

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Especialização em Construção Civil

Matheus Araújo Ourique

**AVALIAÇÃO DO USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS NA
COMPOSIÇÃO DO CONCRETO**

Belo Horizonte

2021

MATHEUS ARAÚJO OURIQUE

**AVALIAÇÃO DO USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS NA COMPOSIÇÃO DO
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Gestão e Tecnologia na Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Marys Lene Braga Almeida

Belo Horizonte

2021

O93a Ourique, Matheus Araújo.
Avaliação do uso de materiais poliméricos na composição do concreto
[recurso eletrônico] / Matheus Araújo Ourique. – 2021.
1 recurso online (47 f.: il., color.) : pdf.

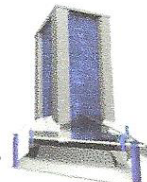
Orientadora: Marys Lene Braga Almeida.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em
Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
de Minas Gerais.

Bibliografia: f. 43-47.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Concreto. 3. Compósitos poliméricos.
4. Sustentabilidade. I. Almeida, Marys Lene Braga. II. Universidade
Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691

**ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA**

ALUNO: MATHEUS ARAÚJO OURIQUE

MATRÍCULA: 2020687393

RESULTADO

Aos 19 dias do mês de outubro de 2021 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

"AVALIAÇÃO DO USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

 APROVADO X APROVADO COM CORREÇÕES REPROVADO

NOTA: 85,0-----

CONCEITO: --B-----

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Assinatura

Profª. Drª. Marys Lene Braga Almeida

Nome

Assinatura

Profª. Drª. Danielle Meireles de Oliveira

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Antonio Neves de
Carvalho
Junior:78724104604Assinado de forma digital por
Antonio Neves de Carvalho
Junior:78724104604
Dados: 2021.10.19 20:06:08
-03'00'

Belo Horizonte, 19 de outubro de 2021

Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de realizar o curso e a todo o seu corpo docente, coordenação e administração pelo apoio e dedicação.

À minha orientadora Marys Lene Braga Almeida, pelo empenho dedicado ao meu projeto de pesquisa.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Aos meus pais, amigos e familiares, pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

RESUMO

Nas últimas duas décadas, pesquisas sobre o uso de polímeros em materiais cimentícios evidenciam que esses materiais inovadores têm potencial para serem utilizados na produção de concreto. Assim, diante de algumas particularidades do concreto, como fissuração, baixas resistências à tração e ductilidade, estudos têm sido realizados para averiguar o comportamento e a melhoria de propriedades do material com a adição de polímeros. Nesse cenário, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura acerca de diferentes polímeros para o uso em concreto. Com base na investigação, concluiu-se que, a partir do desenvolvimento de novas tecnologias com a adição de materiais poliméricos, é possível obter concreto com características de desempenho aprimoradas, sendo significativas as melhorias tanto em suas propriedades mecânicas quanto físicas e químicas. O resultado deste trabalho apresenta informações pertinentes para o desenvolvimento de novos estudos.

Palavras-chave: Construção civil. Concreto. Compósitos poliméricos. Sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Setores e materiais responsáveis pela emissão de gás carbônico | 5 |
| Figura 2 - Microscopia do concreto no estado fresco | 10 |
| Figura 3 - Microscopia do concreto no estado endurecido | 12 |
| Figura 4 - Exemplos de cadeias de polímeros usuais..... | 14 |
| Figura 5 - Composição percentual, em massa, dos diferentes tipos de plásticos descartados no Brasil em 2018..... | 19 |
| Figura 6 - Etapas típicas da reciclagem mecânica do plástico | 23 |
| Figura 7 - Fibras poliméricas de polietileno (a) e polipropileno (b) | 25 |
| Figura 8 - Concentração de tensões na fissura de concreto sem fibras poliméricas (a) e com fibras poliméricas (b) | 28 |
| Figura 9 - Dispositivos para sistema de drenagem construídos com concreto polimérico | 29 |
| Figura 10 - Reforço estrutural com compósito de fibras de carbono com matriz polimérica | 30 |
| Figura 11 - Microscopia do concreto convencional (a) e do concreto polimérico (b) | 32 |
| Figura 12 - Seção de corpo de prova rompido à compressão | 35 |
| Figura 13 - Superfície de fratura de concreto convencional (a) comparada com a de concreto com adição de fibras poliméricas (b)..... | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Principais resultados e avanços na área de materiais compósitos de concreto e polímeros | 2 |
| Tabela 2 - Ensaio Correlacionados à Trabalhabilidade..... | 11 |
| Tabela 3 - Propriedades do Concreto Endurecido | 13 |
| Tabela 4 - Principais aplicações para a reutilização de resíduos da construção..... | 18 |
| Tabela 5 - Tipos de reciclagem e suas características | 20 |
| Tabela 6 - Possíveis desvantagens do uso de resíduos poliméricos da construção civil | 22 |
| Tabela 7 - Resistência mecânica e módulo de elasticidade de fibras poliméricas ... | 25 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 2.1 Objetivo geral | 4 |
| 2.2 Objetivos específicos | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 A sustentabilidade na construção civil | 5 |
| 3.2 Concreto convencional | 7 |
| 3.2.1 Cimento | 8 |
| 3.2.2 Agregados | 8 |
| 3.2.3 Água de amassamento | 9 |
| 3.2.4 Propriedades do concreto no estado fresco | 9 |
| 3.2.5 Propriedades do concreto no estado endurecido | 11 |
| 3.3 Polímeros | 14 |
| 3.3.1 Polímeros na construção civil | 17 |
| 3.3.2 Uso de polímeros reciclados no concreto | 19 |
| 3.3.2.1 Resíduos poliméricos da construção como agregado | 20 |
| 3.3.3 Fibras poliméricas | 24 |
| 3.4 Concreto com adição de polímeros | 26 |
| 3.4.1 Concreto impregnado com polímero (CIP) | 26 |
| 3.4.2 Concreto modificado com polímero (CMP) | 26 |
| 3.4.3 Concreto polimérico (CP) | 27 |
| 3.4.4 Concreto com fibras poliméricas | 27 |
| 3.5 Aplicabilidade do concreto polimérico | 28 |
| 4. METODOLOGIA | 31 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 5.1 Propriedades mecânicas do concreto contendo materiais poliméricos .. | 32 |
| 5.1.1 Resistência à compressão | 32 |
| 5.1.2 Resistência à tração | 33 |
| 5.1.3 Tenacidade | 34 |
| 5.2 Propriedades do concreto com adição de fibras poliméricas | 34 |
| 5.2.1 Resistência à compressão | 34 |
| 5.2.2 Resistência à tração | 35 |
| 5.2.3 Tenacidade | 36 |

| | |
|--|----|
| 5.3 Propriedades relacionadas à durabilidade de concreto contendo materiais poliméricos | 37 |
| 5.3.1 Absorção de água..... | 37 |
| 5.3.2 Penetração de íons cloreto..... | 38 |
| 5.3.3 Carbonatação | 38 |
| 5.3.4 Contração por secagem | 39 |
| 5.4 Propriedades termo físicas | 39 |
| 5.5 Resistência ao fogo | 40 |
| 6. CONCLUSÃO | 41 |
| 6.1 Sugestões para trabalhos futuros | 42 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 43 |

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como umas das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social em todo o mundo, sendo responsável pela geração de milhões de empregos, ampla produção de insumos, e, por outro lado, comporta-se como grande geradora de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos (Sinduscon-SP, 2015).

Segundo dados divulgados pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2020), o PIB do setor da construção civil no país deve aumentar em 4% no ano de 2021, configurando o melhor desempenho do setor desde 2013, quando houve aumento de 4,5%, sendo imprescindível a tomada de medidas do setor na minimização da geração de resíduos.

As ações sustentáveis têm ocupado espaço crescente na construção civil, principalmente na produção de concreto, em que os pesquisadores analisam a incorporação dos mais diversos resíduos que anteriormente não representavam qualquer relação com esse material (Medeiros *et al.*, 2018). Os concretos produzidos a partir de agregados reciclados geralmente apresentam características distintas do convencional, pois o tipo de agregado reciclado adicionado à dosagem do concreto tem grande influência em suas propriedades, criando a necessidade de estudo das características de concretos não convencionais (Pimentel *et al.*, 2020).

O concreto convencional, apesar de ser o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo somente para a água, e ter se tornado essencial para a construção civil, ainda apresenta limitações devido ao fato das matrizes cimentícias apresentarem baixa resistência à tração, comportamento frágil na ruptura e rápida deterioração quando expostos a agentes agressivos (Neville, 2016). Visando melhorar as propriedades do concreto, pesquisadores têm buscado materiais inovadores com o propósito de ampliar sua usabilidade.

Nas últimas décadas diversas pesquisas têm sido realizadas para avaliar as possíveis utilizações de resíduos poliméricos a fim de combinar suas vantagens em termos de um melhor comportamento do concreto com esse tipo de material, que seriam destinados a aterros ou incinerados (Foti, 2019).

A adição de polímeros ao concreto, se feita de forma adequada, resulta em um compósito mais resistente, mais durável, com boa constância química, impermeável à água e com menores requisitos de manutenção, podendo ser amplamente utilizado em diferentes aplicações da engenharia, como componente principal para a construção de bueiros, tubos subterrâneos, pisos industriais, coberturas de pontes e em reparação de estruturas danificadas (Hameed & Hamza, 2019). Rostami *et al.* (2020) avaliaram os efeitos da adição da fibra de polipropileno nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. Xiong *et al.* (2021) avaliaram as propriedades do concreto a partir da adição de fibras de carbono reforçadas com polímeros. Gu (2016) realizou uma revisão bibliográfica de diversos tipos de materiais poliméricos em concretos, podendo-se destacar os efeitos do uso do poliestireno, do polietileno e do poliuretano.

Neste contexto, baseando-se nos trabalhos citados anteriormente, obtidos a partir de revisão sistemática da literatura, a Tabela 1 sintetiza e consolida relevantes pesquisas na área de materiais compósitos de concreto e polímeros.

Tabela 1 - Principais resultados e avanços na área de materiais compósitos de concreto e polímeros

| Tipo de Polímero | Aplicação | Autor |
|---|------------------|--|
| Fibra de polipropileno | Concreto | Rostami <i>et al.</i> (2020) |
| Fibras de carbono reforçada com polímeros | Concreto | Xiong <i>et al.</i> (2021) |
| Microfibra polipropileno | Concreto | Leite (2018), Andrade (2013) e Amaral <i>et al.</i> (2016) |
| Poliestireno, polietileno e poliuretano | Concreto | Gu (2016) e Saikia & Brito (2013) |
| Espuma Poliuretano | Concreto celular | Fraj <i>et al.</i> (2010) |
| Fibras PET | Concreto | Silva <i>et al.</i> (2013) |
| Poliestireno | Concreto | Wang <i>et al.</i> (2018) |
| Poliéster | Concreto | Jamshidi & Pourkhorshidi (2015) |

Fonte: elaborada pelo Autor.

Reconhecendo a necessidade preeminente de aprimorar as características do concreto aliado à sustentabilidade, a monografia apresentada justifica-se por realizar uma análise qualitativa da adição de diferentes tipos de materiais poliméricos no concreto, levando em conta o estado da arte.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão sistemática da literatura do uso de materiais poliméricos no concreto.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Verificar o desempenho mecânico e as propriedades físicas do concreto com a incorporação de polímeros;
- Avaliar as patologias dos concretos com polímeros e o convencional, quanto à carbonatação e íons de cloreto;
- Constatar a viabilidade de utilização de polímeros em concretos, demonstrando suas principais vantagens.

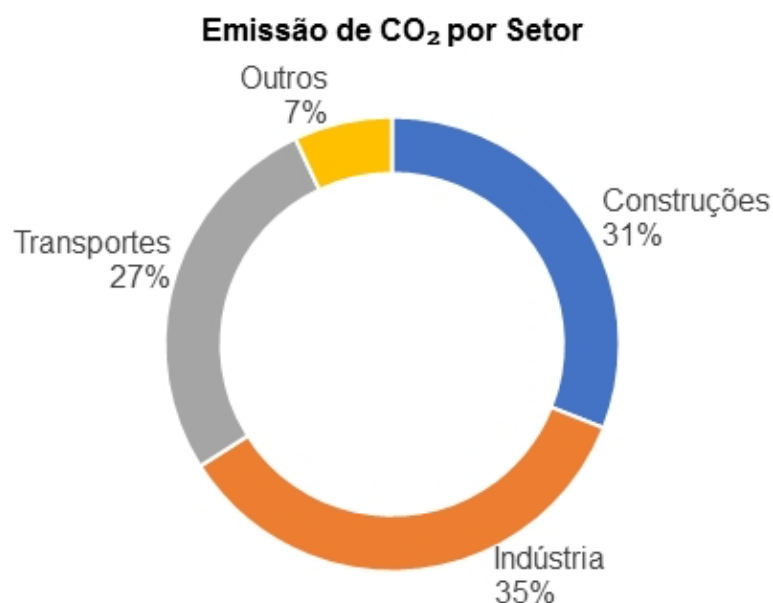
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A sustentabilidade na construção civil

Sabe-se que a indústria da construção civil, é um setor responsável por grande parte da economia mundial, não apenas como produtora de insumos, equipamentos e serviços, mas também como fonte de desenvolvimento econômico e geração de empregos. Em contrapartida, este setor é um dos principais causadores de impactos ao meio ambiente, quer seja pela extração, beneficiamento e consumo de materiais ou pela emissão de poluentes na atmosfera e geração de resíduos ao ambiente (Costa, 2019).

Estima-se que durante as atividades construtivas, cerca de 35% da emissão dos gases de efeito estufa e 40% da energia consumida mundialmente, são registradas. Além disso, a construção civil ainda tem como consequência o desmatamento, abundante uso de água e recursos e desenfreada geração de resíduos (Allwood & Cullen, 2012). Ainda segundo os autores, nos Estados Unidos da América, dados indicam que, aproximadamente, 70% da emissão de gases nocivos à camada de ozônio tem origem no setor de energia e processamento, principalmente na indústria e nas construções (Figura 1).

Figura 1 - Setores e materiais responsáveis pela emissão de gás carbônico



Fonte: Allwood & Cullen (2012).

No Brasil, a crescente expansão na produção de insumos da construção civil, tem promovido o agravamento de impactos ambientais e sociais, principalmente com relação à saúde da população (Gasques *et al.*, 2014).

Segundo Costa (2019), entre os materiais consumidos pela construção civil, destacam-se: água, energia elétrica, minérios diversos, cimento, concreto, madeiras, plásticos, cerâmicas, metais, alumínio, areia, rochas, entre outros, sendo necessário o consumo de grande quantidade de matéria prima para a fabricação destes materiais, além da geração de diversos tipos de resíduos. Muitos destes materiais são descartados de maneira ilegal, aumentando os índices de poluição dos solos e rios, causando transtornos à população e impactos ambientais de grandes proporções. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2012), avalia-se que praticamente 50% da geração de resíduos a nível mundial, seja consequência direta das construções.

Leite *et al.* (2017) reconhece que uma das maiores preocupações referentes à geração descontrolada de resíduos da construção civil é a disposição irregular. Os autores afirmam ainda que a disposição irregular engloba todos os despejos clandestinos em vias e logradouros públicos, terrenos baldios e fundos de vales. Tais despejos são responsáveis pelo surgimento de bota-foras irregulares, que acabam se transformando em lixões.

Segundo o Sindicato das Indústrias do Estado de São Paulo (2015), a disposição irregular está relacionada à carência de políticas públicas que disciplinem e ordenem os fluxos da destinação dos resíduos da construção civil, associada ao descompromisso dos geradores no manejo e, principalmente, na destinação dos resíduos, provocando os seguintes impactos ambientais: degradação das áreas de manancial e de proteção permanente; proliferação de agentes transmissores de doenças; assoreamento de rios e córregos; obstrução dos sistemas de drenagem (piscinões, galerias e sarjetas); ocupação de vias e logradouros públicos por resíduos, com prejuízo para a circulação de pessoas e veículos, além da própria degradação da paisagem urbana e existência e acúmulo de resíduos que podem gerar risco devido a sua periculosidade.

Os resíduos gerados nas obras e seus canteiros devem ser segregados na fonte e descartados conforme a legislação. É obrigação de todos os colaboradores descartá-los adequadamente. Assim, cabe aos gestores disponibilizar orientações de fácil acesso nos locais e frentes de serviço por meio de placas de orientação, cartilhas e treinamentos (Leite *et al.*, 2017).

A gestão de resíduos sólidos se enquadra nas atividades de saneamento básico, pois existe a interdependência entre este, a saúde e o meio ambiente. Portanto, as ações de gerenciamento de resíduos da construção civil devem ser inter-relacionadas para contribuir com a melhoria da qualidade ambiental proporcionada a população (Silva *et al.*, 2015).

Para Dornelas (2019), a maior parte dos resíduos gerados pela construção civil podem ser absorvidos por ela mesma, essa absorção se dá através da reutilização e reciclagem desses resíduos e de sua incorporação junto a outros elementos, gerando novos materiais como: agregados graúdos e miúdos, blocos, tubos de drenagem, elementos para pavimentação, contenções, dentre outros.

3.2 Concreto convencional

Segundo Andrade (2013), o concreto é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade, podendo ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida. Ainda segundo o autor, o concreto é um material compósito constituído de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água de amassamento e eventualmente aditivos químicos e adições.

Para se obter um concreto resistente, durável, econômico e de bom aspecto, deve-se estudar: as propriedades de cada um dos materiais componentes; as propriedades e os fatores que podem alterá-las; o proporcionamento correto e execução cuidadosa da mistura, o concreto deve ser transportado, lançados nas fôrmas e adensado corretamente; cura cuidadosa, a hidratação do cimento continua por um tempo bastante longo e é preciso que as condições ambientes favoreçam as reações que se processam. Desse modo, deve-se evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento. É o que se denomina cura do concreto; o

modo de executar o controle do concreto durante a fabricação e após o endurecimento (Couto *et al.*, 2013).

3.2.1 Cimento

Cimento, no sentido geral da palavra, pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta. Essa definição abrange uma grande variedade de materiais cimentícios (Neville, 2016).

Na área da construção, o significado do termo "cimento" é restrito a materiais aglomerantes utilizados com pedras, areia, tijolos, blocos para alvenaria, etc. Os principais constituintes desse tipo de cimento são compostos de calcário, de modo que, em engenharia civil e construções, o interesse é o cimento à base de calcário. Visto que reagem quimicamente com a água, os cimentos para a produção de concreto têm a propriedade de reagir e endurecer sob a água, sendo, então, denominados cimentos hidráulicos (Neville & Brooks, 2019).

Segundo Neville (2016), o processo de fabricação do cimento consiste essencialmente na moagem da matéria-prima, na sua mistura íntima em determinadas proporções e na queima (a temperaturas de até cerca de 1.450 °C) em grandes fornos rotativos, onde o material é sintetizado e parcialmente fundido, tomando a forma de esferas conhecidas como clínqueres. O clínquer é resfriado e recebe a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio, sendo então moído até se tornar um pó bastante fino. O material resultante é o cimento Portland, tão utilizado em todo o mundo. Ainda segundo o autor, a mistura e a moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto em condição úmida quanto seca, originando as denominações de processo "por via seca" e "por via úmida". Os métodos de fabricação dependem, na realidade, tanto da dureza das matérias-primas como de seu teor de umidade.

3.2.2 Agregados

Os agregados são materiais de diferentes granulometrias que são adicionados ao cimento e água, não podendo gerar reações, ou seja, são materiais inertes (Santos *et al.*, 2020).

O Instituto Brasileiro do Concreto (2017) ressalta que os agregados desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, quer seja do ponto de vista econômico ou do ponto de vista técnico, e exercem influência benéfica sobre algumas características importantes, como retração, aumento de resistência ao desgaste, entre outros sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos.

Segundo definição da NBR 7211:2019 os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto.

3.2.3 Água de amassamento

A água de amassamento é um fator que interfere diretamente na qualidade do concreto, seja na própria composição ou na relação água/cimento. A relação água/cimento é um fator que influencia na suscetibilidade do concreto ao ingresso de agentes externos, pois interferem na porosidade, permeabilidade e capacidade de absorção (Gonçalves & Godinho, 2017).

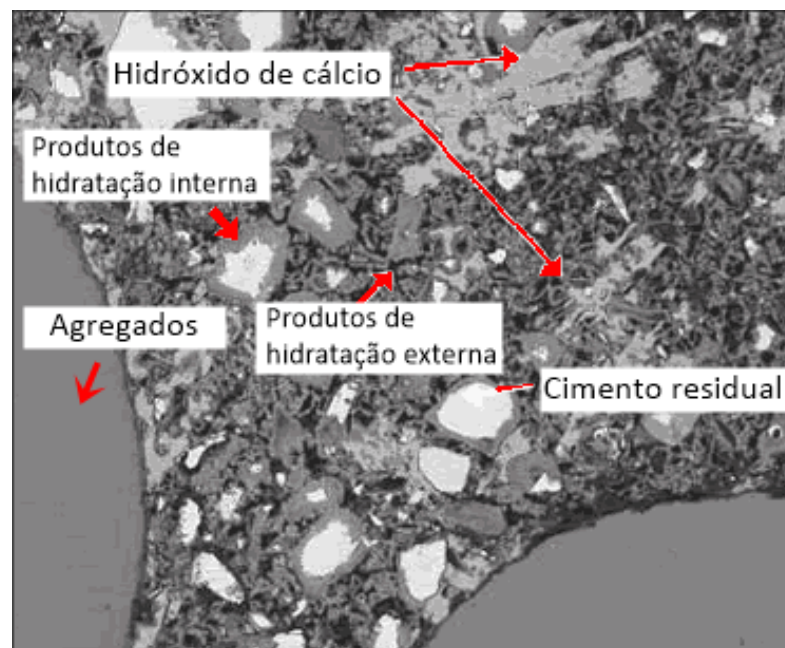
Segundo consta a NBR 15.900-1:2019, a água de amassamento, utilizada para fazer a mistura do cimento com os agregados para formação do concreto, não pode apresentar pH menor que 5,0 (água ácida) e teor de sulfato superior a 2000 mg/L.

3.2.4 Propriedades do concreto no estado fresco

A evolução tecnológica dos processos de aplicação dos concretos tem possibilitado sua instalação por métodos diferentes da tradicional conformação sob auxílio de vibração e/ou compactação, sendo que o emprego de materiais autoadensáveis, bombeáveis, de projeção, compactados por rolo, entre outros, tem se tornado uma prática frequente nos dias de hoje (Ibracon, 2011). Ainda segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (2011), em seu estado fluido anterior à cura, os concretos podem ser compreendidos como suspensões bifásicas compostas por uma fração de partículas grosseiras (agregados graúdos e miúdos) imersas em uma matriz de partículas finas reativas (cimento Portland) e água em teor suficiente para que as mesmas sejam aplicadas no estado fluido. Em certos casos, finos inertes (calcário moído, argilominerais, polímeros), aditivos químicos (incorporadores de ar,

aceleradores/retardadores de pega, dispersantes, modificadores reológicos da fase líquida, etc.) e fibras (poliméricas, metálicas) são ainda incorporados às composições. Sendo, portanto, uma suspensão fluida reativa, cuja consistência é, sobretudo, modificada pela atuação do cimento. O desenvolvimento sistemático de uma composição deve, portanto, garantir que não resulte em características microestruturais que afetem a atuação dos mesmos no estado endurecido (Figura 2).

Figura 2 - Microscopia do concreto no estado fresco



Fonte: Freitas (2012).

De acordo com o Instituto Brasileiro do Concreto (2017) são propriedades do concreto no estado fresco: a trabalhabilidade, a integridade da massa (oposto de segregação), o poder de retenção de água (oposto de exsudação) e a massa específica.

A trabalhabilidade é definida como a propriedade do concreto no estado fresco pela qual se determina a sua capacidade de ser transportado, inserido e vibrado para o seu adequado adensamento sem qualquer segregação (Bachiller, 2017). Ainda segundo o autor, não existe um método direto para medir a trabalhabilidade, porém existem alguns ensaios que correlacionam esta propriedade com algum outro recurso, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio Correlacionados à Trabalhabilidade

| Ensaio | Característica | Norma |
|---|------------------------------------|---------------------|
| Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test) | Consistência plástica | ABNT NBR NM 67:1998 |
| Ensaio de abatimento na mesa de Graff | Consistência fluida | ABNT NBR NM 68:1998 |
| Ensaio de VeBe | Consistência seca | ACI 211.3/87 |
| Caixa de Walz | Consistência entre plástica e seca | DIN 1048-1 |

Fonte: O Autor (2021).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2016), a trabalhabilidade é afetada por três classes de fatores:

- **Características do próprio concreto** – representadas pela sua consistência, que corresponde ao grau de plasticidade da massa e pela sua capacidade de manter-se homogênea;
- **Condições de manipulação** – envolvendo os tipos de equipamentos e sistemas de trabalho adotados nas operações e produção, transporte e lançamento do concreto; e
- **Condições de projeto** – caracterizadas pelas dimensões dos elementos de construção e afastamento das armaduras.

3.2.5 Propriedades do concreto no estado endurecido

O concreto é considerado um sólido a partir da pega. É um material em constante evolução e susceptíveis alterações impostas pelo meio ambiente, sendo elas físicas, químicas e mecânicas, e que ocorrem de maneira lenta. A durabilidade de um concreto pode ser perfeitamente aceitável quando a estrutura se encontra devidamente protegida (Freitas, 2012). A Figura 3 apresenta a estrutura microscópica do concreto no estado endurecido.

Figura 3 - Microscopia do concreto no estado endurecido



Fonte: Mehta & Monteiro (2014).

A resistência do concreto no estado endurecido normalmente é considerada sua propriedade mais importante, embora, em muitas situações práticas, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade, possam ser mais relevantes. No entanto, a resistência costuma fornecer uma ideia geral da qualidade do concreto, visto que está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento hidratada. Além do mais, a resistência é, quase invariavelmente, um elemento fundamental no projeto estrutural, e é especificada para fins de controle (Neville, 2016).

Segundo Bachiller (2017), ainda não foi encontrada uma lei geral que seja válida para descrever o comportamento do concreto sob as tensões a que uma estrutura é submetida, no entanto, podemos estudar as diferentes propriedades do concreto no estado endurecido e com isso podemos inferir seu comportamento. A Tabela 3 consolida suas propriedades mais conhecidas.

Tabela 3 - Propriedades do Concreto Endurecido

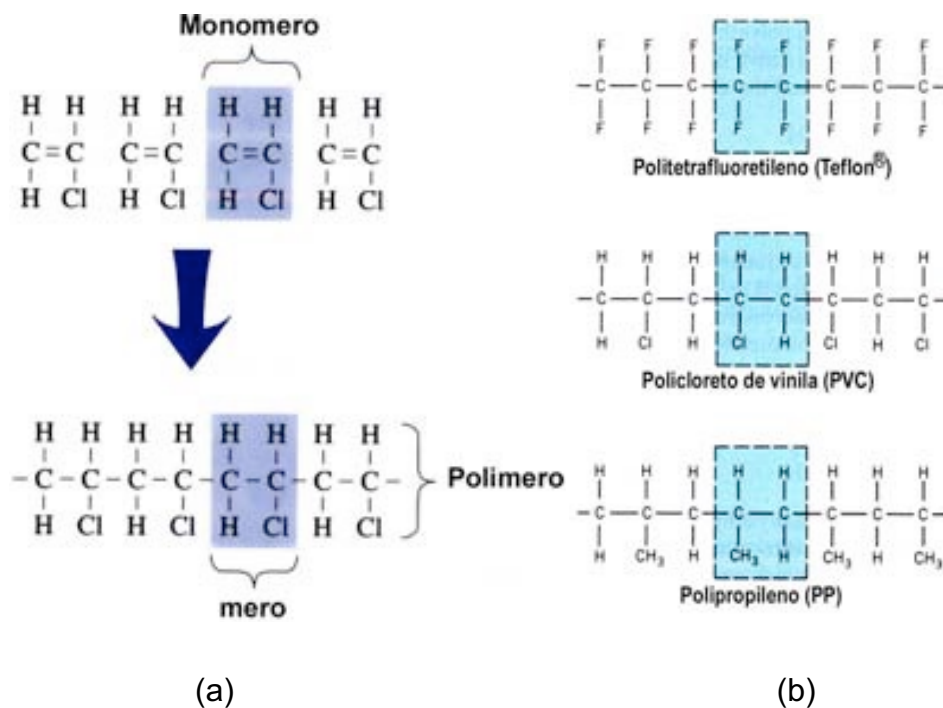
| Características do concreto no estado endurecido | Propriedades | Conceito | Fatores que influenciam |
|---|--------------------------|--|---|
| Características físico-químicas | Impermeabilidade | Capacidade do concreto de impedir a passagem de água através dos poros. | - Finura do cimento - Quantidade da água de amassamento |
| | Durabilidade | Capacidade de resistir à ação de intemperismo, ataque químico, abrasão e qualquer outro processo que cause a deterioração do concreto. | - Sais - Calor - Agentes contaminantes - Umidade |
| | Resistência térmica | Capacidade do concreto de resistir às variações de temperatura. | - Baixas temperaturas - Grandes variações de temperatura - Temperaturas acima de 300 °C |
| Características mecânicas | Resistência à compressão | É a tensão máxima que o concreto pode suportar sob uma carga de esmagamento. | - Relação A/C - Idade do concreto - Teor de ar incorporado - Teor de cimento - Influência dos agregados - Cura |
| | Resistência à flexão | É a tensão máxima que uma viga pode suportar na flexão antes da ruptura. | - Relação A/C - Idade do concreto - Teor de ar incorporado - Teor de cimento - Influência dos agregados - Uso de aditivos (fibras) |

Fonte: Bachiller (2017).

3.3 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (Canevarolo, 2010). A Figura 4 (a) representa uma cadeia simples de um polímero conhecido como polietileno, o monômero formador deste polímero, o etileno, está destacado na figura e a (b) representa a cadeia de alguns outros polímeros conhecidos.

Figura 4 - Exemplos de cadeias de polímeros usuais



Fonte: Shackelford (2021) e Callister (2020).

Os polímeros podem ser classificados, normalmente, segundo as seguintes propriedades:

- **Estrutura química** – classifica os polímeros quanto aos grupos funcionais presentes em sua cadeia. Podem ser: poliéteres, poliamidas, poliésteres, entre outros;
- **Método de preparação** – conforme a ocorrência de adições, os polímeros podem ser classificados como polímeros de adição ou polímeros de condensação;
- **Processos tecnológicos de fusão** – os polímeros que permitem fusão e solidificação por aquecimento e resfriamento, respectivamente, são chamados de termoplásticos. Caso contrário, são chamados de termorrígidos;
- **Comportamento mecânico** – quanto ao comportamento mecânico, os polímeros podem ser classificados como elastômeros (material bastante flexível à temperatura ambiente), plásticos (são moldáveis sob condições de pressão e calor, mas sólidos à temperatura ambiente) e fibras (apresenta elevada razão em seu comprimento e suas dimensões laterais, e comportamento próximo ao dos plásticos).

Segundo Vedovello e Casanova (2019), os polímeros são classificados em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos podem ser naturais ou sintéticos, e são facilmente amolecidos e moldados com aumento da temperatura, facilitando sua reciclagem e ampliando seu uso. Os termofixos, por sua vez, não têm sua rigidez afetada pela temperatura; quando esta é consideravelmente elevada, este polímero degrada-se, impossibilitando sua reciclagem. Já os elastômeros são materiais capazes de sofrer grandes deformações antes da sua ruptura, podem ou não ser recicláveis, conforme se dão seus processos de produção e são usualmente conhecidos como borrachas.

Na área técnico-científica de polímeros é usada uma extensa série de termos técnicos, cujos conceitos são internacionalmente aceitos. São apresentados a seguir os principais termos utilizados quando se trata da utilização de polímeros na construção civil (Canevarolo, 2010):

- **Polímero** – material orgânico ou inorgânico de alta massa molar (acima de dez mil, podendo chegar a dez milhões), cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente;

- **Macromolécula** – uma molécula de alta massa molar, mas que não tem necessariamente em sua estrutura, uma unidade de repetição;
- **Monômero** – molécula simples que dá origem ao polímero. Deve ter funcionalidade de no mínimo 2, ou seja, ser pelo menos bifuncional;
- **Mero** – unidade de repetição da cadeia polimérica;
- **Grau de polimerização (GP)** – número de unidades de repetição da cadeia polimérica;
- **Plásticos** – material polimérico de alta massa molar, sólido como produto acabado, que pode ser subdividido em:
 - **Termoplásticos** – plásticos com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Quando estes são retirados, o polímero solidifica-se em um produto com formas definidas. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Esta alteração é uma transformação física, reversível. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. São fusíveis, solúveis e recicláveis. Exemplos: polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamida (Náilon), entre outros.
 - **Termofixo** (ou termorrígido ou termoendurecido) – plástico que amolece uma vez com o aquecimento, sofre o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido. Posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado físico, ou seja, não amolece mais, tornando-se infusível e insolúvel. Exemplos: baquelite, resina epóxi;
- **Fibra** – termoplástico orientado com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (eixo maior). Deve satisfazer a condição geométrica de o comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro ($L/D > 100$);
- **Elastômero** – polímero que, à temperatura ambiente, pode ser deformado repetidamente a pelo menos duas vezes o seu comprimento original. Retirado o esforço, deve voltar rapidamente ao tamanho original;
- **Borracha** – elastômero natural ou sintético;

Garcia e Mendes (2014) destacam ainda que o termoplástico vem do grego, *plastikus*, que significa material *adequado à moldagem*. Os plásticos são materiais que, embora sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, quando aquecidos

acima da temperatura de “amolecimento” tornam-se fluidos e passíveis de serem moldados por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Alguns exemplos de termoplásticos são o PP (polipropileno), o PE (polietileno), o PET (politereftalato de etileno), o PVC (policloreto de vinila) e o PS (poliestireno). Ainda segundo as autoras, os termoplásticos são moldáveis a quente e possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmico e elétricos, são resistentes ao impacto e possuem baixo custo, portanto, apresentam uma larga faixa de aplicações.

Devido a estas propriedades, o consumo dos polímeros vem crescendo no Brasil e no mundo. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (2019), em 2018, foram produzidos no Brasil 15,5 milhões de toneladas de materiais termoplásticos, sendo consumido pela construção civil 22,5% desse total, dado que o PE, o PP, o PS, o PVC e o PET representam cerca de 90% do consumo nacional.

3.3.1 Polímeros na construção civil

O setor de construção tem usado materiais poliméricos para uma ampla gama de aplicações devido à sua durabilidade, resistência à corrosão, baixa manutenção e acabamento estético. Os produtos típicos incluem perfis, coberturas, materiais de isolamento, lonas de cabos, coberturas, aplicações à prova d'água, compostos, tubos e dutos. Os plásticos de construção comuns incluem cloreto de polivinil, poliestireno expandido, polietileno de alta densidade, polipropileno, polietileno de baixa densidade, poliestireno entre outros (Sormunen & Karki, 2019).

Quando descartado, o material polimérico utilizado pela construção civil, apesar de apresentar grande potencial de reaproveitamento, ainda é em sua maior parte destinado à incineração, conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 - Principais aplicações para a reutilização de resíduos da construção

| Origem do Resíduo | Situação | Aplicação |
|--------------------------|---|---|
| Concreto | Triturado, resultante de demolições | Material de aterro, base de enchimento para valas de tubulações e pisos térreos de edifícios. |
| | Triturado e peneirado com pouca ou nenhuma impureza | Sub-base na construção de estradas, agregado reciclado para a fabricação de concreto e base de enchimento para sistemas de drenagem. |
| | Triturado e peneirado, limpo de impurezas e com menos de 5% de tijolo | Construção de estradas, produção de concreto, material de aterro estrutural e base de enchimento para valas de tubulações. |
| Alvenaria | Tijolos | Agregados para concreto, produção de peças pré-fabricadas de concreto e tijolos de silicato de cálcio, material de enchimento para valas e tubulações, revestimentos de campos de tênis. |
| | Azulejos | Material de enchimento. |
| | Pedras | Reutilização direta, conservação e restauro. |
| Madeira | - | Mobiliários, soalhos, portas, caixilhos de janelas, estacas para plantas, reparação, material de enchimento para proteção de taludes, incineração. |
| Metais | Alumínio Ferro e Aço | Sucata e fabricação de novos elementos. Reutilização direta. |
| Vidros | - | Produção de novo vidro e construção de estradas. |
| Plástico | - | Incineração com recuperação energética, reciclagem por processamento mecânico (nem todos os plásticos), utilização na reciclagem de fontes energéticas (como o petróleo bruto e o gás natural). |
| Materiais de Isolamento | - | Moldagem de tijolos artificiais, espalhamento sobre o produto não curado (depois de a espuma estar separada em fibras simples), incineração. |

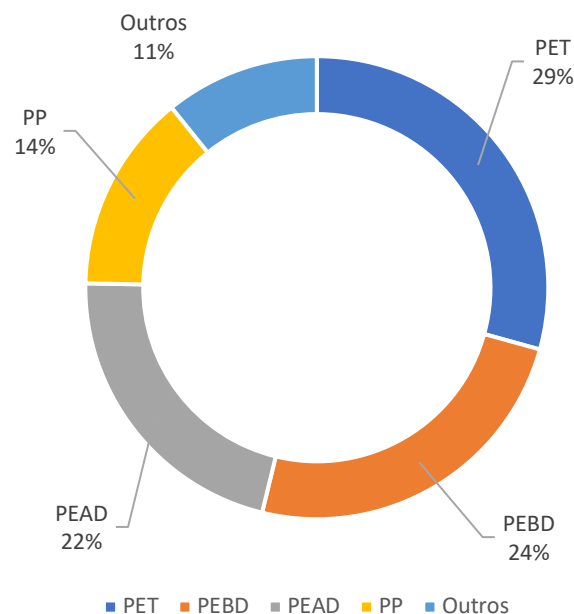
Fonte: O Autor (2021).

3.3.2 Uso de polímeros reciclados no concreto

Os plásticos se tornaram uma parte essencial do estilo de vida moderno e a produção global de plásticos aumentou imensamente nos últimos 50 anos, contribuindo muito para a produção de resíduos relacionados ao plástico. A reutilização de resíduos e materiais poliméricos reciclados na mistura de concreto como um material de construção ambientalmente adequado tem chamado a atenção de pesquisadores nos últimos tempos, e um grande número de estudos relatando o comportamento do concreto contendo resíduos e materiais poliméricos reciclados foram publicados (Gu, 2016).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2019), em 2018 foram coletadas 14.442 toneladas de resíduos plásticos em todo o Brasil, volume 27,7% superior ao de 2017. A Figura 5 apresenta a distribuição percentual, em massa, dos diferentes tipos de plásticos descartados no Brasil em 2018.

Figura 5 - Composição percentual, em massa, dos diferentes tipos de plásticos descartados no Brasil em 2018



Fonte: Abrelpe (2019).

León (2021) aponta que a pandemia da covid-19 intensificou um problema que vem se acumulando há, pelo menos, mais de 70 anos, que é a produção e o descarte

de plásticos. O relatório Atlas do Plástico, publicado pela fundação alemã Heinrich Böll, chama a atenção para o aumento do consumo de plásticos na pandemia, seja por conta das entregas de alimentos em casa, que cresceram com o isolamento social, pelo aumento no uso de copos e talheres descartáveis ou pelo consumo de máscaras descartáveis.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2021), houve um aumento de 25% a 30% na coleta de materiais recicláveis durante a pandemia. O problema é que, no Brasil, se recicla apenas 1% dos 11 milhões de toneladas de plásticos produzidos por ano. Para efeito de comparação, esse índice chega a 97% no caso das latas de alumínio.

A reciclagem de polímeros é classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária. Tanto a reciclagem primária como a secundária também são conhecidas como reciclagem mecânica, o que diferencia uma da outra é que na primária utilizam-se polímeros pré consumo e na secundária, polímeros pós consumo. A reciclagem terciária também é chamada de química e a quaternária chamada de energética, como mostra a Tabela 5. No Brasil a principal reciclagem utilizada é a mecânica (Vedovello & Casanova, 2019).

Tabela 5 - Tipos de reciclagem e suas características

| | | |
|-------------------|-------------|---|
| Mecânica | Primária | Incide sobre limpo, não contaminado, único tipo de sucata de operações de aperfeiçoamento. |
| | Secundária | Visa à gestão por misturas de resíduos de plástico. |
| Química | Terciária | Tem sido definida como a clivagem de cadeias de polímeros para tomar os produtos químicos de distribuição de peso molecular mais baixo ou mesmo para recuperar o monômero inicial, que pode ser utilizado para outro ciclo completo de polimerização. |
| Energética | Quaternária | Compreende a utilização de resíduos plásticos como fontes de energia. |

Fonte: Vedovello & Casanova (2019).

3.3.2.1 Resíduos poliméricos da construção como agregado

A definição de agregado reciclado diante a NBR 15116:2004 é como uma “obtenção do beneficiamento dos resíduos da construção, que possuem algumas características que o permitem ser utilizados como insumo durante a execução de obras”. O mesmo é considerado um insumo importante para a produção de materiais

cimentícios, e acarreta influências diretas nas características que se quer alcançar do material produzido (Koper *et al.*, 2017).

O uso de polímeros provenientes de aterros e instalações de recuperação de materiais é incomum em comparação com o uso de polímeros de subprodutos industriais mais limpos. Conseqüentemente, a pesquisa sobre resíduos poliméricos da construção civil como matéria-prima para a produção de compósitos também é escassa (Sormunen & Karki, 2019). A falta de conhecimento sobre as mudanças nas propriedades e na qualidade dos plásticos reciclados em diferentes estágios de degradação, mistura e contaminação é uma grande desvantagem no uso de polímeros reciclados (Jorge, 2015).

Vários aditivos e produtos químicos foram usados na produção de plástico durante o tempo em que os foram adotados no setor de construção, vários dos quais são hoje considerados prejudiciais às pessoas e ao meio ambiente. Esses aditivos podem eventualmente contaminar os produtos, podendo ser prejudiciais ou totalmente proibidos. Os efeitos da reciclagem, degradação e composição dos plásticos devem ser considerados antes de reutilizar esses materiais, conforme apresentado na Tabela 6 (Sormunen & Karki, 2019).

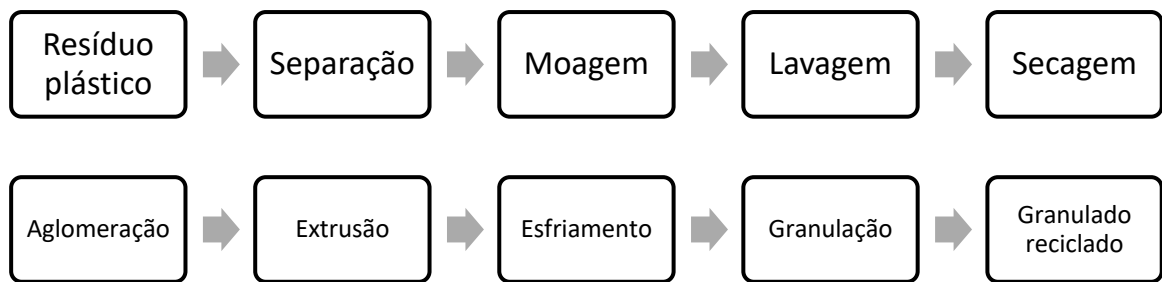
Tabela 6 - Possíveis desvantagens do uso de resíduos poliméricos da construção civil

| Termoplástico | Aditivos Comuns | Desvantagens |
|------------------------|---|---|
| Polietileno | Corantes, retardadores de chama | - Polipropileno e Polietileno possuem densidades semelhantes, dificultando a separação mecânica; - Aumento do índice de fluxo de fusão. |
| Polipropileno | Antioxidantes, corantes, retardadores de chama | - O polipropileno reciclado demonstrou exibir uma maior taxa de cristalização e maior cristalinidade do que o produto virgem, devido à cisão da cadeia no reprocessamento; - Aumento do índice de fluxo de fusão. |
| Poliestireno | Corantes, retardadores de chama | - Os retardadores de fogo podem representar um risco de contaminação do plástico reciclado; - Aumento do índice de fluxo de fusão |
| Poliestireno Expandido | Corantes, retardadores de chama, agentes de expansão | - Devido à baixa densidade dos produtos, os benefícios econômicos de sua reciclagem sofrem devido aos altos custos de transporte; - O poliestireno expandido quebra facilmente durante demolição e emaranhamento com outros resíduos; - O uso de retardadores de fogo representa um risco de contaminando outros plásticos na reciclagem. |
| PVC | Corantes, plastificantes, estabilizantes, retardadores de chama, lubrificantes. | - A reciclagem primária muitas vezes não é possível a partir de resíduos pós-consumo, devido aos aditivos de alta periculosidade no PVC; - Aumento do índice de fluxo de fusão. |

Fonte: Sormunen & Karki (2019).

Frequentemente, o material polimérico de uma usina de reciclagem é uma mistura de homopolímeros. Devido às limitações técnicas das instalações de reciclagem, a estrutura dos produtos compostos por diferentes polímeros torna a separação total desses componentes praticamente impossível (Sormunen & Karki, 2019). A Figura 6 mostra as etapas típicas da reciclagem mecânica do plástico nas usinas de reciclagem.

Figura 6 - Etapas típicas da reciclagem mecânica do plástico



Fonte: Sormunen & Karki (2019).

No primeiro estágio, os resíduos plásticos são fragmentados em tamanhos pequenos para processamento posterior. A lavagem do plástico com água ou a limpeza com ciclone são necessárias para separar a sujeira. Normalmente, os plásticos são misturados e a separação é necessária. Na prática, uma pureza de separação considerável é alcançada empregando a combinação de classificação por espectroscopia no infravermelho próximo com outras tecnologias de classificação de plástico. Os sistemas projetados para extrair plásticos específicos de misturas de plásticos conhecidos têm sido relatados para alcançar rendimentos de mais de 95%. As frações classificadas com 90–95% de pureza são posteriormente atualizadas com polímero puro antes do reprocessamento. Os plásticos polietileno, PS, PP e tereftalato de polietileno são difíceis de separar mecanicamente devido às suas densidades semelhantes. Conseqüentemente, a mistura de plásticos com diferentes qualidades pode ser esperada ao lidar com uma grande variedade de materiais plásticos. Na fase de aglomeração, pigmentos e aditivos são incorporados, após o plástico é cisalhado em fios e peletizado por extrusão (Sormunen & Karki, 2019).

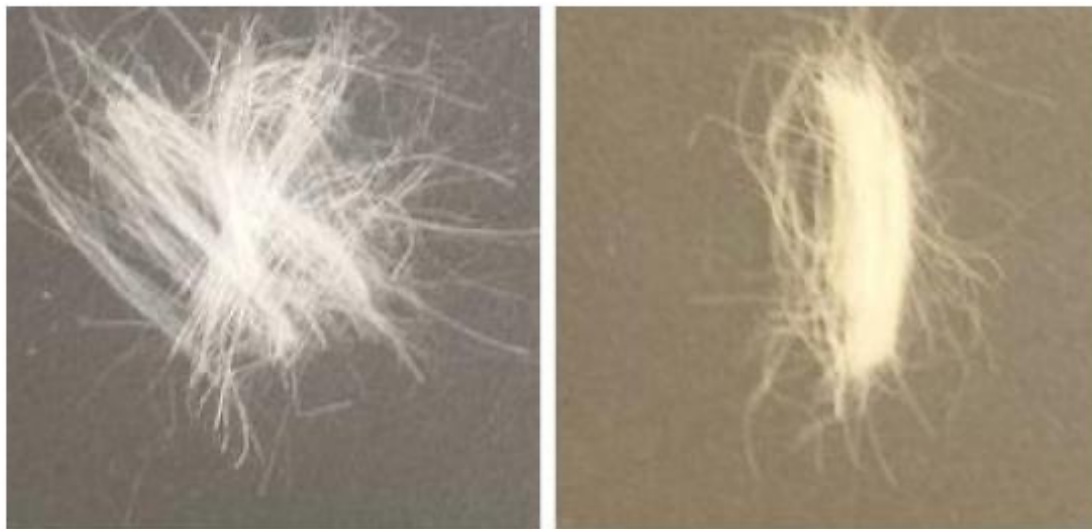
Segundo Najafi (2013), os polímeros são em sua maioria imiscíveis e, portanto, incompatíveis para misturas. Tal imiscibilidade pode afetar significativamente a propriedade mecânica dos polímeros (Turku, 2017). Polímeros reciclados são obtidos de várias fontes e expostos a diferentes condições de armazenamento e reprocessamento. Conseqüentemente, eles podem ter um desempenho diferente dependendo de seus níveis de degradação e mistura (Najafi, 2013). As condições ambientais em uso devem ser consideradas como a radiação UV e o efeito do envelhecimento hidrotérmico nas propriedades mecânicas e de superfície do compósito polimérico (Bajracharya, 2017).

Um fenômeno importante que ocorre em matrizes poliméricas é sua degradação devido às altas temperaturas e absorção de umidade. Isso causa inchaço no polímero e redução em sua temperatura de transição vítrea. A vida útil do material e as condições ambientais causam mudanças físico-químicas na estrutura do polímero. Essas alterações podem causar heterogeneidade estrutural nos polímeros, afetando as propriedades mecânicas e a estabilidade do material. Durante o processamento, os polímeros são expostos à degradação termomecânica, levando a uma diminuição do peso molecular das cadeias poliméricas. Esta cisão da cadeia aumenta o grau de cristalinidade em polímeros semicristalinos, resultando na fragilização progressiva do material reprocessado (Sormunen & Karki, 2019).

3.3.3 Fibras poliméricas

As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal. As fibras de poliméricas podem ser divididas em dois tipos básicos: as microfibras e as macrofibras. As microfibras, por sua vez, podem ser fornecidas em duas formas: monofilamento e fibriladas. As fibriladas apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha das fibriladas promove um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento. As fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão. As macrofibras poliméricas surgiram no mercado internacional nos anos 1990 quando começaram a ser fornecidas em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa. As primeiras aplicações ocorreram para o concreto projetado, especialmente na Austrália e no Canadá. Mais recentemente, vários fabricantes passaram a disponibilizar diferentes tipos de macrofibras no mercado brasileiro (Figueiredo, 2011). A Figura 7 apresenta fibras poliméricas de polietileno (a) e polipropileno (b) utilizadas por Amaral *et al.* (2017) em seus estudos.

Figura 7 - Fibras poliméricas de polietileno (a) e polipropileno (b)



(a)

(b)

Fonte: Amaral *et al.* (2017).

O papel que a fibra irá desempenhar no concreto dependerá de uma série de características da mesma. No entanto, para a classificação básica do material, as propriedades que são mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, pois estas duas propriedades definirão a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto. As fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido, como as de polipropileno e náilon, são tradicionalmente chamadas de fibras de baixo módulo (Figueiredo, 2011). Na Tabela 7 são apresentados alguns valores resistência mecânica e módulo de elasticidade de materiais poliméricos.

Tabela 7 - Resistência mecânica e módulo de elasticidade de fibras poliméricas

| Material | Diâmetro (µm) | Densidade (g/cm ³) | Módulo de elasticidade (GPa) | Resistência à tração (GPa) | Deformação na Ruptura (%) |
|-------------------------|---------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Polipropileno fibrilado | 20-200 | 0,9 | 1-7,7 | 0,5-0,75 | 8,0 |
| Náilon | - | 1,1 | 4,0 | 0,9 | 13-15 |
| Acrílico | 18 | 1,18 | 14-19,5 | 0,4-1,0 | 3 |
| Polietileno | - | 0,95 | 0,3 | 0,7x10 ⁻³ | 10 |
| Matriz de Concreto | - | 2,5 | 10-45 | 3,7x10 ⁻³ | 0,02 |

Fonte: adaptado de Figueiredo (2011).

3.4 Concreto com adição de polímeros

Introduzido inicialmente como material de reparo para concreto de cimento Portland, o concreto polimérico vem apresentando nos últimos 20 anos um significativo incremento do número de aplicações no âmbito da construção, principalmente nos países industrialmente desenvolvidos, embora ainda seja pouco empregado no Brasil. Dessa forma, vários materiais poliméricos vêm sendo aplicados no concreto buscando melhorar sua qualidade e desempenho (Ferreira, 2011). Dentre os principais benefícios da adição de polímeros em concretos, Garcia e Mendes (2014) destacam a cura rápida, boas resistências à compressão e flexão, boa adesão, boa durabilidade em gelo/degelo, boa permeabilidade à água e a agentes agressivos e resistência a ataques químicos.

Segundo Garcia e Mendes (2014), três são os tipos básicos de composições de concreto contendo polímeros: concreto impregnado com polímero (CIP), concreto modificado com polímero (CMP) e concreto polimérico (CP).

3.4.1 Concreto impregnado com polímero (CIP)

O concreto impregnado com polímero é um concreto de cimento Portland hidratado no qual se impregna um monômero, para posterior polimerização. O monômero mais utilizado é o metilmetacrilato. Em geral são feitas aplicações de 1,5 a 2,5%, em peso e espessuras de 6 a 38 mm. O uso deste material faz com que se consiga uma boa durabilidade para as estruturas. A grande vantagem para seu uso é que possui compatibilidade com quase todos os tipos de concreto. Possui boa resistência à abrasão e à penetração, é resistente à ação da água, ácidos e sais. O concreto impregnado de polímero pode ser aplicado em estruturas já existentes para que haja um aumento da durabilidade, redução nos custos com manutenção e na restauração de concreto deteriorado (Garcia & Mendes, 2014).

3.4.2 Concreto modificado com polímero (CMP)

O concreto modificado com polímero é conhecido como uma combinação de cimento, agregados e polímeros orgânicos que são dispersos em água. Esta dispersão é chamada de látex e o polímero orgânico é uma substância composta por inúmeras moléculas simples combinadas em grandes moléculas. O concreto modificado com polímero é adicionado ao concreto para melhorar propriedades como

aderência do reparo ao concreto do substrato, aumentar a flexibilidade e a resistência a impactos, melhorar a resistência à percolação de água e de sais dissolvidos na água (Garcia & Mendes, 2014).

3.4.3 Concreto polimérico (CP)

É um material compósito em que os agregados são unidos junto à matriz com a ajuda de um aglutinante de polímero. Estes compósitos não contêm fase de cimento hidratado, embora o cimento possa ser usado como agregado ou *filler*. O concreto polimérico tem sido feito com uma variedade de resinas e monômeros incluindo poliéster, epóxi, metil-metacrilato e estireno. As propriedades do concreto polimérico são influenciadas pela quantidade e qualidade da resina usada. Mas, em geral, apresentam cura rápida, boas resistências à compressão e flexão, boa aderência, boa durabilidade em gelo/degelo, baixa permeabilidade à água e a agentes agressivos e resistência a ataques químicos (Garcia & Mendes, 2014).

3.4.4 Concreto com fibras poliméricas

Segundo Júnior (2017), a utilização de fibras como adição no concreto tem como principal objetivo reduzir o surgimento de fissuras e diminuir suas aberturas. Esse tipo de reforço ganhou muito interesse na indústria da construção e por parte de pesquisadores a partir da década de 60.

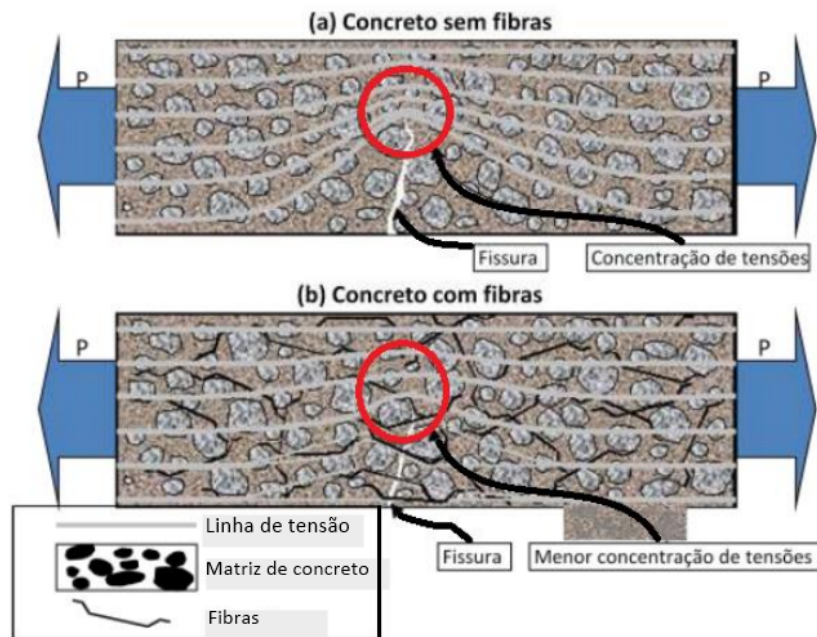
As fibras poliméricas atuam reduzindo a abertura e a propagação destas fissuras. No estado endurecido, ao ser submetido a esforços externos de tração, o concreto fissura. No local de abertura da fissura, a transferência de tensão na matriz é interrompida e ocorre uma concentração de tensões na extremidade da fissura. Caso os esforços de tração aumentem e, conseqüentemente, a concentração de tensões na extremidade da fissura ultrapasse a tensão de resistência oferecida pelo material, a ruptura do mesmo ocorre. Tal ruptura acontece de modo frágil, já que o concreto não apresenta resistência residual à tração pós fissuração (Figueiredo, 2011).

Segundo Gu (2016), o objetivo do uso de fibras poliméricas no concreto é aumentar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto convencional, além de garantir benefícios ambientais. As fibras podem atuar como reforço para substituir as fibras de aço, pois o aço é um material de alto consumo de energia com

um preço relativamente alto e é suscetível à corrosão. As fibras de plástico, por outro lado, são econômicas, têm menor consumo de carbono e são resistentes à corrosão. Além disso, em comparação com as fibras de aço, as fibras de plástico costumam exibir melhor relação resistência-peso e alongamento.

Ao serem adicionadas ao concreto, as fibras poliméricas atuam como ponte de transferência de tensão ao longo das fissuras, dificultando a propagação das mesmas e reduzindo a concentração de tensões em suas extremidades, conforme ilustrado na Figura 8. Desta forma, o concreto deixa de ser um material frágil e se torna um material pseudo-dúctil, possuindo capacidade resistente pós-fissuração (Figueiredo, 2011).

Figura 8 - Concentração de tensões na fissura de concreto sem fibras poliméricas (a) e com fibras poliméricas (b)



Fonte: Leite (2018).

3.5 Aplicabilidade do concreto polimérico

O concreto polimérico apresenta uma vasta gama de aplicações em diferentes ramos da construção civil, sendo o uso pioneiro na substituição do concreto à base de cimento Portland. A pavimentação de pontes e de pisos industriais, estruturas para sistema de drenagem urbana, reforço estrutural, caixas subterrâneas, tanques para tratamento químicos, são alguns exemplos de utilização do concreto polimérico (Castro, 2019).

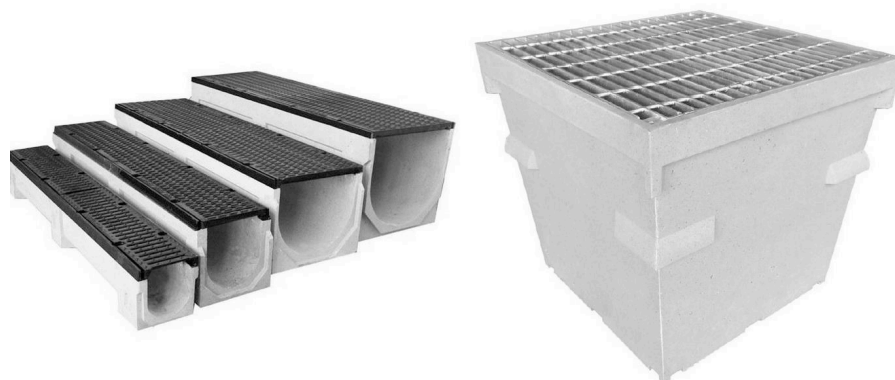
Por ser um material com bom acabamento externo, podendo ter cores e texturas, pode ser utilizado em lajes, painéis para fachadas e balcões para estabelecimentos comerciais (Sakhakarmi, 2017).

Segundo Hong (2017), devido às suas excelentes propriedades, o concreto polimérico tornou-se popular no comércio internacional desde 1950, entretanto, no Brasil ainda não apresenta uma utilização considerável quando comparado com outros países que utilizam o material de forma predominante na construção civil.

Na China, devido à boa propriedade de amortecimento e a alta resistência, o concreto polimérico é utilizado em reparos de rodovias, como exemplo, as estradas de Tailai e Xangai, que foram executadas em concreto convencional e tiveram manutenções feitas por concreto polimérico, em apenas seis horas após os reparos concluídos, as rodovias já estavam liberadas para o tráfego (Castro, 2019).

Na Coreia, além de reparos de rodovias, o concreto polimérico é usado para reforço em pavimentação asfáltica e em pilares e vigas em construções e também para produção de estruturas pré-moldadas em vez do uso do concreto convencional e do aço, por exemplo, em dispositivos de drenagem (Figura 9), como: reservatórios, bueiros, caixas de passagem e tubos; telhas e isolante elétrico dielétrico.

Figura 9 - Dispositivos para sistema de drenagem construídos com concreto polimérico



Fonte: Castro (2019).

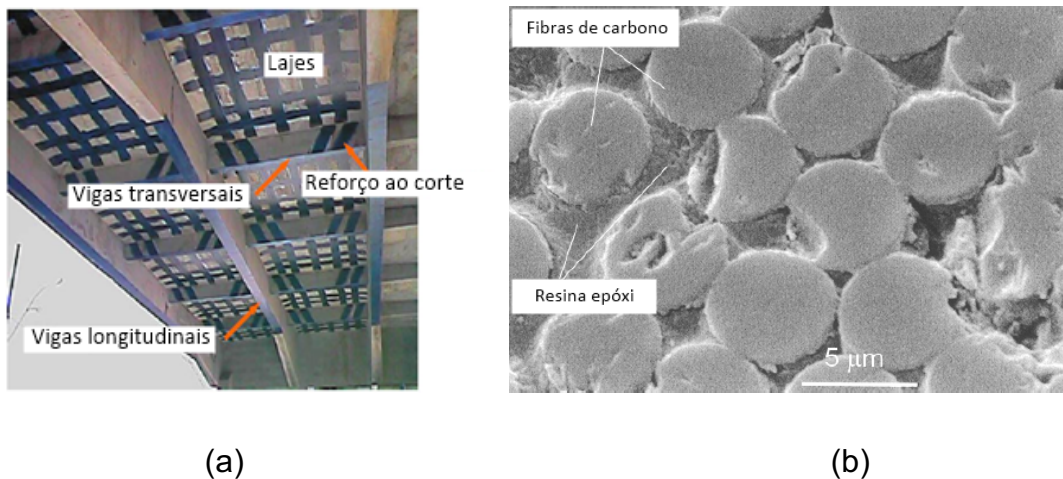
Nos Estados Unidos, o concreto polimérico está sendo usado em indústrias petroquímicas, em pavimentações e pontes. No Japão, o concreto polimérico vem

sendo adotado principalmente em construções subterrâneas para linhas e cabos de telecomunicações, linhas de cabos de energia elétrica e gasodutos (Castro, 2019).

Em relação ao Brasil, o baixo uso do concreto polimérico é decorrente do seu custo final mais elevado, pois o uso de resina em sua composição em detrimento do uso do cimento Portland, aumenta seu valor de mercado. Para Reis (2011) a pouca aplicação deste produto, deve-se ao desconhecimento de algumas propriedades deste material.

Em 1998, em Belo Horizonte, foi realizado o reforço estrutural do Viaduto Santa Tereza utilizando compósito de fibras de carbono com matriz polimérica, sendo a primeira vez que foi utilizado tal material no país (Figura 10 a). Esse compósito pode ser formado por pela matriz polimérica e por fibras de carbono dispostas aleatoriamente ou em direções definidas (Figura 10 b). A matriz polimérica serve como meio e transferência e distribuição de tensões entre as fibras de carbono, protege de agressões exteriores e impede os deslocamentos horizontais e transversais das fibras (Machado, 2009).

Figura 10 - Reforço estrutural com compósito de fibras de carbono com matriz polimérica



Fonte: Machado (2009).

4. METODOLOGIA

O estudo proposto e realizado caracterizou-se como uma abordagem qualitativa sobre o uso de materiais poliméricos no concreto. Buscou-se avaliar os trabalhos do estado da arte por meio de um levantamento bibliográfico sistemático, onde foram contemplados os fatores de influência da adição de diferentes tipos de materiais poliméricos em concreto, dentre eles, as propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Neste cenário, a metodologia aplicada a este trabalho compreendeu compilar e analisar resultados de pesquisas desenvolvidas sobre o tema por meio de publicações de periódicos nacionais e internacionais, livros e demais meios de informação de grande relevância e impacto no meio acadêmico.

Desse modo, por meio da metodologia estabelecida foi-se capaz promover a devida discussão referente ao objeto de estudo proposto no presente trabalho, buscando a análise das informações coletadas com o intuito de apresentar informações inovadoras para o desenvolvimento de novos estudos.

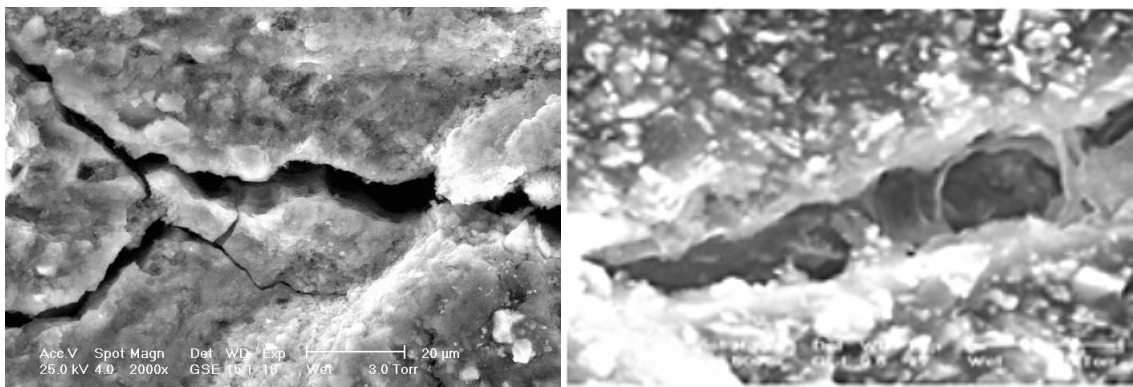
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de avaliar a eficiência dos materiais poliméricos no concreto, no que diz respeito à resistência e aumento da durabilidade, várias técnicas podem ser aplicadas.

Ao compararem o concreto convencional com o polimérico, Hosseinali e Shirkhorshidi (2016) concluíram que o concreto polimérico oferece vantagens, como maior resistência à compressão, melhor resistência química e melhor tenacidade à fratura. Os autores ainda mencionaram que a adição dos polímeros não provocava uma impermeabilização completa do concreto. Este fator torna-se importante, pois permite que a água evaporável (água capilar e parte da água adsorvida) possa ser extraída do concreto (em forma de vapor), em casos de elevação da temperatura.

A Figura 11 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura do concreto convencional (a) e polimérico, onde é possível observar os efeitos da adição do polímero no cobrimento das fissuras do concreto (b).

Figura 11 - Microscopia do concreto convencional (a) e do concreto polimérico (b)



(a)

(b)

Fonte: Czarnecki & Schorn (2007).

5.1 Propriedades mecânicas do concreto contendo materiais poliméricos

5.1.1 Resistência à compressão

As principais propriedades mecânicas do concreto consideradas no projeto estrutural são a resistência e o módulo de elasticidade. No caso do concreto com

polímeros, a resistência residual também se torna um parâmetro diferencial, devendo ser avaliada. Os polímeros atuam minimizando a propagação de fissuras. Espera-se que o concreto reforçado com polímeros tenha uma maior durabilidade e resistência à abrasão em relação ao convencional. O peso específico do concreto não é, em geral, modificado com a adição dos polímeros, podendo haver uma redução da trabalhabilidade da mistura no estado fresco. Para compensar essa perda de trabalhabilidade, são utilizados aditivos superplastificantes, quando necessário (Leite, 2018).

As propriedades mecânicas do concreto são modificadas quando polímeros são adicionados à mistura. No entanto, as propriedades elásticas e a resistência à compressão não são alteradas significativamente, desde que sejam utilizados baixos teores de polímeros (Leite, 2018). Ainda segundo o autor, a partir do volume de 1% de polímeros adicionados, o valor da resistência à compressão do concreto começa a modificar-se e que há uma tendência de se reduzir a resistência à compressão do concreto com o incremento de polímeros, já que há uma redução do abatimento e da compactação do compósito. No entanto, é possível modificar a trabalhabilidade da mistura com polímeros utilizando aditivo superplastificante, o que gera também uma melhoria da resistência no concreto. O teor de ar incorporado na mistura devido à perda de abatimento ou durante a incorporação de polímeros também pode contribuir para que haja uma menor resistência à compressão do concreto.

5.1.2 Resistência à tração

Ensaio de resistência à tração na flexão em amostras de concreto reforçado com polipropileno foram estudados por Leite (2018). Enquanto em amostras de concreto com agregado graúdo de dimensão máxima característica igual a 19 mm e com maior teor de finos foi observado um aumento da resistência à tração com o incremento do teor de polímeros, nas amostras com agregado graúdo de dimensão máxima característica igual a 9,5 mm e com menor teor de finos houve redução da resistência à tração com a adição de polímeros. Desta forma, não se pode prever o comportamento dos polímeros na resistência à tração do concreto, já que, em algumas misturas, tais materiais aumentam a resistência, enquanto em outras diminui. Por começarem a atuar a partir do instante em que a matriz cimentícia fatura, os

polímeros devem exercer pouca influência na resistência à tração do concreto, afetando em maior grau o comportamento não-linear do compósito.

5.1.3 Tenacidade

Diferente do concreto convencional, cuja ruptura acontece logo após o início da primeira fissura, o reforçado com polímeros apresenta resistência pós-fissuração e tenacidade significativas (Mehta & Monteiro, 2014).

Alguns aspectos que afetam a variabilidade da tenacidade do concreto reforçado com polímeros são o teor de polímeros adicionado, o volume de concreto produzido e a trabalhabilidade da mistura. Leite (2018) observou que amostras com maior teor de polímeros e retiradas de um maior volume de concreto apresentaram uma menor variabilidade dos resultados quando comparadas às amostras com baixos teores de polímeros e coletadas de um volume menor de concreto. Isto indica que um maior teor de polímeros e um maior volume de concreto melhoram a homogeneidade da mistura. Segundo Moutonnet *et al.* (2011), uma alta trabalhabilidade também melhora a uniformidade da mistura.

5.2 Propriedades do concreto com adição de fibras poliméricas

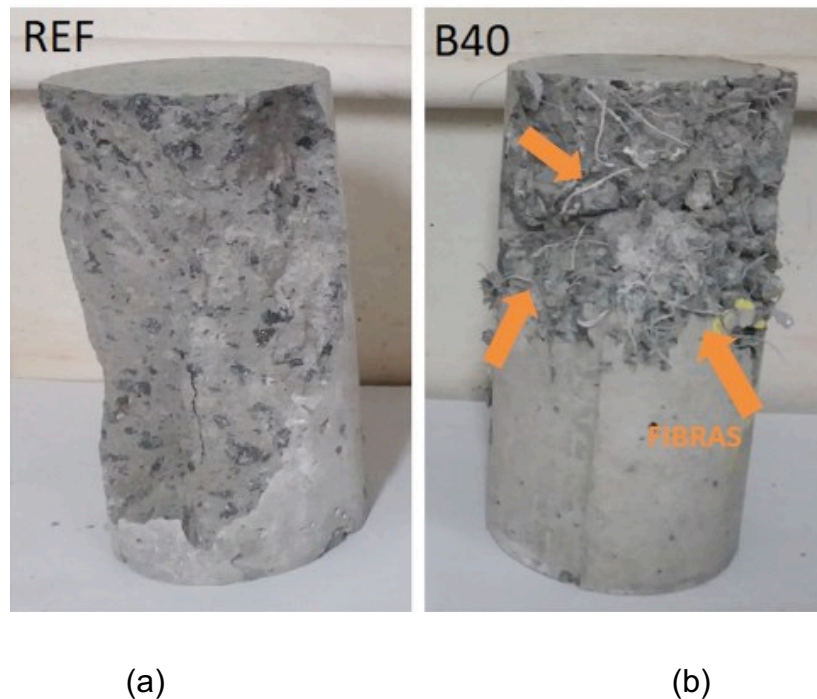
5.2.1 Resistência à compressão

Nos estudos realizados por Amaral *et al.* (2017), o concreto com adição de fibras de PP apresentou 26,0 MPa para resistência à compressão, enquanto o sem fibras a resistência foi de 25,1 MPa, havendo um aumento de 3,6% na resistência a compressão na comparação. Essas variações são pequenas e pouco significativas, apontando para o fato de que a adição de fibras poliméricas no teor de 1% não afeta a resistência à compressão do concreto.

Nos ensaios realizados por Rostami *et al.* (2020), a adição de fibras poliméricas ao concreto aumentou a resistência à compressão em pelo menos 5%. Nesta pesquisa, o empolamento da fibra não ocorreu devido à dispersão adequada e emprego de fibras hidrofílicas, portanto, nenhuma redução na resistência à compressão foi observada.

Krause (2021) analisou as propriedades de um concreto autoadensável reforçado com fibras de polipropileno. Enquanto o concreto de referência se rompeu em várias partes (a), o corpo de prova do concreto reforçado com fibras de polipropileno se manteve praticamente íntegro após a ruptura à compressão (b) (Figura 12).

Figura 12 - Seção de corpo de prova rompido à compressão



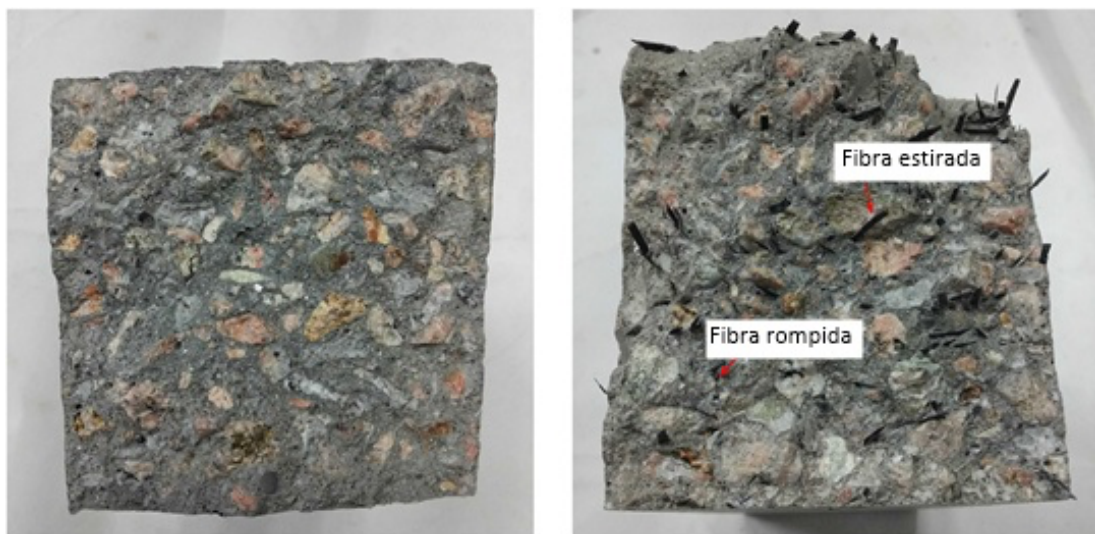
Fonte: Krause (2021).

5.2.2 Resistência à tração

Nos ensaios realizados por Rostami *et al.* (2020), a alta adesão da matriz de fibras poliméricas nas interfaces do concreto fez com que as fibras resistissem às forças de tração exercidas sobre o concreto. As fibras evitam a formação e propagação de fissuras no concreto armado, observando assim o aumento da resistência do concreto à tração aplicada. A adição de fibras ao concreto levou a um aumento mínimo de 25% na resistência à tração à ruptura. Além disso, os autores perceberam que a distribuição uniforme das fibras no concreto, resulta no aumento da tensão exercida nas fibras. Isso, por sua vez, leva a um aumento significativo da resistência à tração do concreto.

Ensaio realizado por Xiong *et al.* (2021) analisaram as superfícies de fratura de concreto com adição de 1,5% de fibras poliméricas sob carga de flexão. As fibras foram distribuídas uniformemente na superfície da fratura. Especificamente, enquanto algumas foram rompidas, como mostrado na Figura 13, o que indica que as fibras poliméricas desempenharam um papel crítico na restrição do desenvolvimento de trincas durante o processo de carregamento.

Figura 13 - Superfície de fratura de concreto convencional (a) comparada com a de concreto com adição de fibras poliméricas (b)



Fonte: Xiong *et al.* (2021).

Amaral *et al.* (2017) concluíram que o concreto com adição de fibras de PP apresentou uma resistência à tração média de 4,47 MPa, 9,3% maior em relação ao concreto convencional, enquanto que o concreto com adição de fibras de polietileno de alto módulo apresentou 4,38 MPa de resistência à tração, 7,1 % maior do que o concreto sem fibras. As fibras atuaram como reforço na matriz frágil desse material, reduzindo as tensões internas e garantindo assim um melhor desempenho em relação à resistência à tração.

5.2.3 Tenacidade

Amaral *et al.* (2017) analisaram a ductilidade de pilares de alta resistência reforçado com variados teores de fibras metálicas e de fibras de polipropileno. Foi observado que quanto maior o teor de fibra adicionado, maior a ductilidade do compósito. O valor da resistência média à compressão sofreu pouca alteração com a

adição de fibras. Já o índice de tenacidade e a resistência média à tração foram maiores com o aumento do teor de fibras adicionado. Ao se comparar resultados de concretos reforçados com iguais teores de fibras de aço e de macrofibras poliméricas, verificou-se um maior índice de tenacidade no concreto contendo fibras de aço, devido à maior rigidez destas fibras.

A tenacidade dos concretos reforçados com fibras poliméricas apresentou um aumento significativo em relação ao concreto convencional. O concreto com fibras de polipropileno apresentou 22,27 kN.mm de tenacidade, 16,3% maior do que a tenacidade encontrada para o concreto sem adição de fibras.

O módulo de elasticidade do concreto com adição de fibras de PP não sofreu alteração significativa em relação ao módulo do convencional. No concreto com adição de fibras de polietileno, o módulo de elasticidade foi 24,9 GPa, 7,3% maior do que no convencional, enquanto o concreto com fibras de PP obteve 22,3 GPa, o que significa uma redução de 3,9% em relação ao sem fibras.

Gu (2016) relata ainda que as fibras poliméricas podem atuar como reforço para substituir as fibras de aço, pois liga metálica é um material consumidor de energia com um preço relativamente alto, e é suscetível à corrosão. As fibras de polímero, por outro lado, têm custos vantajosos, menor emissão de carbono e são resistentes à corrosão. Além disso, em comparação com as fibras de aço, as poliméricas muitas vezes apresentam melhor relação resistência para peso e alongamento.

5.3 Propriedades relacionadas à durabilidade de concreto contendo materiais poliméricos

5.3.1 Absorção de água

Gu (2016) constatou em seus estudos que aumentar a taxa de substituição da areia natural por materiais poliméricos aumenta a absorção de água, isso ocorria porque os agregados poliméricos e naturais não se misturavam suficientemente na matriz de concreto e, portanto, a argamassa resultante tornou-se porosa.

Saikia e Brito (2013) relataram um aumento na capacidade de absorção de água de corpos de prova de concreto com polímeros. Foi relatado que os materiais de

maiores frações de PET causaram maior aumento na capacidade de absorção de água do que os mais finos.

Fraj *et al.* (2010) mencionaram aumentos acima 60% na porosidade do concreto contendo espuma poliuretano com diferentes proporções de mistura.

5.3.2 Penetração de íons cloreto

A migração de cloreto no concreto polimérico é influenciada pela absorção de água, porosidade e permeabilidade à água do concreto, pois uma estrutura mais aberta resulta em maior penetração de íons cloreto. Gu (2016) relatou que a permeabilidade aos cloretos do concreto contendo materiais poliméricos foi maior do que a do concreto convencional. Além disso, os corpos-de-prova de concreto curados em ambiente de laboratório tiveram a maior penetração de íons cloreto, seguidos pelos corpos-de-prova curados em ambiente externo e, por fim, os curados em câmara úmida.

Fraj *et al.* (2010) também relataram aumentos acima de 44% no coeficiente de cloreto efetivo do concreto contendo 100% de espuma poliuretano com diferentes proporções de mistura.

Ao adicionar poliéster no concreto, Jamshidi & Pourkhorshidi (2015) concluíram nos ensaios realizados com idades de 28 e 90 dias que a carga total de íons de cloreto passada foi de 0% para os corpos de prova ensaiados. Tendo em mente o fato de que os índices de íons de cloreto passados para o concreto convencional geralmente é significativamente alto, este resultado mostra que o concreto polimérico é resistente ematerial de proteção adequado para o ataque de cloreto (por exemplo, corrosão pela água do mar).

5.3.3 Carbonatação

A carbonatação do concreto polimérico também é influenciada pela absorção de água, porosidade e permeabilidade. Gu (2016) relatou que a profundidade de carbonatação do concreto leve contendo 100% de fibras PET foi menor do que aquela contendo agregados finos de PET e areia, e a incorporação de escória no cimento aumentou significativamente a profundidade de carbonatação.

Silva *et al.* (2013) também estudaram a profundidade de carbonatação do concreto contendo fibras PET em um ambiente externo, de laboratório em câmara úmida. O aumento da profundidade de carbonatação do concreto polimérico foi superior ao do concreto convencional. Isso acontecia porque o PET e os agregados naturais não se misturavam suficientemente no concreto, resultando em maior porosidade. Além disso, as profundidades de carbonatação foram maiores em corpos-de-prova curados em ambiente de laboratório, enquanto aqueles curados em câmara úmida apresentaram os menores valores. Isso ocorre porque o grau de preenchimento parcial dos poros com água na câmara úmida é maior, o que leva a menos poros "abertos" para a entrada de dióxido de carbono e, portanto, carbonatação mais lenta.

5.3.4 Contração por secagem

A contração por secagem é outra propriedade importante do concreto contendo polímeros. Nos estudos realizados por Gu (2016), o concreto com adição de resíduos plásticos em substituição aos agregados naturais apresentou maior retração por secagem do que o concreto convencional. Isso ocorre devido à baixa rigidez dos plásticos, como resultado, fornece resistência muito baixa ao encolhimento da pasta de cimento.

Por outro lado, Silva *et al.* (2013) relataram que a retração à secagem do concreto contendo fibras PET foi menor do que a do concreto convencional. Esta observação foi atribuída ao fato de que a quantidade de água absorvida pelos agregados foi menor devido à natureza impermeável material polimérico; como resultado, mais água livre estava disponível para hidratar o cimento, levando a menores valores de retração.

5.4 Propriedades termo físicas

Nas investigações realizadas por Gu (2016), ao adicionar fibras de PET no concreto, houve notável redução na transmitância térmica do concreto convencional resultando em uma melhoria de 10,27%, 17,11% e 17,16%, no desempenho do isolamento quando comparado ao concreto convencional.

Wang *et al.* (2018) relataram que a condutividade térmica do concreto poliestireno diminuiu para 87%, 69% e 44% daquela da argamassa normal quando o índice material polimérico era de 10%, 20% e 50%, respectivamente. Isso foi atribuído

ao fato de que a condutividade térmica do poliestireno era menor do que a da areia natural, e que a argamassa feita com poliestireno tinha densidade aparente mais baixa.

Fraternali *et al.* (2014) relataram que a condutividade térmica do concreto contendo fibras PET e PP com fração volumétrica de 1% diminuiu 18% e 21,8%, respectivamente, em relação ao concreto convencional.

5.5 Resistência ao fogo

Gu (2016) estudou a resistência à flexão do concreto contendo fibras PET por meio de um ensaio de carregamento de três pontos conduzido em um forno nas temperaturas de 200, 400 e 600° C. Não havendo alterações perceptíveis nas temperaturas avaliadas. O processo de degradação do PET foi substituído pela formação de produtos gasosos que ocasionaram a formação de orifícios nos corpos de prova, diminuindo sua resistência à flexão. Outros estudos apresentados pelo mesmo autor relataram a resistência à compressão residual do concreto contendo fibras de PP após o aquecimento dos corpos de prova em um forno a 850 °C por 40 min. Os resultados mostraram que o concreto convencional sofreu uma severa falha por estilhaçamento e, portanto, não apresentou resistência à compressão residual após o ensaio de resistência ao fogo. Por outro lado, não ocorreu fragmentação em corpos de prova de concreto contendo 0,05–0,1% de fibras de PP, e o PP manteve 70% de sua resistência à compressão residual após o teste de resistência ao fogo. Além disso, conforme o teor de fibra de PP aumentou, a resistência à compressão residual também apresentou um ligeiro aumento. A redução de peso dos corpos de prova de PP após o processo de aquecimento foi inferior a 10%, enquanto a do concreto convencional foi de até 60% devido à falha por estilhaçamento. Desse modo, pontes de fibras poliméricas podem suportar a matriz de concreto e evitar que o concreto sofra falha por fragmentação causada pela alta pressão de vapor gerada em altas temperaturas. Enquanto isso, as fibras de PP têm um alto ponto de fusão, ou seja, aproximadamente 165°C, e a pressão de vapor é aliviada quando a temperatura atinge esse valor.

6. CONCLUSÃO

Nas últimas duas décadas, pesquisadores buscam compreender o comportamento do concreto contendo materiais poliméricos. Este estudo apresentou uma revisão crítica e sistemática de diversos trabalhos sobre o tema. O uso de materiais poliméricos no concreto, bem como as principais propriedades, foram discutidos. Com base neste estudo de revisão, as seguintes conclusões podem ser sintetizadas a seguir:

- Quanto às propriedades mecânicas do concreto polimérico, os resultados foram satisfatórios tanto nos ensaios de resistência à compressão quanto à tração, de forma que o concreto com adição de polímeros apresentou melhores valores de carga de ruptura nos ensaios realizados;
- Quanto às propriedades relacionadas à durabilidade do concreto à agentes internos e externos, observou-se que o concreto polimérico apresentou melhor absorção de água durante seu processo de cura, devido à sua maior porosidade. Já após a cura do concreto observou-se uma maior permeabilidade à água e a possíveis agentes agressivos;
- Quanto às propriedades termo físicas, o concreto com adição de polímeros apresentou ótimo desempenho, devido ao fato de a condutibilidade de calor dos polímeros serem bem menores do que as dos agregados utilizados no concreto convencional. O mesmo aconteceu nos ensaios realizados para comparar a resistência ao fogo do concreto polimérico ao concreto convencional.

A adição de polímeros ao concreto traz benefícios quanto à melhoria do processo de cura do concreto devido à sua melhor absorção de água, melhora as resistências à compressão e à tração quando comparado ao concreto convencional, além de tornar o material mais impermeável a possíveis agentes agressivos, podendo ser utilizados em estações de tratamento de água e esgoto, ambientes industriais agressivos e marítimos.

Ao adicionar fibras poliméricas ao concreto, observou-se também uma melhor absorção de água durante o processo de cura e maiores resistências à compressão e à tração quando comparado ao convencional. As fibras atuam no concreto distribuindo

melhor a concentração de tensões quando submetidos a cargas de tração e compressão, podendo ser utilizados principalmente em elementos estruturais.

Diante do conteúdo analisado foi possível constatar que a utilização de materiais poliméricos na composição de concreto possibilita melhorias significativas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas se comparado ao convencional, podendo ser aplicado em diversas condições na construção civil.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se avaliar de forma experimental da aplicabilidade de materiais poliméricos em concretos, como o concreto celular, o protendido e o leve. E ainda, a avaliação experimental da influência da incorporação de materiais pozolânicos e resíduos industriais nas propriedades do concreto polimérico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Propriedades do Concreto Fresco**. 34p. 2016.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2018**. São Paulo, 64p., 2019.

ABRIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil 2019**. São Paulo, SP. 2019.

ALLWOOD, Julian M.; CULLEN, Jonathan M. **Sustainable Materials with Both Eyes Open**. Cambridge: Uit Cambridge, 2012.

AMARAL, J. C. Jr. **Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto**. Escola de Engenharia, Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG). Belo Horizonte, MG. 2017.

ANDRADE, M. F. **Comparativa de la Tenacidad entre Hormigón convencional, Hormigón reforzado con Fibras de Acero y Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno**. 2013. 66 f. Thesis (Máster en Ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.

BAJRACHARVA, R.M.; MANALO, A.C.; KARUNASENA, W.; LAU, K. **Durability characteristics and property prediction of glass fiber reinforced mixed plastics composites**, Compos. B Eng. 116p. 2017.

BRASIL. **Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento**. Relatório Anual 2017. Brasília, 2018. 33 p.

BRITO, J. & SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. Green Energy and Technology, Springer-Verlag, London. 2013.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. LTC Editora. 10ª edição. 2020.

CANEVAROLO, S. V. Jr. **Ciência dos Polímeros**. Artliber Editora. 3ª edição. 2010.

CASTRO, M. R. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto Polimérico Produzido com Resina Reciclada de PET e com E-Plastic como parte do Agregado**. Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG). Belo Horizonte, MG. 2019.

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **CBIC apresenta balanço do setor da construção em 2020 e perspectivas para 2021**. 2020.

COSTA, B. S. L. M. **Um Estudo sobre a Sustentabilidade**. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2019. 71 p.

CZARNECKI, L. **Sustainable Concrete; Is Nanotechnology the Future of Concrete Polymer Composites?**. Warsaw University of Technology, Al. Armii Ludowej. 2007.

DORNELAS, L. R. **Aplicação dos Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Graúdo e Material Cimentício Suplementar**. Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, MG. 45p. 2019.

FERREIRA, O. P. **Concretos Polímeros**. Programa da Palestra Sobre Concretos Especiais – Polímeros. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo (USP). São Carlos, SP. 2011.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo (USP). 2011.

FOTI, Dora. **Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete**. Department of Civil Engineering Sciences and Architecture, Polytechnic University of Bari, Bari, Italy. 24p. 2019.

FRAJ, A. B., KISMI, M., MOUNANGA, P. **Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete**. Constr. Build. Mater. 24, 1069–1077. 2010.

FRATERNALI, F., SPADEA, S., BERARDI, V.P. **Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes**. Constr. Build. Mater. 61, 293–302. 2014.

FREITAS, R. P. **Controle de Qualidade em Concreto Endurecido: Ensaio Mecânicos**. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

GARCIA, F. A. M. & MENDES, I. T. D. O. **Avaliação da Viabilidade de Utilização do Concreto Polimérico em Substituição ao Concreto Convencional**. União das Faculdades dos Grandes Lagos (UNILAGO). São José do Rio Preto, SP. 2014.

GASQUES, A. C. F. et al. **Impactos Ambientais dos Materiais da Construção Civil: Breve Revisão Teórica**. Revista Tecnológica, v. 23, p. 13–24. 2014.

GONÇALVES, G. R. & GODINHO, D. S. S. **Análise da Influência da Água de Amassamento Contaminada por Elementos Químicos Oriundos de Mineração de Carvão nas Propriedades do Concreto**. Escola de Engenharia, Centro Universitário do Espírito Santo (UNESC). Espírito Santo, 2017.

GU, L. **Use of recycled plastics in concrete: A critical review**. School of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Adelaide, Australia. 2016.

HAMEED A. M.; HAMZA, M. T. **Recycling the construction and demolition waste to produce polymer concrete**. Sciences Department, University of Technology, Iraq, Baghdad. 7p. 2019.

HONG, S. Influence of Curing Conditions on the Strength Properties of Polysulfide Polymer Concrete. College of Engineering, Sungkyunkwan University, Natural Sciences Campus. Seoul, Coreia do Sul. 2017.

HOSSEINALI, M., SHIRKHORSHIDI, S. M. **Experimental Study and Constitutive Modeling of Polymer Concrete's Behavior in Compression**. Sharif University of Technology, Department of Civil Engineering. Arabic. 2016.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, SP. Publicado em 2011.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, SP. Volume: 10, Número: 1, publicado em 2017.

JAMSHIDI, M. & POURKHORSHIDI, A. R. **A Comparative Study On Physical/Mechanical Properties Of Polymer Concrete And Portland Cement Concrete**. Building and Housing Research Center, P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran. 2015.

JORGE, L. M. **A cadeia de reciclagem do plástico pós-consumo na Região Metropolitana de Porto Alegre**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS). Porto Alegre, RS. 2015.

JÚNIOR, J. C. A. **Análise Experimental da Adição de Fibras Poliméricas nas Propriedades Mecânicas do Concreto**. Revista Matéria. V22. N.01, Departamento de Engenharia dos materiais- POSMAT/CEFET- MG, Minas Gerais - MG, 2017.

KOPER, A; KOPER, W; KOPER, M. **Influence of Raw Concrete Material Quality on Selected Properties of Recycled Concrete Aggregates**. Procedia Engineering, v. 172, p. 536–543, 2017.

KRAUSE, V. R. **Estudo da Influência das Fibras de Aço e Polipropileno nas Propriedades do Concreto Autoadensável**. Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, SC. 2021.

LEITE, A. M. **Avaliação do Uso da Microfibra Polimérica na Composição de Concreto para Fins Estruturais**. Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 259p. 2018.

LEITE, I. C. A. et al. **Gestão de Resíduos na Construção Civil: um Estudo em Belo Horizonte e Região Metropolitana**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil. 17p. 2017.

LEÓN, L. P. **Pandemia intensifica problema do descarte de plásticos**. Empresa Brasil de Comunicação (EBC). 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3j0jWS7>. Acesso em: 02 de jul. de 2021.

MACHADO, A. P. **Sistemas Compostos para o Reforço de Pontes**. 14º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Belo Horizonte, MG. 2009.

MEDEIROS, V. B. R. et al. Concreto sustentável produzido com resíduo de porcelanato: análise de durabilidade por carbonatação. Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 21, n. 38, p. 17-24, 2018.

MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MONTAIGNAC, R. et al. **Desing of SFRC structural elements: post-cracking tensile strength measurement**. Materials and Structures, Netherlands, v.45, n.4, p.609-622. 2012.

NAJAFI, S. K. **Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review**. Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University, Iran. 2013. 8 p.

NBR 15.900-1: Água par amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

NBR 7.211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

NBR15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

NEVILLE, A. M. & BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Editora Bookman. 3ª edição. 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Editora Bookman. 6ª edição. 2016.

PIMENTEL, L. L. et al. Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. IBRACON Structures and Materials Journal, São Paulo, v. 13, n. 6, 2020.

REIS, J. M. L. **Effect of aging on the fracture mechanics of unsaturated polyester based on recycled PET polymer concrete**. Materials Science And Engineering: A, [S. l.], v. 528, n. 6, p.3007-3009, mar. 2011.

ROSTAMI, R. et al. **An investigation into influence of physical and chemical surface modification of macro-polypropylene fibers on properties of cementitious composites**. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran. 2020.

- SAKHAKARMI, S. **Cost Comparison of Cement Concrete and Polymer Concrete Manholes in Sewer Systems**. *UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones*. 2017.
- SANTOS, F. S. et al. **Avaliação de concreto sustentável contendo teores de resíduos de agregados reciclados**. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 45457-45471, jul. 2020.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. Pearson Universities. 6ª edição. 2021.
- SILVA, R. B.; RODRIGUES, E. C. C.; ZAU, F. G.; TRINDADE, G. P. **Panorama do projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil (PGRCC)** – estudo de caso na construção do centro administrativo do distrito federal (CADF). In: IV SINVEP Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. Anais do IV SINGEP – São Paulo – SP – Brasil – 08, 09 e 10 de novembro de 2015.
- SILVA, R., BRITO, J., SAIKIA, N. **Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates**. *Cement Concr. Compos.* 35, 23–31. 2013.
- SINDUSCON-SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil**. São Paulo, 2015. 149p. Disponível em <https://bit.ly/39iPDkC>. Acesso em 05 de jan. de 2021.
- SORMUNEN, P.; KARKI, T. **Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing**. University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Fiber Composite Laboratory, Lappeenranta, Finland. 2019. 14 p.
- TURKU, I.; KARKI, T.; RINNE, K.; PUURTINEM, A. **Characterization of plastic blends made from mixed plastics waste of different sources**, *Waste Manag. Res.* 2017.
- VEDOVELLO, M. P. & CASANOVA, A. S. V. **Estudo da Despolimerização do Poli (Tereftalato de Etileno) dia Hidrólise Alcalina**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 04, Ed. 08, Vol. 02, pp. 181-214. Agosto de 2019.
- WANG, J.; WU, H.; DUAN, H.; ZILLANTE, G.; ZUO, J.; YUAN, H. Combining life cycle assessment and building information modelling to account for carbon emission of building demolition waste: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3154-3166, 2018.
- XIONG, C. et al. **Sustainable use of recycled carbon fiber reinforced polymer and crumb rubber in concrete: mechanical properties and ecological evaluation**. Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China. 2021.