 24,39, 21,41, 28,35 e 25,50 MPa, respectivamente, representando um aumento de 1,04%, 17,44% e 5,63%, para as amostras CFOG01, CFOG03 e CFOG04, respectivamente, quando comparadas com a CFOG00. A amostra CFOG02 teve um decréscimo de 11,31%, que já era esperado, já que os dois corpos de prova formulados tiveram baixa resistência.

Figura 20 – Resultados das resistências à tração potenciais dos corpos de prova de cada traço



Fonte: Autoria própria

O ganho de resistência à tração na flexão pode estar relacionado à hidratação do cimento, melhora da estrutura de poros, compactação da microestrutura e aderência interfacial com a matriz, proveniente da adição do OG. A incorporação de MFSR também contribuiu para o aumento da resistência à flexão, aparentando ser menor do que o OG. No entanto, o aumento da dosagem de OG além de 0,03% resulta em diminuição da tendência de aumento da resistência, possivelmente devido à dispersão irregular.

Ainda que as resistências obtidas sejam muito similares às resistências de pesquisas consultadas, com teores de fibras semelhantes, a porcentagem de aumento da resistência foi menor neste trabalho, isto pode estar relacionado a resistência de aderência entre as fibras e a matriz do CUAD, promovida pela adição do OG, que varia de acordo com o tipo de fibra, sendo menor para as fibras de polipropileno, em comparação com as fibras de aço comumente usadas nas pesquisas. A MFSR, junto ao OG, no CUAD, necessita de mais testes e em diferentes dosagens para melhor comprovação de possíveis ganhos de resistência na tração e flexão, assim como para ser o substituto de fibras de aço.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudado a adição de macrofibras sintéticas de reforço estrutural, em uma dosagem de 0,4%, em volume de concreto e a mistura com diferentes teores de óxido de grafeno, em substituição parcial do cimento. Na pesquisa foram avaliadas as propriedades de consistência das misturas, resistência à compressão e resistência à tração na flexão do CPR.

Pode-se concluir através da pesquisa que:

- a) A consistência aumenta e a fluidez diminui à medida que o teor de óxido de grafeno aumenta, o mesmo ocorre quando comparadas as amostras com e sem MFSR, na qual a com fibras, perde fluidez e ganha consistência;
- b) Apesar das resistências à compressão serem menores do que nas pesquisas consultadas, obteve-se altas resistências, havendo também, inesperado ganho de resistência de 22,84%, proporcionado pelo teor de 0,02% de OG na mistura, demonstrando a capacidade de ganho significativo de resistência ao incorporar OG;
- c) A utilização de OG e MFSR com dosagem de 0,4% do volume de concreto, não se mostraram eficientes em proporcionar o ganho esperado de resistência à tração na flexão, mesmo assim, a amostra com 0,03% de OG alcançou acréscimo de 20% em resistência, demonstrando possibilidade de melhores resultados se utilizado diferentes porcentagens e tipos de fibras;
- d) Dentre as dosagens de OG apresentadas, os teores de 0,02 e 0,03% são as que apresentam melhores resistências, similares às variadas pesquisas com óxido de grafeno.

O CPR formulado neste estudo demonstra ser um produto promissor com grande potencial de desenvolvimento na indústria de materiais de construção. O uso de óxido de grafeno para o desenvolvimento deste trabalho proporciona benefícios para o desempenho do material. Por outro lado, as macrofibras sintéticas de reforço estrutural ainda necessitam de mais estudos para se tornarem um substituto adequado das fibras metálicas.

6.1 Sugestão para próximos trabalhos

- a) Testar a resistência à tração na flexão em diferentes teores de MFSR no CPR, com as mesmas dosagens de OG apresentadas nesse trabalho;

- b) Avaliar os possíveis ganhos de resistência na mistura de fibras de aço e MFSR com o OG;
- c) Avaliar a utilização cimento estrutural comercial com o OG na produção de CPR;
- d) Verificar as resistências obtidas em idades superiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABID, M.; *et al.* **High temperature and residual properties of reactive powder concrete—A review.** Construction and Building Materials 147, p. 339–351, ago, 2017.
- 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.
- ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. **Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites.** Cement and Concrete Composites 97, p. 28–40, jul, 2017.
- 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.
- ALATAWNA, A. *et al.* **The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites.** Construction and Building Materials 232, p. 117–141, jan, 2020.
- ARANTES, S. C. V. **Filmes baseados em PVOH e grafeno para aplicações biomédicas.** Dissertação de mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros) – Universidade do Minho, Braga, 2018.
- ARORA, A. *et al.* **Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for ultra-high performance concrete (UHPC).** Cement and Concrete Composites 103, p. 179–190, jan, 2018.
- ASSAAD, J.; KHAYAT, K. H.; MESBAH, H. **Assessment of thixotropy of flowable and selfconsolidating concrete.** ACI Materials Journal 100, p. 99–107, mar, 2003.
- BALANDIN, A. A. *et al.* **Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene.** Nano Letters, v. 8, n. 3, p. 902–907, 2008.
- BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N. **Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites.** Cement and Concrete Composites, jan. 2003. v. 25, n. 1, p. 3–9.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. **Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices**. Materials and Structures 37, p. 707–716, 2004.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review**. Construction and Building Materials, mar. 2001. v. 15, n. 2-3, p. 93–103

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

Branston, J. *et al.* **Mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete**. Construction and Building Materials 124, p. 878–886, out, 2016.

CAMARGOS, J; SEMMER, A.; DA SILVA, S. **Características e Aplicações do grafeno e óxido de grafeno e as principais rotas para síntese**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 3(8), 1118–1130.

CHEN, T. *et al.* **High throughput exfoliation of graphene oxide from expanded graphite with assistance of strong oxidant in modified Hummers method**. Journal of Physics: Conference Series, v. 188, p. 12051, 2009.

CHEN, J. *et al.* **Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application**. Construction and Building Materials 84, p. 66- 72, jun, 2015.

Choi, M. S. *et al.* **Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test**. Construction and Building Materials 106, p. 632–639, mar, 2016.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC): Fundamentos, Propriedades e Dosagem**. São Paulo: Editora Leud, 2022.

CHUAH, S. *et al.* **Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide**. Construction and Building Materials, 73, p.113-124, dez, 2014.

COPPOLA, L. *et al.* **Influence of superplasticizer type on the compressive strength of reactive powder mortars**. In: Fifth CANMETIACI SP173, 1997, Rome:Italy. Proceedings .Rome: Chemical Admixtures, SP-173-27, p.537-557, 1997.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001

DAL MOLIN, D. C. C. *et al.* **Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto**. [s. l.], p. 223–270, 2016.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. **Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability**. Procedia Engineering, v. 14, p. 814– 820, jan. 2011.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model**. Cement and Concrete Research 24, p. 997–1009, 1994.

DE OLIVEIRA, E. H. C. **Utilização de nanomateriais de grafite para adsorção de corantes têxteis aniônicos**. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

EIDE, M. B.; HISDAL, J. M. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC) – State of the art**. SINTEF Building and Infrastructure. COIN Project report 44, 2012.

FANG, C. *et al.* **Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties of Recycled Mortar**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 274, p. 1– 7, out, 2017.

FEHLING, E.; BUNJE, K.; LEUTBECHER, T. **Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete**. In: (C. Geisenhanslüke M. Schmidt, E. Fehling, Ed.) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE. Kassel, 2004.

FEHLING, E. *et al.* **Ultra-High Performance Concrete UHPC**. Kassel, 2014.

FEI, Z. **Electrically detecting infrared light**. Nature Mater 17, p. 950–951, out, 2018.

FERRIER, E. *et al.* **Mechanical behaviour of ultra-high-performance short-fibre-reinforced concrete beams with internal fibre reinforced polymer bars**. Composites Part B 68, p. 246–258, jan, 2015.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, v.2, Cap 39, p.1195-1225, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre-docência em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. **The rise of graphene**. Nature Mater 6, p.183–191, mar, 2007.

GÓMEZ-NAVARRO, C.; BURGHARD, M.; KERN, K. **Elastic Properties of Chemically Derived Single Graphene Sheets**. Nano Letters, v. 8, n. 7, p. 2045–2049, 2008.

GUSMÃO, A. C. **Utilização do Concreto de Pós Reativos como material de reparo – Ênfase na resistência de aderência**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

- HANNAWI, K.; et al. **Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes**. *Composites Part B* 86, p. 214–20, fev, 2016.
- HASAN, M. J.; AFROZ, M.; MAHMUD, H. M. I. **An Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Macro Synthetic Fiber Reinforced Concrete**. *International Journal of Civil & Environmental Engineering* 11, p. 8–23, jul, 2011.
- HUANG, H.; GAO, X.; JIA, D. **Effects of rheological performance, antifoaming admixture, and mixing procedure on air bubbles and strength of UHPC**. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31, abr, 2019.
- HUMMERS, W. S.; Offeman, R. E. **Preparation of Graphitic Oxide**. *Journal of the American Chemical Society* 80, p. 1339–1339, 1958.
- IJIMA, S. **Helical microtubules of graphitic carbon**. *Nature* 354, p. 56–58, nov, 1991.
- KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado**. Disponível em: <<https://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdp>>. Acesso em: 06 de novembro de 2022.
- KATTAR, J. E.; ALMEIDA, N. J. **Cimento Portland**. Holdercim Brasil S.A, 4a ed., jul., 1999. 43p.
- KROTO, H. *et al.* C₆₀: **Buckminsterfullerene**. *Nature* 318, p. 162–163, nov, 1985.
- LEE, C. *et al.* **Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene**. *Science* 321, p. 385–388, jul, 2008.
- LERCH, J. O. *et al.* **The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete**. *Cement and Concrete Research* 103, p. 130–139, nov, 2018.
- LEVY, S. **Sustentabilidade na Construção Civil: A Contribuição do Concreto**. In: ISAIA, G. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, vol. 2, Cap. 50, p. 1551-1579, 2005.
- LI, V.C., LEUNG, C.K.Y. **Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites**. *Journal of Engineering Mechanics* 118, p. 2246–2264, nov, 1992.
- LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- LU, L.; OUYANG, D. **Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets**. *Nanomaterials* 187, p. 1-14, jul, 2017.
- LUO, Q. *et al.* **Improving flexural strength of UHPC with sustainably synthesized graphene oxide**. *Nanotechnology Reviews* 10, p. 754-767, jan, 2021.

LV, S. *et al.* **Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites.** Construction and Building Materials 49, p.121–127, dez, 2013.

MARASCHIN, T.G. **Preparação de óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido e dispersão em matriz polimérica biodegradável.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARCANO, D. C. *et al.* **Improved synthesis of graphene oxide.** ACS nano, v. 4, n. 8, p. 4806-4814, 2010.

MARTINI, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. **Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction.** Cement Concrete Research 40, p. 226–234, fev, 2010.

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

MENG, W.; KHAYAT, K. H. **Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers.** Composites Part B 107, p. 113–122, dez, 2016.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. **Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar.** Composites Part B 117, p. 26–34, mai, 2017.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. **Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC.** Cement Concrete Research 105, p. 64–71, mar, 2018.

NAIR, R.R. *et al.* **Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene.** Science 320 p. 1308-1308, jun, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology.** Harlow, England; New York:Prentice Hall, 2010.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Tradução Ruy Alberto Cremonini, 2. ed., Porto Alegre: Bookman, 2013, p.2.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

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

OMRAN, A. F.; NAJI, S.; KHAYAT, K. H. **Portable vane test to assess structural buildup at rest of self-consolidating concrete,** ACI Materials Journal 108, p. 628–637, nov, 2011.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

PAN, Z. *et al.* **Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite**. *Cement and Concrete Composites* 58, p. 140 – 147, abr, 2015.

PARK, S.; RUOFF, R.S. **Chemical methods for the production of graphene**. *Nat Nanotechnol*, v.4, n.4, p. 217-224, 2009.

PASTRANA-MARTÍNEZ *et al.* **Nanotubos e Grafeno: Os primos mais jovens na família do carbono!** *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, n. 128. Vol 37 p.21-27, mar, 2013.

PIERSON, H. O. **Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes: Processing, Properties and Applications**. William Andrew; Illustrated edition. [s.l], 1994

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas defibras**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

RODRÍGUEZ, B. A. G. **Síntese e caracterização de grafeno oxidado e nanofitas de carbono e estudos de suas possíveis aplicações**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

ROUSSEL, N. **A theoretical frame to study stability of fresh concrete**, *Materials and Structures* 39, p. 81–91, mar, 2006.

ROUSSEL, N. *et al.* **The origins of thixotropy of fresh cement pastes**. *Cement and Concrete Research* 42, p. 148–157, jan, 2012.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. **Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], n. February, p. 1–6, 1996.

SHAHRIARY, L.; ATHAWALE, A. A. **Graphene oxide synthesized by using modified hummers approach**. *Int. J. Renew. Energy Environ. Eng*, v.2, n.01, p. 58-63, 2014.

SILVA, I. S. **Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. **Development of ultra-high-performance concrete using glass powder - Towards ecofriendly concrete**. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 125, p. 600–612, 2016.

SONG, Q. *et al.* **Key parameters in optimizing fibres orientation and distribution for ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC).** Construction and Building Materials 188, p. 17–27, nov, 2018.

SOVJÁK, R. *et al.* **Response of thin UHPFRC targets with various fibre volume fractions to deformable projectile impact.** Procedia Engineering 193, p. 3–10, 2017.

SUN, H. *et al.* **Effect of graphene oxide/ graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation.** Nanomaterials, v. 10, n. 113, 2020.

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.

VIEIRA SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. **Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 11, n. 2, 2016, p. 54-57.

VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo de prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2001.

VOORT, T. V.; SULEIMAN, M.; SRITHARAN, S. **Design and Performance Verification of UHPC Piles for Deep Foundations.** A report from Center for Transportation Research and Education Iowa State University, 2008.

WANG, J. *et al.* **Mechanical properties of graphene-reinforced reactive powder concrete at different strain rates.** Journal of Marterials Science 55, p. 3369-3387, mar, 2020.

WU, Y.Y. *et al.* **Effect of Graphene Oxide Nanosheets on Physical Properties of Ultra-High-Performance Concrete with High Volume Supplementary Cementitious Materials.** Materials 13, abr, 2020.

WU, Z. *et al.* **Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete.** Construction Building Materials 103, p. 8–14, jan, 2016.

XU, Z.; HAO, H.; LI, H.N. **Experimental study of dynamic compressive properties of fiber reinforced concrete material with different fibers.** Materials & Design 33, p. 42–55, jan, 2012.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. **Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout.** Cement and Concrete Research 31, p. 731–738, mai, 2001.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. **Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture.** *Materials and Structures* 36, p. 402–412, jul, 2003.

YAHIA, A. **Shear-thickening behavior of high-performance cement grouts—influencing mix-design parameters,** *Cement and Concrete Research* 41, p. 230–235, mar, 2011.

YAZICI, H.; DENIZ, E.; BARADAN, B. **The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete.** *Construction and Building Materials*, 42, 2013. 53-63.

YIĞİTER, H. *et al.* **Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC).** *Composites Part B: Engineering* 43, p. 2907–2914, dez. 2012.

YU, C.; WANG, C.; CHEN, S. **Facile Access to Graphene Oxide from Ferro-Induced Oxidation.** *Scientific Reports* 6, n. 17071, 2016.

ZANNI, H. *et al.* **Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ²⁹Si NMR.** *Cement and Concrete Research*, 1996. v. 26, n. 1, p. 93-100.

ZHAO, X. *et al.* **Enhanced Mechanical Properties of Graphene-Based Poly (vinyl Alcohol) Composites.** *Macromolecules*, v. 43, n. 5, p. 2357–2363, 2010.