

MATERIAIS UTILIZADOS EM REFORÇOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: MAPEAMENTO LITERÁRIO

Materials used in strengthening of concrete structures: Literary Mapping

Ágatha Julie Farias Polveiro ¹, Erika Severino de Miranda ², Jéssica de Moura e Silva ³, Edgar Bacarji ⁴



PALAVRAS CHAVE:

Reforço;
Concreto;
Estruturas;
Compósitos;
Mapeamento literário.

KEYWORDS:

Strengthening;
Concrete;
Structures;
Composites;
Literary Mapping.

RESUMO: Embora possuam alta resistência mecânica, as estruturas de concreto armado estão sujeitas a falhas que podem reduzir sua durabilidade e/ou inviabilizar o seu uso, seja por mudanças de utilização ou erros executivos. Assim, foram desenvolvidos ao longo dos anos variados materiais e métodos de reparos e reforços estruturais eficientes para tal finalidade. Logo, este estudo tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento do estado da arte, evidenciando a relevância do assunto na atualidade identificando lacunas de conhecimento e apresentando como se deu o desenvolvimento do tema ao longo dos anos. Para tanto, foi realizado um mapeamento literário sobre o tema. Elaborou-se uma *string* de busca para filtrar artigos relacionados ao assunto no portal de periódicos da CAPES, sendo selecionados artigos de periódicos para análise. Foi realizada uma análise bibliométrica e qualitativa de modo a servir como parâmetro para pesquisadores no aprofundamento de estudos na linha de materiais para reforços de estruturas de concreto. Concluiu-se que dentre os vários materiais promissores para o uso em reforço de estruturas de concreto, nota-se a relevância dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) e os compósitos cimentícios. Ambos se destacaram no mapeamento literário como os grupos com mais artigos publicados, predominando no meio científico e, portanto, com maior potencial de aplicabilidade no mercado.

ABSTRACT: *Although they have high mechanical resistance, reinforced concrete structures are subject to failures that can reduce their durability or make their use unfeasible, either due to changes in use or executive errors. Thus, over the years, various materials and methods of repairs and efficient structural strengthening have been developed for this purpose. This study aims to demonstrate the development of the state of the art, highlighting the relevance of the topic in the present, identifying knowledge gaps and presenting how the theme has developed over the years. For that, a literary mapping on the subject was carried out. A search string was elaborated to filter articles related to the subject in the CAPES journal portal, and journal articles were selected for analysis. A bibliometric and qualitative analysis was carried out, to serve as a parameter for researchers, in the deepening of studies in the line of materials for strengthening of reinforced concrete structures. It was concluded that, among the various promising materials for use in strengthening reinforced concrete structures, the relevance of Fiber Reinforced Polymers (FRP) and cementitious composites can be noted. Both stood out in the literary mapping as the groups with the most published articles, predominating in the scientific environment and, therefore, with greater potential for applicability in the market.*

* Contato com os autores:

Publicado em 12 de maio de 2023

¹e-mail: engenheiracivil13@gmail.com (A. J. F. Polveiro)

Engenheira Civil, Especialista, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG)

²e-mail : erikamirandaeng@gmail.com (E. S. Miranda)

Engenheira Civil, Especialista, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG)

³e-mail: jessicamosilva@gmail.com (J. M. Silva)

Engenheira Civil, Especialista, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG)

⁴e-mail: edgar@ufg.br (E. Bacarji)

Professor, Doutor, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG)

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado foi uma das maiores descobertas da engenharia, haja vista suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade. Embora sejam resistentes aos esforços mecânicos, suas estruturas não são perenes. Isso porque a falta de manutenções, falhas executivas e de dimensionamento, bem como mudanças no uso da edificação, implicam em perda de desempenho, deixando a estrutura suscetível a colapsos (Paliga et al., 2019). Por essa razão, diversas técnicas e materiais têm sido utilizados para reforçar estruturas, a fim de devolver a sua estabilidade estrutural e aumentar a sua capacidade resistente.

Conceitualmente, reforço estrutural é a intervenção realizada em uma estrutura já existente que sofre de efeitos patológicos ou ainda quando há uma mudança no uso, de modo a aumentar a sua capacidade de resistir aos esforços, antes de atingir o seu estado limite de ruptura (Adorno, Dias e Silveira, 2015). Quando a intervenção não implica em aumento da capacidade portante, denomina-se recuperação ou reparo estrutural.

Em vista disso, observou-se o surgimento de estudos acerca dos materiais viáveis para reforço de estruturas os quais buscam desenvolver estruturas mais resistentes aos esforços, melhorar suas características de ductilidade, impermeabilidade e módulo de elasticidade. Nesse sentido, Souza e Ripper (1998) apresentam como sendo os principais tipos de materiais utilizados no reforço estrutural os concretos, argamassas, compósitos cimentícios, perfis e chapas de aço, polímeros reforçados com fibras, protensão exterior, dentre outros.

Neste contexto, o reforço por meio da colagem ou chumbamento de perfis e chapas metálicas com ajuda de resinas injetadas representam uma opção satisfatória, visto que se trata de uma técnica simples e rápida que de modo geral depende da boa ligação entre os perfis e o elemento estrutural (Bauer, 2000). A protensão exterior tem sua utilização concentrada em pontes e viadutos e consiste em uma pós-tensão aplicada externamente a um elemento estrutural, contribuindo para o incremento da sua capacidade resistente (Souza e Ripper, 1998).

Conforme afirmam Zhu et al. (2020), novos materiais e técnicas foram explorados nos últimos anos para a reabilitação de estruturas de concreto armado existentes. O descobrimento de novos materiais e desenvolvimento de novas técnicas deram abertura aos estudos sobre compósitos cimentícios e polímeros reforçados com fibras, os quais possuem grande relevância na atualidade.

Os compósitos cimentícios se tornaram comuns nos canteiros de obras porque, além de se tratar de um material de fácil acesso no mercado, possuem técnicas simples de execução, a exemplo do encamisamento e jateamento do concreto projetado (Vritesh e Asish, 2021). No entanto, conforme exposto por Zucchi (2015), a principal desvantagem dessas técnicas é a interferência arquitetônica decorrente do aumento das seções, a necessidade de escoramento da estrutura e o consequente prazo necessário para liberação da estrutura para o uso.

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), por sua vez, possuem algumas vantagens como o baixo peso específico, elevado módulo de elasticidade, são imunes a corrosão, bem como possuem uma rápida aplicação sem gerar sujeiras ou impactar na arquitetura, uma vez que são materiais industrializados de pequena espessura e já prontos para a aplicação por meio de colagem na estrutura a ser reforçada (Shahawy et al., 1996; Täljsten e Elfgren, 2000; Siddika et al., 2020). Contudo, os PRF possuem custo elevado principalmente quando se trata da fibra de carbono em comparação às fibras de vidro e aramida (Täljsten e Elfgren, 2000; Siddika et al., 2020; Iswanto, Oesman e Mujiman, 2021).

Nesse sentido, os PRF ainda não ganharam abrangência no mercado por conta do seu alto custo, atrelado à fragilidade ante as altas temperaturas. Comparativamente, conforme apresentam Ascione et al. (2020), os compósitos cimentícios se tornam mais vantajosos pois apresentam maior compatibilidade com

os substratos de concreto; são resistentes a altas temperaturas, possuem maior permeabilidade ao vapor, além da sua aplicabilidade ser viável em superfícies irregulares e úmidas.

Desse modo, a escolha apropriada do material a ser aplicado no reforço estrutural está atrelada ao correto entendimento do dano que a estrutura possui, na viabilidade econômica, disponibilidade e na compatibilidade do material a ser utilizado, tendo em vista também o local onde a estrutura está inserida. Logo, ao engenheiro estrutural, a fim de apresentar de forma adequada uma proposta de reparo e reforço estrutural, além de um diagnóstico correto, cabe o conhecimento das principais técnicas e materiais empregados nestas intervenções. Cabe ainda, mesmo que de forma ampla, o conhecimento da evolução das pesquisas envolvendo tais materiais. Outro aspecto que justifica o presente estudo é a sua atualização quanto os principais temas estudados e a estudar no que se refere aos materiais para recuperação e reforço estrutural. Em face de tal necessidade é que se encerra o presente estudo.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo mapear a produção científica acerca do uso dos materiais utilizados para o reforço de estruturas de concreto armado, por meio de uma análise quantitativa das pesquisas relativas ao tema desde a década de 1980 até meados de 2022. Assim, buscou-se ainda identificar os materiais cimentícios com maior relevância empregados nos últimos oito anos e identificar lacunas ainda a serem estudadas.

2. METODOLOGIA

A fim de se alcançar o objetivo proposto foi realizada a metodologia do mapeamento literário fundamentado em base técnica e conceitual por meio de revisão bibliométrica.

Durante o mês de dezembro de 2022, filtraram-se artigos relacionados ao tema reforço estrutural em concreto. No portal de periódicos CAPES, repositório nacional das principais publicações científicas de impacto e relevância para a área, foi utilizado como *string* de busca de títulos que continham os termos *strengthening* [reforço] e *concrete* [concreto], obtendo como resultado 797 artigos no intervalo entre os anos de 1982 e 2022. A opção por utilizar o periódico Capes se baseou no fato de que o portal permite o acesso às bases de dados mais relevantes para a área, reportando artigos de bases como *Scopus*, *Science Direct*, *Engineering Village* e *Web of Science*.

Com o auxílio da ferramenta online Parsifal, os artigos foram selecionados a partir da leitura do título e resumo adotando critérios de inclusão e exclusão predeterminados. Como critério de inclusão adotaram-se artigos de periódicos priorizando o conhecimento revisado por pares. Como critérios de exclusão adotaram-se artigos que não tratavam de estruturas de concreto armado e que tratavam apenas da concepção de materiais mais resistentes. Assim, foram selecionados 691 artigos, sendo os demais excluídos por não estarem atrelados ao tema reforço de estruturas de concreto nos moldes dos objetivos aqui propostos.

Posteriormente foi feita a divisão dos artigos em grupos com base nos diferentes tipos de materiais empregados em reforço estrutural, conforme observa-se no Quadro 1. Nesse sentido, ressalta-se que: no Grupo 1, denominado compósitos cimentícios, abrangem-se também os concretos e argamassas convencionais. Para os artigos cujos materiais não se encaixaram nos demais grupos criou-se o Grupo 6, denominado "outros".

Feita a seleção segundo os grupos, realizou-se uma primeira análise quantitativa dos dados gerais obtidos. Na etapa seguinte escolheu-se o Grupo 1, concretos, argamassas convencionais e compósitos cimentícios como o foco principal do trabalho onde analisou-se a produção obtida a partir do ano de 2015. Finalmente, para este grupo, fez-se uma projeção da tendência das pesquisas futuras. A escolha do grupo 1

foi feita levando-se em consideração dois aspectos: a realidade da construção civil dos países em desenvolvimento, onde a utilização destes materiais é preponderante em comparação aos demais, com materiais disponíveis no mercado nacional e menor custo, tanto dos materiais quanto da mão de obra. O segundo aspecto é a compatibilidade que se pode obter entre o concreto a ser reforçado e o concreto novo.

Quadro 1: Grupos de materiais.	
GRUPO 1	Compósitos cimentícios
GRUPO 2	Argamassas e microconcretos industrializados
GRUPO 3	Perfis e chapas de aço
GRUPO 4	Polímeros reforçados com fibras
GRUPO 5	Protensão exterior
GRUPO 6	Outros

FONTE: Autor (2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. MAPEAMENTO GERAL ENTRE OS ANOS DE 1982 E 2022

Realizada a busca dos artigos e feita uma análise quantitativa preliminar, é possível distinguir dois períodos bem distintos de publicação, conforme se observa na Figura 1: o primeiro entre 1982 e 2000 e o segundo entre 2001 e 2022. Observa-se, portanto, que grande parte das publicações se deu a partir do ano 2000.

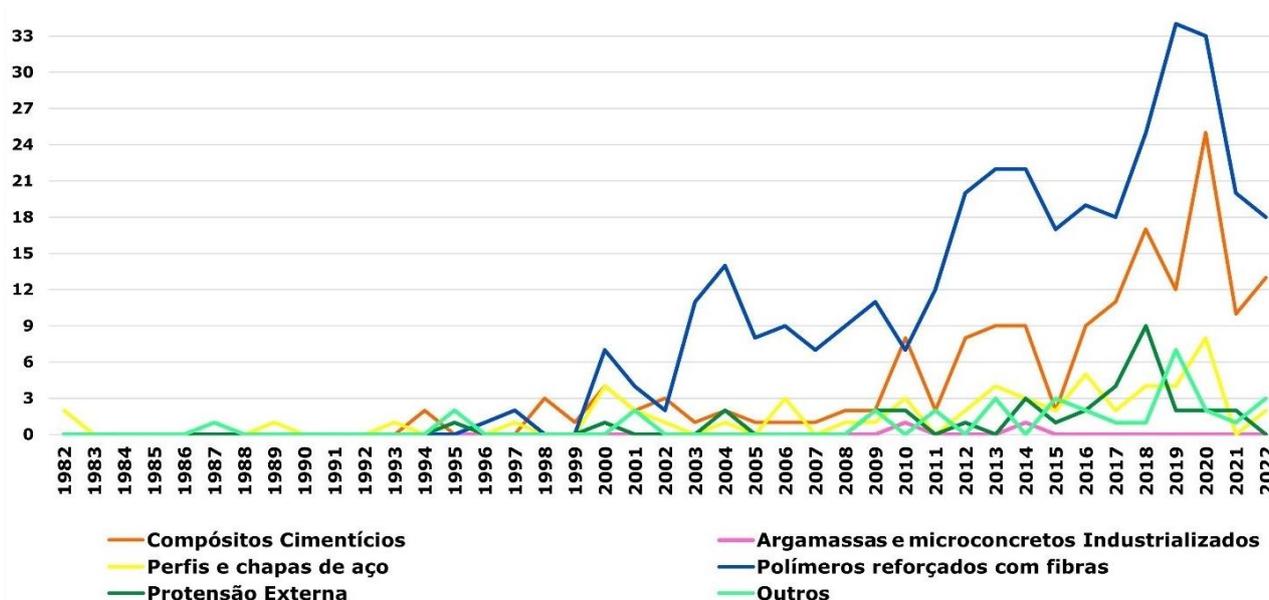


FIGURA 1: Quantidade de publicações no período de 1982 a 2022.

FONTE: Autor (2023).

As tendências de publicações nos dois referidos períodos foram analisadas separadamente e estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

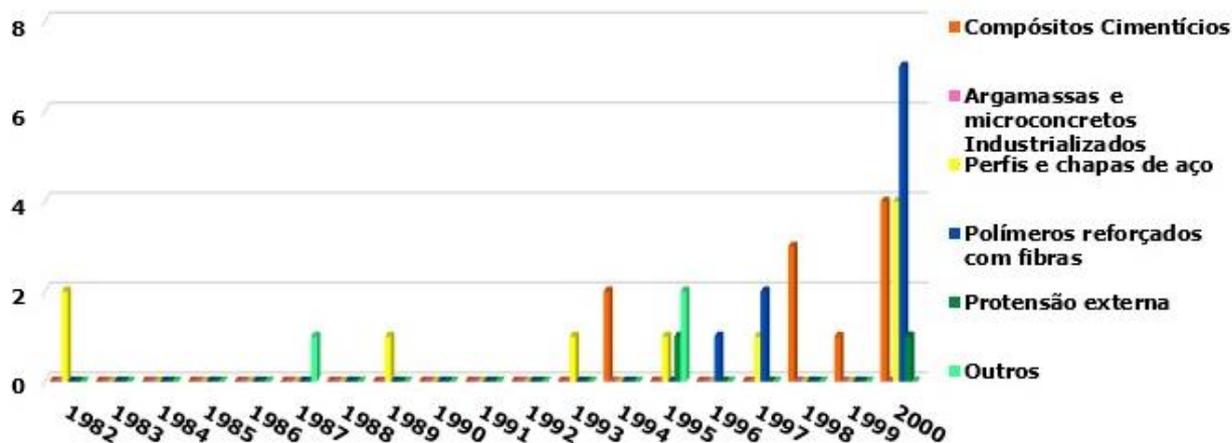


FIGURA 2: Quantidade de publicações: 1982 a 2000.

FONTE: Autor (2023).

Do gráfico apresentado na Figura 2 em todo o período as pesquisas relacionadas aos perfis e chapas metálicas somaram dez artigos, mesmo valor para os compósitos cimentícios e polímeros reforçados com fibras. Destaca-se o aumento de publicações dos três grupos no ano 2000. Observou-se que entre 1982 e 1992 foram publicados apenas quatro artigos, sendo três concernentes ao uso de perfis e chapas metálicas como material para reforço (Macdonald e Calder, 1982; Raithby, 1982; Roberts e Haji-Kazemi, 1989). Dois estudos experimentais produzidos em 1982 apresentaram ensaios com placas de aço coladas externamente: o primeiro realizando testes em vigas (Macdonald e Calder, 1982) e o outro em fortalecimento de pontes (Raithby, 1982). Embora tenham alcançado melhor desempenho estrutural, ambos os estudos ressaltaram os problemas potenciais de corrosão indicando a necessidade de novos estudos com este enfoque.

Na década de 1990 observou-se o surgimento de pesquisas envolvendo novos materiais como compósitos cimentícios, polímeros reforçados com fibras e o uso de protensão exterior. Entre 1993 e 1998, para os compósitos cimentícios houve uma tendência de aumento das pesquisas, porém com queda em 1999. Dentre estes, foi estudado o uso de tecidos compostos de fibras ligados externamente com epóxi (Chajes et al., 1994) – sendo este o primeiro artigo encontrado a tratar do uso de fibras em compósito para reforço estrutural – e o uso de compósitos com laminados de argamassa armada como reforço a flexão em vigas de concreto (Paramasivam, Ong e Lim, 1994). No que tange ao uso da protensão exterior, em 1995 localizou-se o primeiro artigo sobre o uso dessa técnica como mecanismo de reforço por meio do tensionamento de fios ou barras de aço de alta resistência ancorados a vigas compostas (Li, Albrecht e Saadatmanesh, 1995). Já em 1996, localizou-se um estudo sobre o uso de laminados de fibras de alta resistência, a exemplo das fibras de vidro, aramida e carbono ligadas por uma matriz de polímeros como reforço de lajes severamente danificadas (Shahawy et al., 1996). Ademais, destaca-se em 1998 um estudo de revisão sobre o uso dos laminados de argamassa armada avaliando então a transferência de esforços entre a interface concreto/argamassa armada (Paramasivam, Lim e Ong, 1998).

Na primeira década do século XXI destacam-se três publicações no ano 2000, concernentes ao uso dos PRF: estudo sobre o dimensionamento de lamelas de polímero de fibra de carbono reforçado - CFRP (Weidner, Köhler e Krams, 2000); uma pesquisa experimental sobre os graus de reforço variando a largura do laminado (Ramana et al., 2000); e um estudo avaliativo sobre as diferentes formas de aplicação dos tecidos em vigas de concreto (Täljsten e Elfgrén, 2000).

Ainda no ano 2000 os estudos relacionados a perfis e chapas metálicas ocuparam o segundo lugar juntamente com os compósitos cimentícios, os quais somaram quatro artigos publicados cada um. Já os PRF ocuparam a primeira posição com sete publicações. Contudo, nos anos seguintes as pesquisas de perfis

e chapas metálicas reduziram, sendo ultrapassado em 2017 (Figura 3) pelas pesquisas sobre protensão exterior. Porém, embora com menor relevância, perfis e chapas metálicas continuaram a apresentar o desenvolvimento de novas técnicas. Exemplo disso é o estudo de Aksoylu, Özkilic e Arslan (2022) no qual avaliaram o uso dos pontos mecânicos de aço (MSS, do inglês *Mechanical Steel Stitches*) utilizados para reparar fissuras no reforço a flexão ou em vigas com armaduras de cisalhamento insuficientes. Trata-se de uma técnica de fácil aplicação, econômica e eficaz. Na referida pesquisa as propriedades mecânicas das vigas ensaiadas foram mantidas constantes tendo como variável apenas o espaçamento dos MSS. Assim, foi observado que o distanciamento dos pinos é um ponto crítico nesse reforço externo sendo a razão volumétrica de 1% a que se mostrou mais eficiente para evitar a fratura por cisalhamento das vigas. Ademais, perda de rigidez e aumento de deflexão são observadas nas vigas em decorrência da fixação dos pinos que se dá mediante a perfuração da viga e conseqüente perda de seção. Também vale reforçar que por estarem sujeitos à corrosão, os MSS necessitam ser revestidos com inibidores de corrosão.

Do gráfico apresentado na figura 3 concernente ao segundo período, verificou-se o aumento e predominância de pesquisas que englobam o uso do PRF somando 331 artigos publicados e um aumento significativo de estudos relacionados ao uso dos compósitos cimentícios, sendo 143 publicados no período com destaque para o ano de 2020 com 25 publicações.

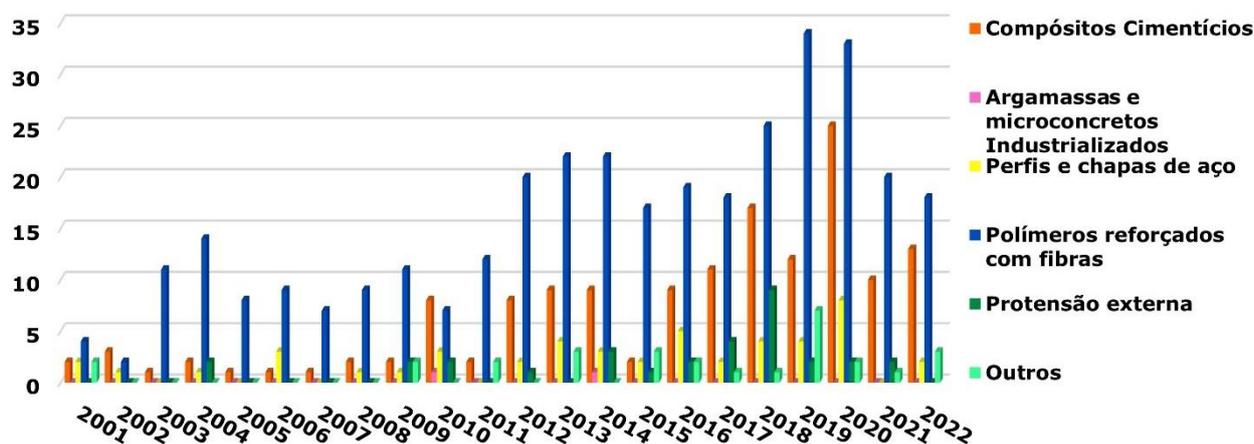


FIGURA 3: Quantidade de publicações: 2001 a 2022.

FONTE: Autor (2023).

Em 2004, ano com maior número de publicações nessa primeira década, pôde-se observar o avanço das técnicas que envolvem o uso dos PRF, como no estudo sobre a protensão das placas de CFRP (El-Hacha, Wight e Green, 2004). Em 2008 destaca-se a avaliação do uso de cintas de aço como contraventamento em sistemas compostos (Rahai e Alinia, 2008). No que tange ao uso dos compósitos cimentícios, tem-se no mesmo ano um estudo experimental acerca da eficácia do reforço de pilares utilizando jaquetas (encamisamento) de concreto, avaliando procedimentos alternativos de construção (Vandoros e Dritsos, 2008). Nesse estudo verificou-se que todas as colunas reforçadas por encamisamento e submetidas a cargas cíclicas apresentaram comportamento quase monolítico, com aumento da resistência e rigidez, tendo como ponto crítico a interface de ligação entre a jaqueta e a estrutura original.

A partir de 2009 surgiram pesquisas diversificadas as quais foram integradas no grupo “outros”, propondo materiais alternativos para reforço de estruturas. Destacam-se nesse grupo materiais orgânicos e recicláveis, a exemplo da pesquisa sobre reforço de vigas utilizando cinzas de bagaço de cana, como substituição parcial do cimento. Nessa pesquisa testaram-se substituições de 5% a 25% sendo a resistência crescente até 20% de substituição, atribuindo-o como valor limite visto que com 25% de substituição a resistência decresceu (Azarudeen e Niranjani, 2018). Outros materiais que se destacaram foram as ligas metálicas com efeito de memória de forma, comumente chamadas SMA, do inglês *Shape Memory-Alloy*.

Trata-se de ligas que, após aquecidas e deformadas, tendem a retornar à sua forma anterior, indeformada. Nesse contexto, tem-se o programa experimental que investigou o comportamento a flexão de vigas de concreto reforçadas e protendidas com faixas de ligas à base de ferro (Shahverdi, Czaderski e Motavalli, 2016) e o estudo acerca do potencial de utilização de placas de ligas de alumínio de alta resistência (AA) para reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado (Abdalla *et al.*, 2016). Os autores concluíram que a capacidade das vigas reforçadas com placas AA aumentaram de 24% a 89%, demonstrando a viabilidade técnica do método proposto. Encontra-se mais recentemente o estudo de Löschmann e Mark (2022), que inovaram ao apresentar a técnica de indução sistemática de temperatura por meio da qual é possível modificar momentos fletores em estruturas hiperestáticas.

A segunda década do século XXI foi o período com maior quantidade de artigos publicados, sendo 2020 o ano mais expressivo, os quais discorreram majoritariamente sobre o uso dos PRF ou dos compósitos cimentícios. Dentre eles, tem-se o artigo que avaliou o estado atual da arte acerca do uso dos PRF, concluindo a necessidade de estudos futuros com foco em estruturas em escala real sob combinação de carregamentos extremos (Siddika *et al.*, 2020). Apresentando uma proposta com custo mais baixo em comparação aos polímeros, destaca-se entre os compósitos cimentícios o estudo experimental sobre o uso de cordões de aço de alta resistência incorporados em uma matriz cimentícia (Ascione *et al.*, 2020) e o estudo experimental acerca do uso do concreto de ultra-alto desempenho com fibras de aço (Zhu *et al.*, 2020).

Nesse contexto, para aplicações que exigem elevado desempenho, estudos recentes tratam sobre os concretos de ultra-alto desempenho reforçados com fibras (Paschalis e Lampropoulos, 2021; Strotmann e Jungwirth, 2022). As fibras que compõem esse material apresentam maior resistência do que a matriz de concreto circundante. Dessa forma, selam as fissuras existentes que passam a se desenvolver como microfissuras. Apresenta, assim, excelentes propriedades mecânicas, um aumento significativo da capacidade de carga dos elementos compostos e elevada durabilidade devido à baixa porosidade.

Ademais, neste período, encontra-se também o pico de publicações acerca do uso da protensão exterior, com 9 artigos publicados em 2018. Destaca-se o estudo sobre o uso de cinta de concreto protendido pré-moldado em forma de X, a qual é adicionada à estrutura existente, sendo uma proposta rápida e econômica de reforço estrutural (Alahi e Vatandoost, 2018).

Ressalta-se que nos anos de 2020 a 2022 houve significativa queda no número de publicações, abrangendo todos os grupos de materiais para reforços, sobretudo em 2022. Entende-se que a produção científica reflete os fatos sociais e econômicos que envolveram o meio técnico-científico, bem como a sociedade como um todo. Dessa forma, pode-se inferir que os impactos da pandemia da Covid-19 alcançaram também o desenvolvimento científico nesses anos, impactando, portanto, na quantidade de publicações sobre o tema.

Portanto, dado o destaque observado nos últimos anos, os polímeros reforçados com fibras e os compósitos cimentícios foram os materiais com maior relevância em número de pesquisas, com diversas técnicas e aplicações consideradas.

3.2 MAPEAMENTO ESPECÍFICO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENTRE OS ANOS DE 2015 E 2022

Na pesquisa realizada sobre compósitos cimentícios, foram identificados seis subgrupos mais relevantes: as argamassas com fibras, argamassas armadas (comumente chamadas de ferrocimento), compósitos cimentícios com endurecimento (SHCC), concreto convencional, concreto de ultra-alto desempenho e graute de alto desempenho, conforme é apresentado na Figura 4. Nele apresenta-se a quantidade de artigos publicados nos últimos 8 anos para cada subgrupo, sendo possível observar a evolução do número de publicações no referido período. A partir da análise desses dados, verifica-se que

os subgrupos de materiais mais relevantes para utilização em reforços de estruturas de concreto atualmente são: as argamassas com fibras, argamassa armada e o concreto de ultra-alto desempenho.

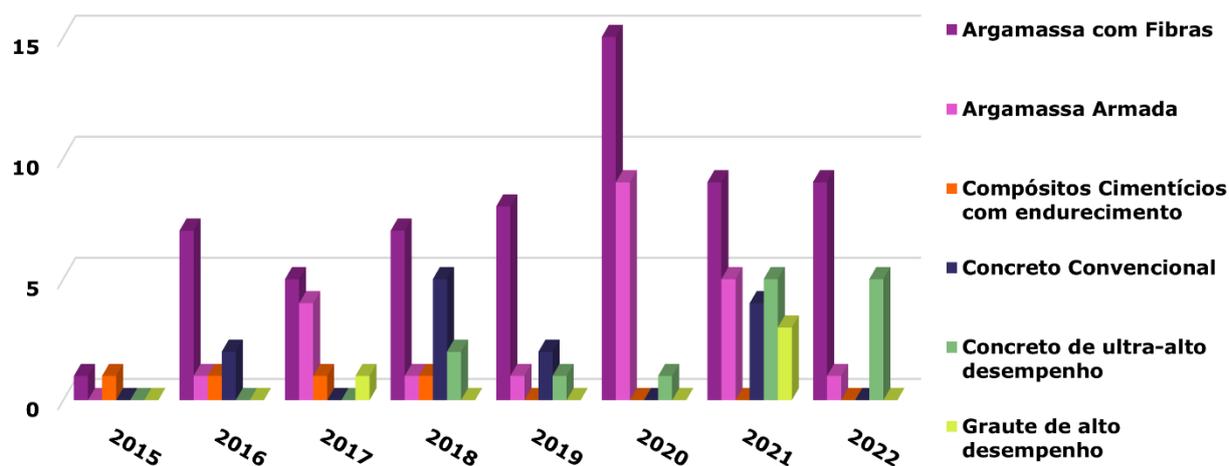


FIGURA 4: Publicações nos subgrupos dos compósitos cimentícios entre 2015 e 2022.

FONTE: Autor (2023).

Observa-se que as argamassas com fibras cresceram de forma significativa até 2020, com leve queda nos anos seguintes; em 2015 havia apenas um artigo publicado, enquanto em 2020 alcançou o ápice de 15 publicações. Sendo assim, apresenta uma média anual de sete artigos publicados relacionados a argamassas com fibras.

A incorporação das fibras aos materiais cimentícios otimiza propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade, controle de fissuração, resistência ao impacto, à abrasão e à fadiga, resistência à retração, expansão térmica e previne o cisalhamento interlaminar (Filho, 2017; Awani, El-Maaddawy e Ismail, 2017; Younis e Ebead, 2018; Rossi et al., 2022). Conforme Filho (2017), a utilização das fibras altera a curva tensão-deformação sob tração axial, apresentando então uma significativa deformação simultânea à perda da capacidade resistente do material, mesmo após a abertura da primeira fissura; ou seja, observa-se maior capacidade de absorção de energia e diminuição do nível de fragilidade na ruptura do material. Tais benefícios potenciais certamente influenciaram no aumento das pesquisas envolvendo as argamassas com fibras.

Em segundo lugar dos artigos mais publicados nestes últimos 8 anos estão as argamassas armadas, as quais totalizaram 22 artigos publicados, tendo como média anual pouco mais de duas publicações, tendo o ápice em 2020 com 9 artigos publicados. Em terceiro lugar estão os artigos publicados sobre concreto de ultra-alto desempenho. Foram 14 trabalhos publicados, sendo 10 somente nos dois últimos anos. Observa-se que não foram publicados artigos sobre concreto convencional em 2020. Essa tendência de queda se justifica pelo avanço de estudos sobre os materiais de alto desempenho.

Tanto os concretos de ultra-alto desempenho quanto os grautes de alto desempenho se apresentaram como materiais a serem potencialmente estudados nos próximos anos. Estes materiais são adequados para situações que requerem alta resistência, ductilidade e durabilidade. Paschalis e Lampropoulos (2021) ressaltam que as vantagens da utilização do concreto de ultra-alto desempenho no reforço de membros de concreto estão relacionadas às propriedades aprimoradas do material, sua durabilidade, facilidade de preparo, aplicação e, sobretudo, à capacidade de se alcançar resistência e ductilidade com elementos esbeltos, sem grandes aumentos na seção transversal, impactando menos nas dimensões dos elementos reforçados e, conseqüentemente, preservando a arquitetura original.

3.2.1 Trabalhos mais relevantes

Após a realização do mapeamento literário com foco nos anos de 2015 a 2022, apresentam-se neste item os trabalhos relevantes acerca do desenvolvimento dos compósitos cimentícios.

3.2.1.1 Concreto de Ultra-alto desempenho (UHPC)

Neste subgrupo destaca-se o estudo de Zhu et al. (2020), que trata do desenvolvimento de um material para reforço à base de cimento, acrescido de pó de quartzo, cinza volante, sílica ativa, areia de quartzo, superplastificantes, bem como o uso de fibras de aço. No trabalho foram analisadas quatro configurações diferentes de reforço à flexão em vigas e lajes. Os resultados, portanto, apresentaram aumento de até 400% na resistência à flexão, estando os modos de ruptura atrelados às configurações de reforço adotadas, sendo mais efetivo aquele onde o reforço foi aplicado na face submetida ao esforço de tração. Concluiu-se, ademais, que o UHPC alcançou toda sua resistência à tração apresentando, de modo geral, ruptura por esmagamento do concreto. No entanto, conforme os autores, a superfície áspera do substrato pode melhorar a aderência entre as camadas.

3.2.1.2 Argamassa armada

No estudo de Ascione et al. (2020) utilizou-se o compósito cimentício incorporado com cordões de aço de alta resistência a tração (SRG). Tal material possui custo mais atrativo que os PRF, contudo suas propriedades mecânicas estão diretamente ligadas às condições de cura que a matriz cimentícia foi condicionada e o seu método de instalação. A matriz inorgânica do SRG deste estudo foi composta por argamassa mineral tixotrópica eco-compatível, totalmente isenta de fibras orgânicas e baixa quantidade de polímeros petroquímicos. A tira de aço usada como reforço consiste em cabo têxtil unidirecional HTSS, isso é, aço de alta resistência à tração; por fim, galvanizado para evitar corrosão. Os ensaios da pesquisa foram feitos em dois grupos; o primeiro com concreto de resistência normal (NSC) e o segundo usando o concreto de alta resistência (HSC), ambos submetidos à compressão. Nos resultados dos ensaios usando SRG submetido a carregamento, em 74% das amostras a ruptura ocorreu na interface aço-argamassa, isso é, houve o descolamento dos cordões da matriz cimentícia. Por outro lado, em apenas 12% a 14% das amostras a falha se deu por ruptura do aço ou pelo seu descolamento dentro do concreto. Foi observado que para a argamassa submetida à cura úmida, molhando a superfície do compósito por 28 dias, o ponto de ruptura ocorreu na interface argamassa-concreto. Para a argamassa submetida à cura em temperatura ambiente, a ruptura ocorreu na ligação argamassa-aço. Houve, portanto, para a cura úmida, o aumento da ligação entre o reforço e a matriz, ocasionando uma mudança do ponto de ruptura.

3.2.1.3. Argamassas com fibras

Segundo Awani, El-Maaddawy e Ismail (2017) a aplicação de uma matriz cimentícia reforçada com tecidos (FRCM) como material de reforço se apresenta como uma alternativa aos problemas associados aos PRF. Nesse sentido, tem-se a argamassa, que consiste em uma matriz aglutinante, e as grades de tecido, as quais podem ser de fibras de carbono, vidro, aço, etc. A junção do composto cimentício favorece a compatibilidade ao sistema quando comparado ao epóxi utilizado para unir os compósitos de FRP ao substrato de concreto. Assim, além da aderência da matriz utilizada nos compósitos FRCM ser mais compatível ao substrato do concreto em comparação ao epóxi utilizado em PRF, as argamassas são mais resistentes ao fogo e ao calor, permitindo maior capacidade térmica e versatilidade. Conforme afirmam os autores, a qualidade da argamassa utilizada na FRCM é crucial para o desempenho do reforço, estando as propriedades mecânicas diretamente relacionadas aos constituintes das misturas das argamassas. Foram investigados o desempenho de uma argamassa cimentícia comum e uma argamassa cimentícia modificada com polímero. No que tange ao reforço ao cisalhamento, identificaram-se que as argamassas reforçadas

com polímeros e fibras melhoraram a resistência chegando a ganhos de 69% ao se comparar com argamassas comuns. Já no que diz respeito ao reforço à flexão, os resultados de ensaios realizados mostraram que a capacidade de carga dos corpos de prova com argamassa modificada com polímeros apresentou ganhos que variam de 82 a 91% em relação à argamassa comum.

Younis e Ebead (2018) investigaram o reforço estrutural com matriz cimentícia de argamassa FRCM em vigas de concreto armado, usando três tipos de tecidos: Poliparafenileno Benzobisoxazol - POB-FRCM, carbono-FRCM e vidro-FRCM. As vigas foram feitas com concreto de 30 MPa aos 28 dias e aço CA-50. Já os tecidos compostos (carbono, POB e vidro) de FRCM foram embutidos em argamassa conforme indicação de cada fabricante. As amostras foram submetidas a ensaios de tração e ao cisalhamento, carregando as vigas em três pontos. Como resultado dos ensaios, o uso de FRCM apresentou um ganho de 57% ao cisalhamento, sendo o carbono-FRCM o que apresentou resultados mais satisfatórios. Tanto os reforços com matriz cimentícia e argamassa armada quanto os PRF proporcionaram um aumento na capacidade estrutural do membro reforçado. Assim, o FRCM se apresentou como uma solução viável para fortalecer elementos estruturais aos efeitos de cisalhamento ou flexão.

3.2.2. Lacunas relatadas

Após a realização do mapeamento literário foram identificadas lacunas no conhecimento que ainda precisam ser investigadas. Relacionam-se a seguir as lacunas reportadas nos estudos apresentados no item anterior:

3.2.2.1. Concreto de Ultra-alto desempenho (UHPC)

Ressalta-se a necessidade de avaliação do efeito da retração em sua camada quando submetida a estrutura à flexão; sugere-se também avaliação da influência da taxa de aço na camada UHPC, bem como da sua espessura e teor de fibra, no modo de ruptura; análise do efeito do grau de rugosidade do substrato de concreto; estudos são necessários também acerca do efeito do deslizamento entre as camadas em modelos de cálculos analíticos e numéricos; estudar a resposta de estruturas reforçadas com UHPC sob carregamento cíclico; análise em estruturas danificadas, visto que os estudos atuais focam no fortalecimento de estruturas não danificadas; sugere-se investigação sobre a combinação do UHPC com outros materiais compósitos, a exemplo dos PRF; por fim, deve ser mais explorado seu comportamento no estado fresco, sua durabilidade e sua resistência à fadiga e ao fogo.

3.2.2.2. Argamassa armada

Sugerem-se estudos acerca do confinamento da argamassa armada em colunas simples e de concreto armado criando parâmetros para confinamento por meio de pesquisa experimental e numérica; aprofundamento sobre as técnicas de reforços de colunas, bem como a combinação entre o encamisamento de argamassa armada com PRF, como alternativa para aumentar rigidez e resistência de colunas contra o fogo.

3.2.2.3. Argamassas com fibras

Sugere-se análise de possíveis sistemas de ancoragens, bem como de estribos, a fim de prevenir o escorregamento e descolamento do sistema compósito da superfície do membro reforçado; proposição de desenvolvimento de um modelo computacional preciso, resultando em diretrizes mais compatíveis a situações reais.

3.2.2.4. Compósitos cimentícios com endurecimento

Sugere-se o estudo da influência da interface entre os concretos variando suas propriedades; avaliação do desempenho do compósito permitindo sua descolagem local, desde que não haja a

delaminação completa, permitindo assim maior capacidade de deformação; desenvolvimento de modelos numéricos que possam exprimir resultados obtidos experimentalmente.

4. CONCLUSÕES

A presente pesquisa identificou por meio do mapeamento literário os materiais utilizados para reforço de estruturas de concreto armado, os quais podem ser compreendidos em 6 grupos: Grupo 1 - compósitos cimentícios; Grupo 2 - argamassas e microconcretos industrializados; Grupo 3 - perfis e chapas de aço; Grupo 4 - polímeros reforçados com fibras; Grupo 5 - protensão exterior; e Grupo 6: outros.

Destes, os compósitos cimentícios e os polímeros reforçados com fibras foram os que notoriamente obtiveram maior quantidade de artigos publicados. Os estudos apontam que embora os polímeros (em sua maioria reforçados com fibras de vidro, carbono e aramida) tenham sua eficiência comprovada para o uso em reforço estrutural, consiste em um material de elevado custo. Portanto, devido não somente a grande relevância ao meio técnico e científico, mas também pelo menor custo observado, concluiu-se ser o grupo dos compósitos cimentícios o de maior potencial de desenvolvimento na atualidade, especialmente no contexto dos países em desenvolvimento.

Assim, na análise feita verificou-se que no que tange ao grupo dos compósitos cimentícios tem-se como materiais promissores as argamassas com fibras, argamassas armadas e o concreto de ultra-alto desempenho, tendo em vista a tendência de crescimento de estudos sobre esses temas.

Portanto, por meio do mapeamento foi possível quantificar a produção científica acerca do tema proposto identificando os principais materiais utilizados em reforço de estruturas de concreto armado. Desse modo, identificaram-se lacunas do conhecimento que foram relatadas na literatura dentre os quais podem-se citar: análise do efeito da retração, taxa de aço e teor de fibras nas diversas camadas do reforço em vigas reforçadas com concretos de ultra-alto desempenho; análises do comportamento de reforços à flexão combinando materiais distintos como UHPC e PRF; estudos sobre o efeito conjunto do encamisamento de colunas com argamassas armada e PRF; desenvolvimento de métodos numéricos que possibilitem extrair resultados no que tange às variadas propriedades mecânicas dos reforços com compósitos cimentícios com endurecimento; estudos sobre ancoragem e estribos em reforços de argamassas com fibras a fim de mitigar falhas por descolamento no membro reforçado; por fim, desenvolvimento de modelos computacionais com matrizes mais próximas às situações reais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, J.A.; ABU-OBEIDAH, A.S.; HAWILEH, R.A.; RASHEED, H.A. **Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally-bonded aluminum alloy plates: An experimental study**. Construction and Building Materials, v. 128, p. 24-37, 2016.
- ADORNO, F.V.; DIAS, F.O.; SILVEIRA, J.C.O. **Recuperação e Reforço de Vigas de Concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, Goiás, p. 70, 2015.
- AKSOYLU, C.; ÖZKILIÇ, Y.O.; ARSLAN, M.H. Mechanical Steel Stitches: An innovative approach for strengthening shear deficiency in undamaged reinforced concrete beams. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1501, 2022.
- ALAH, F.N.; VATANDOOST, M. **Single diagonal precast prestressed concrete bracing for strengthening existing concrete frames**. International Journal of Advanced Structural Engineering, v. 10, n. 4, p. 339-347, 2018.
- ASCIONE, F.; LAMBERTI, M.; NAPOLI, A.; REALFONZO, R. **Experimental bond behavior of Steel Reinforced Grout systems for strengthening concrete elements**. Construction and Building Materials, v. 232, p. 117105, 2020.
- AWANI, O.; EL-MAADDAWY, T.; ISMAIL, N. **Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures**. Construction and Building Materials, v. 132, p. 94-111, 2017.

- AZARUDEEN, A.M.; NIRANJANI, S. **Experimental investigation on strengthening of beams using retrofitting with partial replacement of cement by sugarcane bagasse ash in concrete.** International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, v. 6, n. 3, p. 2204-2208, 2018.
- BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** Vol. 1. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- CHAJES, M.; THOMSON, T.A.J.; JANUSZKA, T.F.; FINCH, W.W.J. **Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials.** Construction and Building Materials, v. 8, n. 3, p. 191-201, 1994.
- EL-HACHA, R.; WIGHT, R.G.; GREEN, M.F. **Prestressed carbon fiber reinforced polymer sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures.** Journal of Composites for Construction, v. 8, n. 1, p. 3-13, 2004.
- FILHO, J.A.A.S. **Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras.** Revista Concreto e Construções. Ed. 87. p. 39-42. 2017.
- ISWANTO, I.; OESMAN, M.; MUJIMAN, M. External strengthening of reinforced concrete beams with strand without stressing under flexural loading. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** IOP Publishing, 2021. p. 012001.
- LI, W.; ALBRECHT, P.; SAADATMANESH, H. **Strengthening of composite steel-concrete bridges.** Journal of Structural Engineering. v. 121, n. 12, p. 1842-1849, 1995.
- LÖSCHMANN, J.; MARK, P. Strengthening of beams or slabs using temperature induction. **Structural Concrete**, v. 23, n. 5, p. 2770-2785, 2022.
- MACDONALD, M.D.; CALDER, A.J.J. **Bonded steel plating for strengthening concrete structures.** International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 2, n. 2, p. 119-127, 1982.
- PALIGA, C.; NICOLINI, N.; PALIGA, A.; TORRES, A. **Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com chapas de aço.** Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 6, ed. 1, p. 20-37, 2019.
- PARAMASIVAM, P.; ONG, K.C.G.; LIM, C.T.E. **Ferrocement laminates for strengthening RC T-beams.** Cement and Concrete Composites, v. 16, n. 2, p. 143-152, 1994.
- PARAMASIVAM, P.; LIM, C.T.E.; ONG, K.C.G. **Strengthening of RC beams with ferrocement laminates.** Cement and Concrete Composites, v. 20, n. 1, p. 53-65, 1998.
- PASCHALIS, S.A.; LAMPROPOULOS, A.P. **Developments in the use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete as strengthening material.** Engineering Structures, v. 233, 2021.
- RAHAI, A.R.; ALINIA, M.M. **Performance evaluation and strengthening of concrete structures with composite bracing members.** Construction and Building Materials, v. 22, n. 10, p. 2100-2110, 2008.
- RAITHBY, K.D. **Strengthening of concrete bridge decks with epoxy-bonded steel plates.** International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 2, n. 2, p. 115-118, 1982.
- RAMANA, V.P.V.; KANT, T.; MORTON, S.E.; DUTTA, P.K.; MUKHERJEE, A.; DESAI, Y.M. **Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening.** Composites Part B: Engineering, v. 31, n. 6-7, p. 461-470, 2000.
- ROBERTS, T.M.; HAJI-KAZEMI, H. Strengthening of under-reinforced concrete beams with mechanically attached steel plates. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, ed. 1, p. 21-27, 1989.
- ROSSI, E.; NORBERT, R.; HARSÁNYI, P.; MÉSZÖLY, T. Experimental study of fibre-reinforced TRC shear strengthening applications on non-stirrup reinforced concrete T-beams. **Engineering Structures**, v. 256, p. 113923, 2022.
- SHAHAWY, M.A.; BEITELMAN, T.; AROCKIASAMY, M.; SOWRIRAJAN, R. **Experimental investigation on structural repair and strengthening of damaged prestressed concrete slabs utilizing externally bonded carbon laminates.** Composites Part B: Engineering, v. 27, n. 3-4, p. 217-224, 1996.
- SHAHVERDI, M.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M.. **Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 28-38, 2016.

- SIDDIKA, A.; MAMUM, MD.A.; FERDOUS, W.; ALYOUSEF, R. **Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs—A state-of-the-art review**. Engineering Failure Analysis, v. 111, 2020.
- SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 2001.
- STROTMANN, A.; JUNGWIRTH, J. Crack control for repair and strengthening of reinforced concrete structures using the multi-cracking behaviour of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Shotcrete (UHPRFSC). In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2022. p. 04003.
- TÄLJSTEN, B.; ELFGREN, L. **Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods**. Composites Part B: Engineering, v. 31, n. 2, p. 87-96, 2000.
- VANDOROS, K.G.; DRITSOS, S.E. **Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 3, p. 264-276, 2008.
- VRITESH, Mungur Ved; ASISH, Seeboo. A Comparative Analysis on the Methods of Strengthening Isolated Reinforced Concrete Columns. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2021. p. 022037.
- WEIDNER, J.; KÖHLER, W.; KRAMS, J. **Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung**. Bemessung und Ausführung. Beton- und Stahlbetonbau, v. 95, n. 9, p. 537-543, 2000.
- YOUNIS, A.; EBEAD, U. **Characterization and application of FRCM as a strengthening material for shear-critical RC beams**. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018.
- ZIMBELMANN, R. A method for strengthening the bond between cement stone and aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], ano 1987, v. 17, ed. 4, p. Páginas 651-660, 1987.
- ZHU, Y.; ZHANG, Y.; HUSSEIN, H.H.; CHEN, G. **Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review**. Engineering Structures, v. 205, 2020.
- ZUCCHI, F.L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Civil—Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, 2015.