

MAPEAMENTO LITERÁRIO SOBRE O MICROCONCRETO

Mapping study of the microconcrete

Reginaldo Virgilio da Silva¹, Edgar Bacarji², Oswaldo Cascudo³

Recebido em 29 de novembro de 2017; aceito em 16 de junho de 2018; disponível on-line em 27 de julho de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Microconcreto;
Mapeamento literário;
Dimensão Máxima;
Evolução;
Estado da arte.

KEYWORDS:

Microconcrete;
Mapping study;
Maximum dimension;
Evolution;
State of art.

RESUMO: O microconcreto pode ser definido como um tipo específico de concreto em que o agregado tem dimensão máxima de 6,4 mm, podendo ser utilizado na pré-fabricação leve, ou seja, em elementos estruturais de seção transversal reduzida. Foi realizado um mapeamento literário sobre o tema microconcreto, no qual se levantaram artigos relacionados ao assunto nas bases *Engineering village*, *Science direct*, *Web of science* e *Scopus*, tendo sido realizada uma análise bibliométrica e qualitativa, com o intuito de demonstrar a importância do tema para a comunidade científica, de apresentar a relevância do assunto na atualidade, de identificar as lacunas de conhecimento ainda pouco exploradas e de apresentar como se deu o desenvolvimento dos temas de pesquisas ao longo dos anos. A pesquisa tem o intuito de servir como parâmetro para futuros pesquisadores seguirem como ponto de partida, no aprofundamento de estudos na linha de microconcretos.

ABSTRACT: *The microconcrete can be defined as a specific type of concrete in which the aggregate has a maximum dimension of 6.4 mm and can be used in light prefabrication, that is, in structural elements of reduced cross-section. A literary mapping on the microconcrete theme was carried out, in which articles related to the subject were obtained from the following bases: Engineering village, Science direct, Web of science and Scopus. By means of this mapping, it was performed a bibliometric and qualitative analysis, in order to demonstrate the importance of the theme for the scientific community, to present the relevance of the subject nowadays, to identify the gaps of knowledge still little explored and to present how the development of research themes has developed over the years. The research intends to serve as a parameter for future researchers to follow as a starting point, in the deepening of research in the line of microconcrete.*

* Contato com os autores:

¹ e-mail: rvseng@gmail.com (R. V. Silva)

Eng. Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás (PPGECON-UFG).

² e-mail: edgarbacarji@hotmail.com (E. Bacarji)

Eng. Civil, Dr., Professor Titular, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (EECA-UFG).

³ e-mail: ocascudo@gmail.com (O. Cascudo)

Eng. Civil, Dr., Professor Titular, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (EECA-UFG).

1. INTRODUÇÃO

O microconcreto possui requisitos e características especiais que possibilitam diversas aplicações no campo das engenharias estrutural e de construção civil, como, por exemplo, na produção de concretos moldados in loco, na constituição de peças pré-moldadas e na realização de reforços e recuperação de elementos estruturais.

Conceitualmente, microconcreto é um concreto no qual se tem, em sua composição, o proporcionamento de agregados graúdos de dimensões inferiores às de concretos convencionais (chamados de micro agregados). A dimensão máxima característica (DMC) dos microconcretos pode variar conforme objetivo da aplicação ou da pesquisa, contudo, tendo o conjunto de agregados maior superfície específica, o volume de pasta demandado é maior para envolver os agregados (em comparação a concretos plásticos usuais), o que propicia, em geral, misturas mais plásticas e de maior trabalhabilidade (FELEKOGLU, 2007).

Porém, o material também possui pontos negativos, como um maior volume de zonas de transição pasta-agregado, o que conduz a uma resistência à tração mais baixa e a um comportamento global mais frágil, principalmente quando é concebido para atingir altas resistências estruturais (AITCIN, 2000).

O concreto, devido ao seu comportamento plástico tem diversas aplicações, porém em alguns casos seu uso é restrito devido ao seu comportamento frágil ou à dimensão máxima característica do agregado graúdo.

A estrutura de concreto armado tem peso considerável em relação ao peso global da edificação; com isso, o uso de uma tecnologia como o microconcreto pode minimizar cargas de peso próprio da estrutura, contribuindo assim em economia no custo da estrutura demandada para suportar o carregamento incidente. Tem-se, neste caso, um conceito de eficiência estrutural.

O uso de um microconcreto de alto desempenho é justificável, principalmente por ser

uma alternativa às necessidades sociais de se viabilizar sistemas e componentes construtivos mais leves, podendo conferir maior valor agregado ou tecnológico a produtos associados às estruturas de elementos delgados. A aplicação do microconcreto tem o objetivo de aumentar a diversificação dos produtos oferecidos para os mercados habitacionais, industriais e comerciais, pois pode significar um importante fator de ganho na competitividade nesse segmento da indústria da construção (CAMPOS, 2002).

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo mapear artigos científicos relevantes sobre o tema microconcreto, por meio de utilização da base de pesquisa da CAPES, com a finalidade de avaliar a evolução do tema de pesquisa e o atual estado da arte, bem como, apontar lacunas de conhecimento ainda não explorados sobre o emprego do microconcreto.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

O conceito de microconcreto engloba uma série de misturas de materiais que podem ser classificados com este nome, dentre elas têm-se o graute, as argamassas estruturais (autoadensáveis e tixotrópicas) e as argamassas armadas. Ressalta-se que o agregado graúdo tem grande influência nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto, sendo que este se torna mais econômico, quando se tem uma granulometria contínua e com agregados de maior dimensão. Este argumento conduz os microconcretos a serem aplicados preferencialmente em reparos, em peças delgadas, em elementos densamente armados ou na fabricação de peças pré-moldadas de pequena espessura. Por outro lado, a utilização de agregados com menor dimensão produz uma zona de transição pasta-agregado com menor espessura, a despeito de se ter um maior volume dessas zonas no concreto, o que pode aumentar a resistência e a durabilidade do material (ROHDEN, 2011; NETO; OLIVEIRA e RAMOS, 2011). Todavia,

esse assunto é muito controverso, não havendo ainda um consenso na literatura científica.

A argamassa armada desenvolvida no Brasil nos últimos cinquenta anos é potencialmente um microconcreto de alto desempenho. Devido às suas propriedades de elevada resistência mecânica e durabilidade, ou ainda pela sua aplicação econômica, particularmente na construção civil industrializada. A tecnologia é diferente da desenvolvida em outros países, pois tem potencial de um microconcreto armado de alto desempenho, devido às suas altas características de desempenho estrutural, que podem ser alcançadas, de forma econômica, na aplicação na indústria da construção (CAMPOS, 2002).

Uma observação importante que se faz, por inferência da revisão bibliográfica realizada, é quanto à diferenciação dos termos argamassa estrutural e microconcreto. O termo argamassa estrutural ou argamassa armada foi tradicionalmente utilizado para designar materiais de reparo ou reforço, elementos pré-moldados com seções transversais abertas ou vazadas e de pequenas espessuras, em torno de 20 mm a 25 mm. Já o microconcreto, além destas designações, refere-se também ao concreto com as mesmas aplicações do concreto convencional, apenas com seções transversais reduzidas.

4. MAPEAMENTO LITERÁRIO

A seguir é apresentado um mapeamento literário sobre o microconcreto, dividido em análise bibliométrica e análise qualitativa. A forma de abordagem serviu para seleção dos trabalhos que compõem este artigo.

4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A fim de situar sobre o seu grau de amadurecimento na comunidade científica, foi realizada uma busca nas bases Engineering village, Science direct, Web of science e Scopus. As buscas ocorreram em janeiro de 2017, com a string:

microconcrete, relativa a trabalhos da categoria de Engenharias I. Na busca inicial nas bases de pesquisa foram localizados 561 títulos. Primeiramente, foram eliminados os títulos em duplicidade, ficando num total de 423 títulos e, posteriormente, foi realizada uma seleção por títulos de trabalhos que poderiam contribuir sobre o tema microconcreto, como material da indústria da construção civil. Buscaram-se estudos no âmbito de seu comportamento mecânico, propriedades de durabilidade, modelagem estrutural, construção de modelos ou miniaturas e microestrutura, chegando-se ao número de 54 artigos; destes, foi realizada uma busca nas bases de pesquisa em que foi possível baixar na íntegra 23 artigos. A seguir foi realizada uma seleção de acordo com o resumo dos artigos, em que foram aderidos 46 artigos para as referências bibliográficas. Foram computados como pertinentes os 23 títulos de artigos sobre microconcreto, que apesar de não ter sido possível baixá-los na íntegra foram usados para formação de uma linha do tempo. A listagem com os 46 artigos selecionados pode ser consultada no Quadro 1 do Apêndice A.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

Com o intuito de se demonstrar o número e o desenvolvimento de pesquisas relevantes na linha de microconcretos pelo mundo, foi elaborada uma linha do tempo com a distribuição das publicações relevantes, a fim de se verificar e demonstrar em que nível se encontra o estado da arte desse tema.

Nos anos 70 foram localizados quatro artigos referentes ao microconcreto: modelo de ponte (SWANN RA, 1970); modelo de casca cilíndrica (DARVALL; BILLINGTON, 1971); modelo de paredes de edifícios (HANSEN; RAMAKRISHNAN, 1978) e testes em placa (SEETHARAMULU et al., 1979).

Já nos anos 80, foram localizados 15 artigos, e os que mais se destacam são os estudos estruturais em microconcreto (KAVYRCHINE,

1980); nos demais anos, foram pesquisados modelos em microconcreto de casca hiperbólica-paraboloide (SAMBANTHAN; ARAVINDAN; RAO, 1981); modelo de vigas em microconcreto à flexão para comparativos (EVANS; CLARKE, 1981); modelo armado e protendido em microconcreto (SWAMY, 1981); determinações experimentais e numéricas da resistência e do módulo no microconcreto (BRESSI; FERRARA, 1982); testes em modelo de microconcreto para torre de arrefecimento hiperbólica (SWARTZ et al., 1985); comportamento da deformação em placas planas e curvas do microconcreto com fibras de extrato de fusão (KEARNS; MCCONNELL, 1988) e comportamento de placas planas e curvas de microconcreto reforçadas com fibras de aço (KEARNS; MCCONNELL, 1989).

Na década de 90 foram publicados 11 artigos, dentre estes, uma pesquisa experimental do comportamento estático e dinâmico de microconcretos sob alta taxa de deformação (CHIEM; SIEFFERT; HWAJIA, 1990) e um estudo do microconcreto de alto desempenho para o confinamento de resíduos industriais (COCHET; CARIOU, 1992), além de artigos sobre o microconcreto fluido - propriedades e aplicações (DECTER et al., 1990) e sobre a Influência da sílica ativa nas propriedades de fratura da pasta e do microconcreto (MINDESS; ALEXANDER, 1994).

Na primeira década do século XXI, foram publicados sete artigos, com destaque ao artigo sobre microconcreto funcional: a incorporação de zeólitos e nanopartículas inorgânicas em microestruturas de cimento (COLSTON et al., 2000). Além deste, tiveram também destaques duas outras pesquisas: a que avaliou o efeito da granulometria e da morfologia superficial dos microagregados no desempenho mecânico do microconcreto (FELEKOĞLU, 2007), e a pesquisa em que se estudaram os efeitos do tipo de fibra e da estrutura da matriz no desempenho mecânico de compósitos de microconcreto autoadensáveis (FELEKOĞLU; TOSUN; BARADAN, 2009).

Na segunda década do séc. XXI, foram publicados 9 artigos, podendo-se destacar, em 2014, pesquisas sobre o microconcreto reforçado com fibras curtas provenientes da reciclagem mecânica de resíduos plásticos de fibras de vidro (GARCÍA; VEGAS; CACHO, 2014) e sobre o microconcreto com substituição parcial de cimento Portland por cinzas volantes e adição de cal hidratada (LORCA et al., 2014). Em 2016, um estudo interessante avaliou o impacto da carbonatação na microestrutura e a solubilidade dos principais constituintes do microconcretos com alcalinidades variáveis devido à substituição do cimento Portland comum por cinzas volantes (BRANCH et al., 2016).

A Figura 1 apresenta a distribuição dos artigos e trabalhos científicos publicados na plataforma CAPES, relacionados ao tema microconcreto, assunto este que não é novo, pois o primeiro artigo encontrado é de 1970. Trata-se, portanto, de um tema que é estudado de forma constante, com poucos artigos publicados anualmente.

Pode se observar que existe uma tendência por entender melhor as propriedades do material microconcreto a partir da década de 90, diferente das décadas anteriores em que o microconcreto era usado mais como um material para a construção de modelos de edificações ou de protótipos reduzidos de obras de arte especiais, não tendo, assim, uma abordagem consistente como um material estrutural de obras em condições reais de utilização. Também nos anos 90, iniciaram-se as pesquisas em microconcretos de alto desempenho com adição de fibras e com adição de pozolanas. Os países que mais se destacaram em publicações, ressaltando que a classificação levou em consideração a maioria de pesquisadores de mesma nacionalidade envolvidos na pesquisa, desde o ano 2000, foram o Brasil, o Reino Unido, a Turquia, a China e a Espanha.

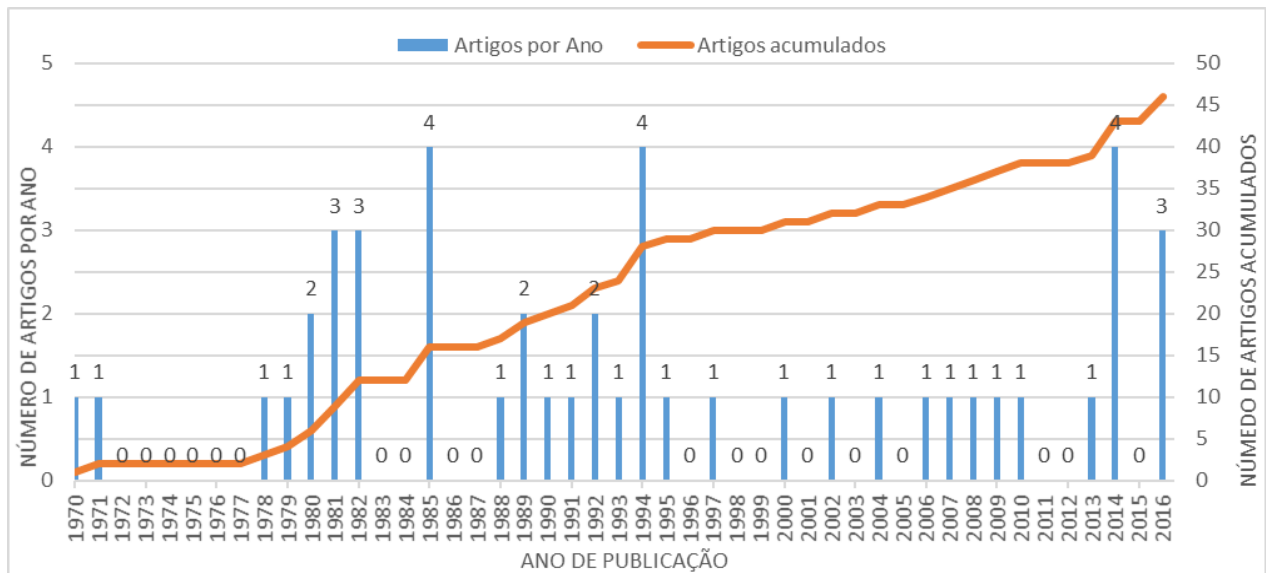


FIGURA 1: Linha do tempo dos artigos publicados na plataforma CAPES relacionados a microconcreto.

FONTE: Autoria própria.

A Figura 2 apresenta os principais assuntos abordados pelos artigos aderentes à pesquisa, sendo que alguns trabalhos possuem mais de um assunto principal. Pode-se observar que existem muitos trabalhos que tratam de modelos desenvolvidos com o microconcreto, principalmente na construção de protótipos de placas e cascas, e vários possuem abordagens

sobre o comportamento mecânico. Outros artigos consideram o uso de fibras de diversos tipos, como fibras de aço, polipropileno e de polímeros reciclados, além do uso de adições pozolânicas, tais como a sílica ativa e a cinza volante. Demais temas tiveram poucas abordagens relacionadas ao microconcreto.

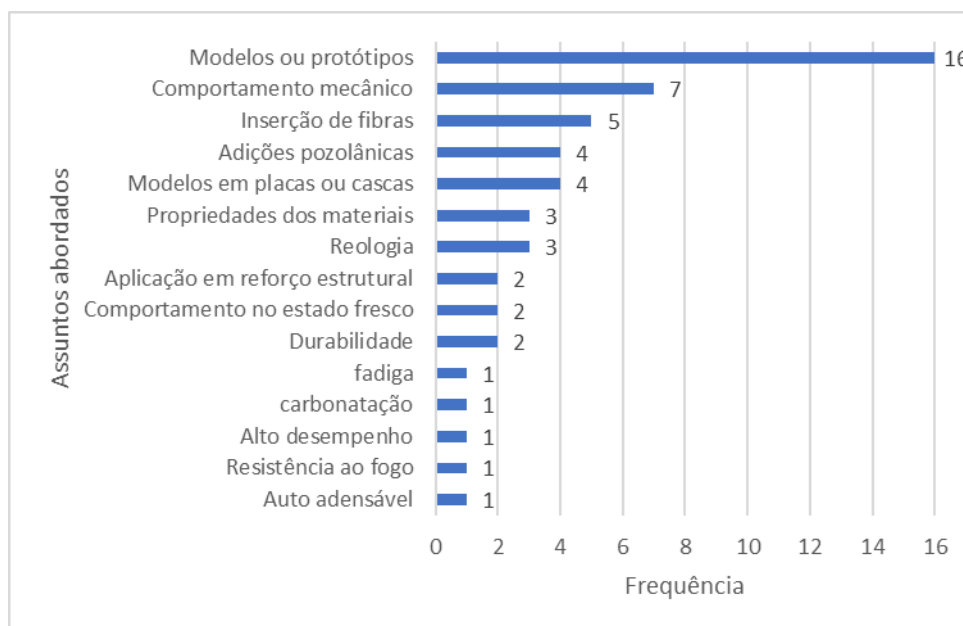


FIGURA 2: Frequência dos principais assuntos abordados nos artigos selecionados sobre o microconcreto.

FONTE: Autoria própria.

4.2.1 Anos 70 e 80

Os artigos dos anos 70 e 80 são de difícil acesso e, em sua maioria, são trabalhos publicados em congressos, tratando o microconcreto como material para a criação de modelos experimentais, a fim de se comparar com os resultados analíticos.

Segundo Swamy (1981), os modelos de microconcretos foram aceitos como uma ferramenta de projeto para estruturas de concreto armado e pretendido por quase duas décadas (nos anos 60 e 70), tendo-se, no início dos anos 80, o registro de um acentuado interesse nesse tema. As estruturas nesse cenário dos anos 80 passaram a ser mais inovadoras e complexas e, apesar das informações disponíveis, o uso de modelos estruturais nos projetos ainda apresentava vários problemas e limitações, exceto no caso de estruturas realmente simples. Avaliar o comportamento pós-fissuração de protótipos na faixa inelástica ainda constituía o principal obstáculo no uso de modelos estruturais em concreto armado e pretendido.

Como exemplo de pesquisa que abordou o uso do microconcreto como constituinte para a produção de protótipos, pode-se citar o estudo de Sambanthan, Aravindan e Rao (1981), que usou o microconcreto para realizar uma pesquisa experimental em uma casca paraboloide hiperbólica, visando comparar os resultados com a análise da casca em elementos finitos, pelo método do elemento curvo triangular. No experimento, os referidos autores empregaram agregados com dimensão máxima característica (DMC) de 2,4 mm na laje, e de 20 mm nas vigas de canto. O trabalho apresentou boa concordância entre os valores experimentais e os valores analíticos. A estrutura hiperbólica foi submetida a uma carga uniformemente distribuída e a placa confeccionada com microconcreto com espessura de 15 mm. Os resultados experimentais foram comparados com uma análise de elementos finitos, no qual o modelo teve o intuito de analisar o comportamento da casca em seu estágio final.

Bressi e Ferrara (1982) utilizaram o microconcreto para realizar os ensaios

experimentais em vigas com entalhe para fissuração induzida e compararam com os resultados analíticos em elementos finitos; os pesquisadores utilizaram agregados com diâmetro máximo característico de 10 mm.

Swartz et al. (1985) construíram e testaram modelos de cascas para torres de resfriamento visando avaliá-los sob ação de pressão uniforme, tendo utilizado, para tanto, um microconcreto com características especiais. Os referidos autores fizeram duas considerações: primeiramente que a resistência no estado endurecido deveria ser similar aos concretos utilizados nas cascas; outra questão foi que a mistura deveria ser bombeável. Nesse trabalho, utilizou-se um agregado com dimensão máxima característica de 2,7 mm. A principal contribuição da pesquisa foi que os resultados forneceram dados para que os métodos gerais pudessem ser verificados e validados.

Kearns e Mcconnell (1989) foram pioneiros no uso do microconcreto com fibras, no estudo do comportamento de modelos. Eles utilizaram placas planas e curvas, com a inserção de fibras de extrato de fusão de aço inoxidável e fibras de aço. Os resultados mostraram os benefícios e as limitações do uso de fibras em elementos estruturais de concreto fino e os efeitos benéficos da curvatura no comportamento estrutural das placas. O proporcionamento do microconcreto foi de 1:3 (em massa), com relação a/c 0,5 e dimensão máxima da areia igual a 5 mm. Os resultados demonstraram melhora no desempenho à flexão na fase de pré e pós-fissuração.

4.2.2 Anos 90

Nos anos 90, houve diversas pesquisas relacionadas ao comportamento do material. Pode-se destacar algumas pesquisas como o trabalho de Cochet e Cariou (1992), que se refere a um microconcreto de alto desempenho com adição de fibras para o confinamento de resíduos industriais. Este estudo analisou o comportamento do material, observando-se a natureza dos

agregados, a dimensão e a quantidade de fibras. O objetivo da pesquisa foi o desenvolvimento de um microconcreto que pudesse imobilizar o resíduo radioativo sem a necessidade do uso de parede dupla. Foi necessário produzir um microconcreto que apresentasse um desempenho eficiente e duradouro na constituição da barreira do resíduo. Um dos pontos frágeis do reservatório era a argamassa selante do encaixe da tampa no recipiente. Este artigo mencionou o uso de aditivos orgânicos para limitar a quantidade de água na mistura. Utilizaram-se fibras de aço, de ferro fundido e de vidro, além de agregados com dimensões máximas de 1 mm a 8 mm.

Alcançou-se a resistência à compressão máxima de 147 MPa aos 28 dias para as misturas compostas por agregados silicosos com DMC de 1 mm e coríndons com DMC de 1 mm a 8 mm. O resultado foi obtido com a adição de fibras de aço de 0,2 mm de diâmetro e 17 mm de comprimento, no percentual de 3,4 % em relação à massa da mistura. O proporcionamento, devido à adição de fibras, não sofreu alteração da resistência à compressão e gerou melhoria significativa na resistência à tração, que foi de 14,4 MPa. As fibras reduziram as taxas de porosidade e permeabilidade. Adições maiores de fibras não foram eficientes, devido ao fato delas aumentarem a quantidade de água demandada na mistura. A fibra desenvolve uma matriz interna tridimensional, o que oferece propriedades adicionais em relação ao choque ou impacto.

Mayne, Hover e Kulhawy (1994) estudaram modelos de microconcreto para fundações. Eles avaliaram as propriedades estruturais do microconcreto enquanto jovem (1, 2, 4 e 11 dias) e sob condições especiais de cura, pois o solo pode afetar a rigidez relativa do sistema solo-eixo. Para a concepção do microconcreto, foram utilizados agregados graúdos com DMC de 6 mm e agregado miúdo com DMC de 4,75 mm. O microconcreto foi usado para a moldagem de estacas in situ a fim de simular estacas de concreto, e foram monitoradas as características mecânicas do material, em

especial o módulo de elasticidade em diversas idades. Foi desenvolvido um microconcreto para ser utilizado na execução de estacas, cujos eixos foram perfurados em argila e areia e as propriedades de resistência e deformação foram monitoradas nas primeiras idades. O intuito foi de se obter um material com resistência e rigidez suficientes em idades iniciais. A cura das amostras em diferentes solos afetou o desenvolvimento do módulo estático (ensaio em laboratório e no campo por meio de ultrassom) e a resistência à flexão, mas teve pouco efeito na resistência à compressão. Em geral os resultados indicaram boa funcionalidade para o manuseio e rigidez da peça, após o período de cura de 3 dias para a realização dos testes da base.

4.2.3. Primeira década do século XXI

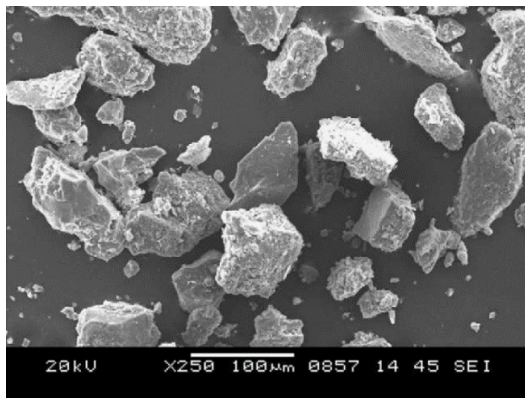
A fim de se estudar o comportamento dinâmico do microconcreto, uma série de experimentos de impacto em placas foi realizada, em direções tanto longitudinais quanto laterais. Tais estudos concluíram que a resistência ao cisalhamento desse sistema parece ser independente dos agregados, porém de relevante dependência da matriz cimentícia. Nesses estudos, conduzidos por Tsemelis e Proud (2006), para os fins de proporcionamento dos microconcretos, foram utilizados 70% de dolerito (rocha magmática hipabissal, de textura ofítica, constituída essencialmente por plagioclásios básicos, piroxênio, magnetita e ilmenita) em grão fino e 30% de pasta de cimento, em massa.

Segundo Felekoglu (2007), o microconcreto pode ser definido como um material à base de cimento de alto desempenho proporcionado por microagregados cujos tamanhos de partículas variam de cerca de 0,5 mm a menos de 1 μ m. A incorporação de microagregados melhora a densidade por meio do empacotamento das partículas no material cimentício; dessa forma as propriedades reológicas e mecânicas dos microconcretos são

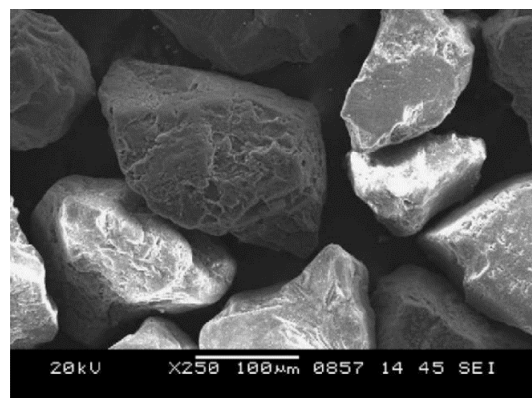
melhoradas. Os resultados desses autores mostraram que, além da granulometria, a forma das partículas e a morfologia da superfície dos microagregados também devem ser quantitativamente determinadas. O sucesso da caracterização depende de forma significativa da preparação, representação adequada das imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV e seleção adequada da metodologia de análise. O primeiro passo da proporção da mistura de um microconcreto deve ser a caracterização dos microagregados. As principais conclusões advindas desse estudo foi que a porosidade superficial dos microagregados de calcário (Figura 3a) foi extremamente superior à do quartzo (Figura 3b), tanto da faixa granulométrica do material moído

como do extremamente moído.

O resultado comparativo da demanda de água da mistura, quando o índice de finura foi constante, mostrou que as propriedades da textura superficial foram mais importantes na determinação do proporcionamento quando foram comparados microgrupos de calcário e quartzo. No caso do calcário (Figura 4a) e do quartzo (Figura 4b) extremamente moídos, o efeito do tipo de microagregado na resistência à compressão não foi similar ao efeito na resistência à flexão. Isso pode ser atribuído à possível “coagulação” da pedra calcária fina, devida à diferente rugosidade da superfície quando comparada ao quartzo no microconcreto em seu estado fresco (FELEKOGLU, 2007).



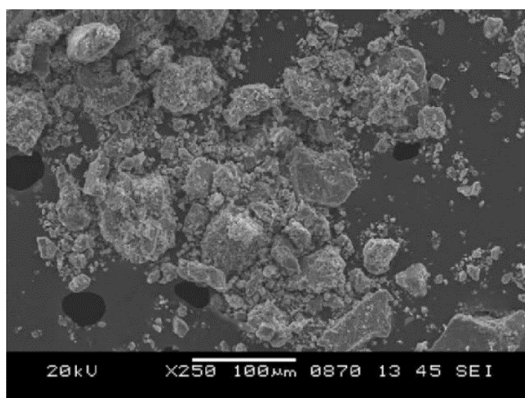
[a]



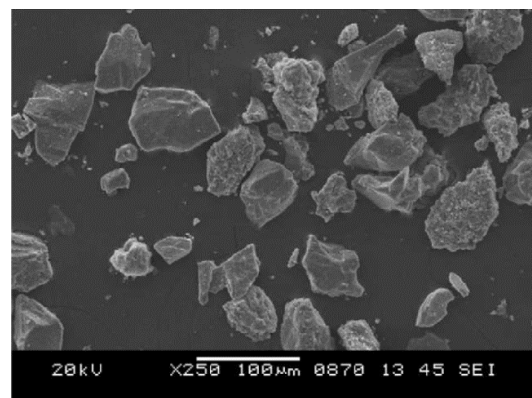
[b]

FIGURA 3: Imagem do MEV: [a] microagregado de calcário; [b] microagregado de quartzo.

FONTE: Felekoglu (2007).



[a]



[b]

FIGURA 4: Imagem do MEV: [a] agregados extremamente moídos de calcário; [b] agregados extremamente moídos de quartzo.

FONTE: Felekoglu (2007).

Segundo Felekoglu, Tosun e Baradan (2009), o principal parâmetro para se obter sucesso em um projeto com compósitos de cimento é a compatibilidade das propriedades da matriz com a fibra. Ao estudarem compósitos cimentícios (com e sem adição de cinza volante) com fibras de acetato de polivinila (PVA) e de polipropileno, os referidos autores verificaram que as fibras de PVA comportaram-se de forma semelhante nos dois tipos de cimento empregados (com e sem adição), devido à sua estrutura superficial relativamente áspera. A ruptura da fibra foi o principal mecanismo de colapso. O tamanho máximo do agregado utilizado foi da ordem de 100 μm .

O grau de tixotropia e o comportamento do microconcreto autoadensável foram monitorados por imagens de câmera, onde se verificou que as fibras de polipropileno se alongaram e escorregaram facilmente na matriz. A adição de cinzas volantes proporcionou uma melhora da ligação friccional entre a matriz e a fibra. O experimento usou cerca de 1% de adição de fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento e um teor elevado de substituição de cinza volante, da ordem de 50%. Imagens de MEV do concreto com adição de fibras podem ser vistas na Figura 5 (FELEKOĞLU; TOSUN; BARADAN, 2009).

4.2.4. Segunda década do século XXI até os dias atuais

O uso de fibras de vidro recicladas

no microconcreto pode ser viável, desde que a seleção e o método de trituração dos plásticos derivados de fibras de vidro sejam adequados, pois as partículas esféricas de poeira ou em lascas podem influenciar negativamente as propriedades mecânicas. As fibras obtidas no processo de reciclagem mecânica otimizada proporcionaram aumento nas resistências à compressão e à flexão, em relação ao microconcreto convencional, da ordem de 22% e 16%, respectivamente. Não se notaram efeitos negativos de retração e de reatividade das fibras no microconcreto, sendo o seu percentual limitado devido à perda de trabalhabilidade acarretada na mistura fresca (GARCÍA; VEGAS; CACHO, 2014).

A substituição parcial do cimento pela cinza volante tem limitações em função do consumo do hidróxido de cálcio gerado na mistura cimentícia, que pode ser detectado pelo indicador de fenolftaleína (método colorimétrico), sendo, assim, limitado para teores acima de 50% de substituição do cimento, em massa. A pesquisa conduzida por Lorca et al. (2014) mostrou que os microconcretos com substituição de cimento por cinza volante na faixa de 15% a 25% não necessitam da adição de cal hidratada, pois não houve queda significativa na resistência mecânica, porém para microconcretos com substituição do cimento por cinza volante no teor de 50%, a adição de 20% de cal hidratada melhorou significativamente a resistência mecânica, chegando a acréscimos de resistência da ordem de 34%.

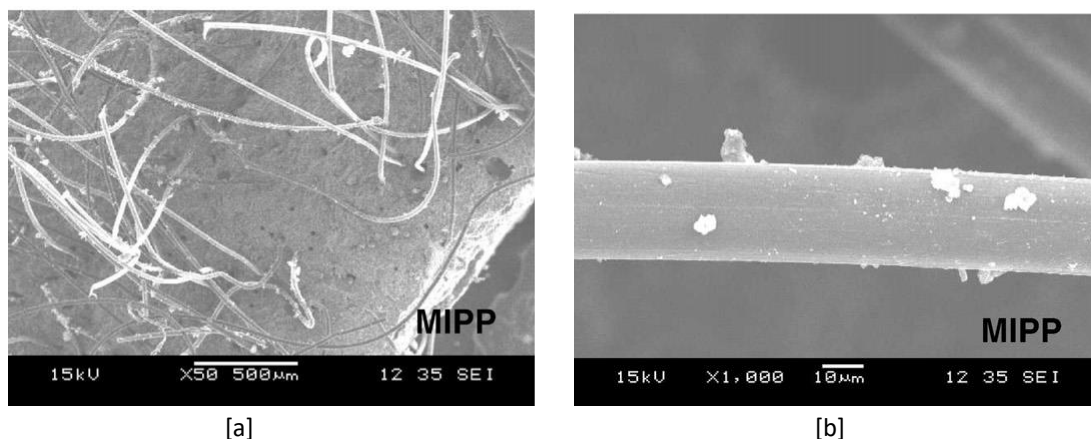


FIGURA 5: Microconcreto com adição de fibras de polipropileno: [a] ampliação em 50 vezes; [b] ampliação de 1000 vezes.

FONTE: Felekoglu; Tosun e Baradan (2009).

Branch et al. (2016) estudaram o impacto da carbonatação em microconcretos, para isso utilizando amostras com diferentes teores de alcalinidade. As variações de pH foram possíveis mediante a substituição de parte do cimento por cinza volante, mais especificamente nos teores de 2% e 39%. As mudanças foram avaliadas por meio de alterações na microestrutura, na solubilidade e na migração dos principais constituintes (cálcio, alumínio e silício). Realizaram-se caracterizações gerais e análises da microestrutura nas amostras, de acordo com ensaios de termogravimetria, carbonos inorgânicos totais, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por dispersão de energia, além da medição da profundidade de carbonatação empregando-se indicador à base de fenolftaleína. O estudo mostrou que a taxa de carbonatação está inversamente relacionada à alcalinidade do material; a migração e reprecipitação de espécies mais solúveis (cálcio e silício) são causadas devida à diferença na solubilidade das fases formadas. Observou-se também que a quantidade e a orientação dos agregados podem gerar caminhos preferenciais de difusão do CO₂ em algumas regiões do microconcreto ou podem inibir sua difusão em outros caminhos, tendo em vista o aumento da propagação na interface pasta-agregado.

Ferrari, Arquez e Hanai (2016) usaram o microconcreto como componente em uma pesquisa de análise estrutural do comportamento de protótipos de viga, na qual esse material foi inserido em diferentes configurações do banzo tracionado reconstruído por microconcreto com fibras de aço para o reforço de vigas. Na produção do microconcreto foi utilizado um cimento de alta resistência inicial, com consumo de 443 Kg/m³ e um agregado com DMC igual a 10 mm. As adições de fibras variaram de 2% a 3%, tendo sido adicionados volumes variáveis entre uma fibra de 25 mm de comprimento e uma microfibras com 13 mm de comprimento, ambas com ganchos terminais. O melhor resultado foi alcançado com a

reconstituição completa da totalidade da zona de tensão das vigas, que proporcionou um aumento da capacidade de carga e da rigidez, obtendo-se uma redução considerável na abertura de fissuras.

Um último estudo a destacar, é o Varhen et al. (2016), que analisou o impacto da substituição do cimento por filer calcário no comportamento reológico e de retração por secagem dos microconcretos que são utilizados para reparar revestimentos. A substituição foi feita tentando-se obter o mesmo volume de pasta para manter esse parâmetro igual para todas as misturas e apenas avaliar o efeito da substituição. Maiores substituições do cimento por filer calcário diminuíram a retração por secagem, o que causou menor contração diferencial entre o material de reparo e o substrato existente, gerando tensões de tração mais baixas no material de reparo. Algumas aplicações restringem a espessura do revestimento e, conseqüentemente, o tamanho do agregado que é usado; portanto, é de interesse investigar meios de redução da retração, que mantenham o menor volume de pasta. Maiores volumes de enchimento na pasta geraram valores menores de espaçamento entre as partículas, o que aumentou a viscosidade plástica dos microconcretos. O maior volume de filers na pasta fornece melhores condições de aplicação para o microconcreto como material autocompactante, devido ao efeito positivo sobre a consistência do material. A estratégia de substituição de cimento por filers na pasta pode ajudar a compensar a falta de aglomerante, melhorando o empacotamento do material. Maiores volumes de filers na pasta produziram, assim, menores valores de retração por secagem. Como era esperado, uma maior substituição de cimento por filer calcário ocasionou uma redução da resistência à compressão, porém para os microconcretos com baixo consumo de cimento, atingiram-se resistências à compressão relativamente altas (13 MPa, 32 MPa e 35 MPa, aos 28 dias), o que demonstra que a substituição do cimento por finos pode ajudar a compensar a falta de aglomerante e a melhorar o empacotamento do material.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos anos 70 e 80 o microconcreto era basicamente empregado como uma ferramenta de projeto para a modelagem de estruturas de concreto, sendo aplicado em modelos de pontes, de cascas cilíndricas e de paredes de edifícios.

No final dos anos 80, foram publicados os primeiros artigos referentes ao uso de fibras no microconcreto, tendo-se como conclusão que as fibras de extrato de fusão e de aço inoxidável melhoraram o desempenho à flexão na fase de pré e pós-fissuração (KEARNS; MCCONNELL, 1988, 1989).

Nos anos 90 o grande destaque foi a pesquisa de Cochet e Cariou (1992), que abordou o uso de diversos tipos de fibras no microconcreto, inclusive já considerando o microconcreto de alto desempenho, com o uso de aditivos orgânicos, tendo-se alcançado uma resistência da ordem de 147 MPa aos 28 dias. Os melhores resultados foram obtidos com fibras de aço longas, e se concluiu que essas fibras alteram de forma significativa a porosidade e a permeabilidade do microconcreto.

No século XXI se intensificaram as pesquisas sobre o microconcreto como material estrutural e em relação à sua microestrutura. Citam-se García, Vegas e Cacho (2014), que pesquisaram sobre a incorporação de fibras de vidro recicladas no microconcreto, os quais afirmaram que esta adição pode ser viável, desde que a seleção e o método de trituração dos plásticos sejam adequados. Diversos outros estudos neste século, até os dias atuais, demonstraram a evolução do microconcreto como um material estrutural, bem como sua aplicabilidade cada vez mais significativa na tecnologia dos materiais de construção. Foram destacados os estudos de Tsembelis e Proud (2006), Felekoglu (2007), Felekoglu, Tosun e Baradan (2009), Lorca et al. (2014), Branch et al. (2016), Ferrari, Arquez e Hanai (2016) e Varhen (2016).

Contudo, após a revisão sistemática da literatura, foram identificadas as seguintes lacunas de conhecimento, as quais podem representar pontos de melhoria ou temas para futuras investigações:

- a) a escassez de pesquisas referentes ao comportamento do compósito de microconcreto diante da carbonatação, que é um quesito importante do desempenho quanto à durabilidade dos concretos e dos microconcretos. Esse tema se justifica em virtude do fato de que diariamente se desenvolve uma atmosfera com maiores teores de dióxido de carbono, além da crescente preocupação com as edificações antigas, com mais de 50 anos de uso;
- b) foram identificadas poucas abordagens relacionadas aos compósitos com adição de fibras de polipropileno, pois assim como afirmaram Georgiou e Pantazopoulou (2016), o estado da arte se encontra focado no uso de fibras sintéticas em misturas cimentícias autoadensáveis com agregados miúdos. O presente mapeamento também chegou a esta conclusão;
- c) foi levantado um único estudo sobre retração, de autoria do pesquisador Varhen (2016), e nenhuma abordagem foi obtida sobre a fluência em microconcretos, quesitos de grande importância para se explicar e melhor entender o comportamento de um material composto de agregados de pequena dimensão; neste caso, a pasta de cimento possui grande relevância em seu comportamento.

Assim, é importante entender o comportamento do microconcreto, verificando-se quesitos de durabilidade e de trabalhabilidade impostos pelo projeto estrutural. Com isso, viabiliza-se o seu uso lançando-se mão das tecnologias disponíveis no mercado, como a

autoadensabilidade e o uso de diferentes tipos de aditivos e de fibras. Um exemplo de uso demandado pela construção civil é na concretagem de elementos delgados em concreto (entre 2 cm e 10 cm de espessura).

A Figura 6 apresenta um fluxograma com os temas desenvolvidos sobre o microconcreto, temas que demandam mais aprofundamento e lacunas que devem ser exploradas para melhor entendimento do material e ampliação de sua utilização pela indústria da construção civil.

6. CONCLUSÕES

O mapeamento literário é uma importante ferramenta para se contextualizar e investigar o tema da pesquisa, em relação ao meio científico. Para o microconcreto, pode-se observar que é um tema abordado desde os anos 70 e que existem 46 artigos relevantes sobre o assunto nas bases internacionais de busca. Trata-se de um tema de grande relevância para o meio científico, pois o material pode oferecer muitos benefícios à construção civil, com o desenvolvimento de

pesquisas que proporcionem melhor entendimento do material, para que possam ser desenvolvidas tecnologias voltadas a preencher lacunas no mercado, como, por exemplo, a oferta de um material que tenha um proporcionamento com baixo ou nenhum percentual de agregados graúdos, de alta resistência e com comportamento dúctil. Estas características podem ser alcançadas com compósitos de microconcreto de alto desempenho.

Verifica-se que o microconcreto possui inúmeras aplicações: nos anos 70 e 80 foi muito utilizado para a execução de protótipos, de modo a se estudar o desempenho de estruturas e peças estruturais; posteriormente, a partir dos anos 90, iniciaram-se pesquisas com o intuito de entender o comportamento da microestrutura do material, por meio de variações mais importantes em seus proporcionamentos, como a incorporação de adições minerais e fibras variadas, com enfoque principal no desempenho mecânico do material. Os estudos de forma geral, mesmo os atuais, pouco têm se dedicado a avaliar a durabilidade dos microconcretos.

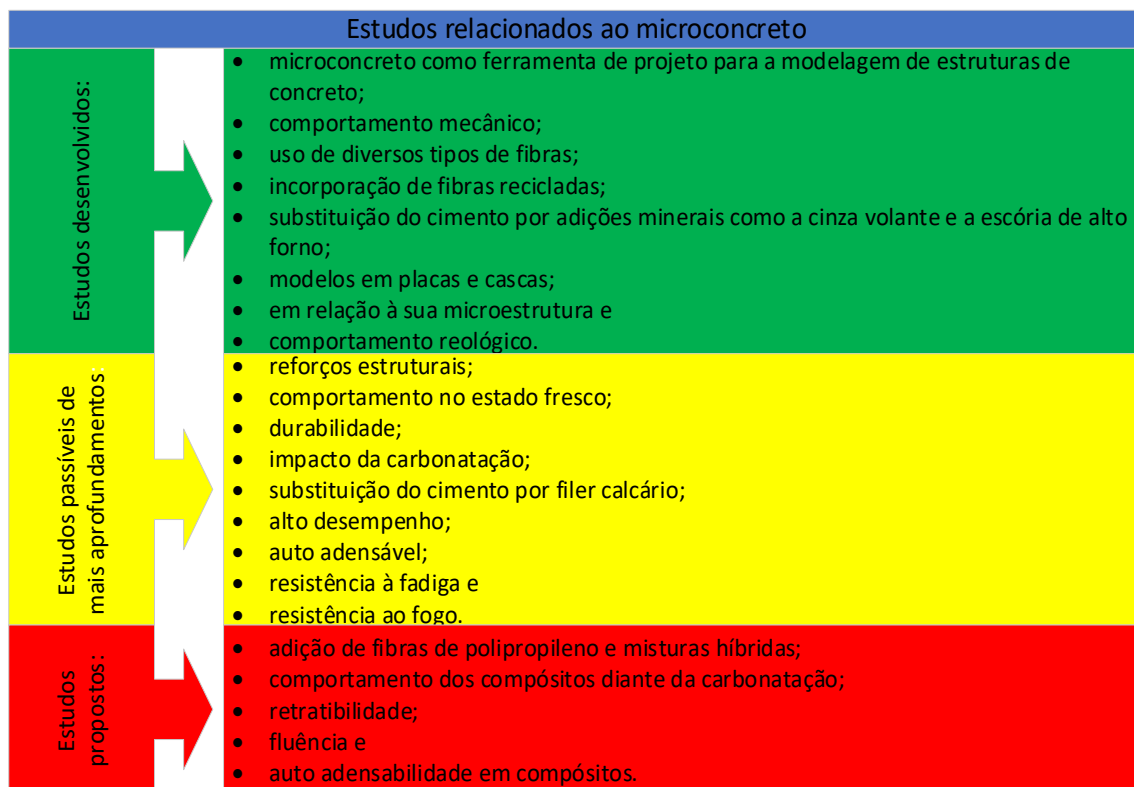


FIGURA 6: Fluxograma dos temas pesquisados e daqueles a serem aprofundados ou explorados relacionados ao microconcreto.

FONTE: Autoria própria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1º ed. São Paulo: PINI, 2000.

BRANCH, J. L.; KOSSON, D. S.; GARRABRANTS, A. C.; HE, P. J. **The impact of carbonation on the microstructure and solubility of major constituents in microconcrete materials with varying alkalinities due to fly ash replacement of ordinary Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 89, p. 297–309, 2016.

BRESSI, D. R.; FERRARA, G. **Experimental and numerical determination of k_{ic} and g_{ic} for micro concrete**. In: Advances in Fracture Research. [s.l.] Elsevier, 1982. p. 2719–2724.

CAMPOS, P. E. F., **Da Argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**. 2002. 208 p. Tese. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2002.

CHIEM, C.Y.; SIEFFERT, J.G.; HWAJIA, B. H. **Experimental investigation of the static and dynamic behaviour of micro-concretes under high strain rate**. Materiaux et constructions, v. 23, n. 138, p. 426–435, 1990.

COCHET, G.; CARIOU, B. **Very high performance micro-concretes for the confinement of industrial waste**. Cement and Concrete Research, v. 22, n. 2–3, p. 319–324, mar. 1992.

COLSTON, S. L.; O'CONNOR, D.; BARNES, P.; MAYES, E. L.; MANN, S.; FREIMUTH, H.; EHTFELD, W. **Functional micro-concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano-particles into cement micro-structures**. Journal of Materials Science Letters, v. 19, n. 12, p. 1085–1088, 2000.

DARVALL, P.; BILLINGTON, D. M. R. **Model analysis of a continuous microconcrete cylindrical shell**. J Amer Concrete Inst, v. 68, n. 11, p. 832–843, 1971.

DECTER, M., DIAMOND, D., LAMBE, R.W., MUELLER, D. **Fluid microconcrete - properties and application**. San Diego, CA, USA: ASCE, New York, NY, United States, 1990. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0028532210&partnerID=40&md5=f21eb6078172faa66b99368b58b2871e>>

EVANS, D.J., CLARKE, J. L. **Comparison between the flexural behaviour of small-scale microconcrete beams and that of prototype beams**. Tunnels and Tunnelling, n. 542, p. 32p, 1981.

FELEKOĞLU, B. **Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 6, p. 481–489, 2007.

FELEKOĞLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B. **Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 11, p. 1023–1032, 2009.

FERRARI, V. J.; ARQUEZ, A. P.; HANAI, J. B. **Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) inserted in different configurations of the tensile zone retrofitting with microconcrete containing steel fibers to the strengthening of beams**. Acta Scientiarum. Technology, v. 38, n. 4, p. 437, 2016.

GARCÍA, D.; VEGAS, I.; CACHO, I. **Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete**. Construction and Building Materials, v. 64, p. 293–300, 2014.

GEORGIU, A.; PANTAZOPOULOU, S. **Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites**. Construction and Building Materials, v. 125, p. 1216–1228, 2016.

HANSEN, M.R.; RAMAKRISHNAN, V. **Experimental investigation of microconcrete models of shear wall buildings**. Indian Concr J, v. 52, n. 10, p. 272–275, 1978.

KAVYRCHINE, M. **Structural Studies in Microconcrete**. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, n. 389, p. 69–92, 1980.

KEARNS, C. F.; MCCONNELL, G. M. **Load-deformation behaviour of planar and curved microconcrete plates reinforced with melt extract fibres**. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 10, n. 3, p. 159–166, 1988.

KEARNS, C. F.; MCCONNELL, G. M. **Structural behaviour of thin planar and curved microconcrete plates reinforced conventionally and with steel fibres**. Materials and Structures Materiaux et constructions, v. 22, n. 5, p. 357–363, set. 1989.

LORCA, P.; CALABUIG, R.; BENLLOCH, J.; SORIANO, L.; PAYÁ, J. **Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition**. Materials and Design, v. 64, p. 535–541, 2014.

MAYNE, P. W.; HOVER, K. C.; KULHAWY, F. H. **Microconcrete for model drilled shaft foundations**. Construction and Building Materials, v. 8, n. 2, p. 127–135, 1994.

MINDESS, S., QU, L., ALEXANDER, M. G. **Influence of silica fume on the fracture properties of paste and microconcrete**. Advances in Cement Research, v. 6, n. 23, p. 103–107, 1994.

NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência**. Revista Materia, v. 16, n. 2, p. 690–702, 2011.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** 2011. 134 p. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

SAMBANTHAN, T. G.; ARAVINDAN, P. K.; RAO, P. S. **Behavior of microconcrete hyperbolic-paraboloid shell.** *Experimental Mechanics*, v. 21, n. 6, p. 240–244, jun. 1981.

SEETHARAMULU; KAVETI; SINHA; SACHCHIDANAND N. **Tests on microconcrete continuous folded plates.** *ASCE J Struct Div*, v. 105, n. 7, p. 1457–1470, 1979.

SWAMY, R. N. **Reinforced and prestressed microconcrete models.** *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 3, n. 1, p. 49–50, fev. 1981.

SWANN RA. **Tests on a prestressed micro-concrete model of a three cell box beam bridge.** *Amer Concr Inst Publ SP-24*, p. 333–351, 1970.

SWARTZ, S. E.; CHIEN, C. C.; HU, K. K.; MOZAFFARIAN, H. **Tests on Microconcrete Model of Hyperbolic Cooling Tower.** n. March, p. 12–23, 1985.

TSEMBELIS, K.; PROUD, W. G. **The dynamic behavior of micro-concrete.** *AIP Conference Proceedings*, p. 1496–1499, 2006.

VARHEN, C.; DILONARDO, I.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. F.; FIGUEIREDO, A. D. **Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes.** *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 375–386, 2016.

APÊNDICE A

QUADRO 1: Artigos levantados sobre microconcreto na base de dados do Portal da Capes via mapeamento literário.

Seq.	Autor(es)	Título do artigo	Ano
1	Swann	Tests on a prestressed micro- concrete model of a three cell box beam bridge	1970
2	Darvall, Billington, Mark	Model analysis of a continuous microconcrete cylindrical shell	1971
3	Hansen, Ramakrishnan	Experimental investigation of microconcrete models of shear wall buildings.	1978
4	Seetharamulu, Kaveti, Sinha, Sachchidanand	Tests on microconcrete continuous folded plates	1979
5	Kumar, Beak, Dupuch,	Scaling & construction problems in tests - micro-concrete models.	1980
6	Kavyrchine, Michel	Structural Studies in Microconcrete.	1980
7	Sambanthan, Aravindan, Rao	Behavior of microconcrete hyperbolic-paraboloid shell	1981
8	Evans, Clarke	Comparison between the flexural behaviour of small-scale microconcrete beams and that of prototype beams.	1981
9	Swamy	Reinforced and prestressed microconcrete models	1981
10	Bolton, Steedman	Centrifugal testing of microconcrete retaining walls subjected to base shaking.	1982
11	Bressi, Ferrara	Experimental and numerical determination of kic and gic for micro concrete	1982
12	Watson, Alan, Ang, Thian	Reinforced microconcrete beams under impact loading.	1982
13	Sautner	Design and application of microconcrete structural models.	1985
14	Waldron, Perry, Pinkney	Maintaining similitude in prestressed microconcrete models.	1985
15	Hara, Tadakatsu, Ohtsuka, Takayoshi, Itagaki, Yutaka	Shear strength of shotcrete tunnel liners using a microconcrete model.	1985
16	Swartz, Chien, Hu, Mozaffarian	Tests on microconcrete model of hyperbolic cooling tower	1985
17	Pons, Ramoda, Maso	Influence of the loading history of fracture mechanics parameters of microconcrete: effects of low-frequency cyclic loading.	1988
18	Kearns, McConnell	Load-deformation behaviour of planar and curved microconcrete plates reinforced with melt extract fibres	1989
19	Kearns, McConnell	Structural behaviour of thin planar and curved microconcrete plates reinforced conventionally and with steel fibres	1989
20	Chiem, Sieffert, Hwaija	Experimental investigation of the static and dynamic behaviour of micro-concretes under high strain rate	1990
21	Hwaija, Chiem, Sieffert	Strain rate effects on the mechanical behaviour of microconcrete	1991
22	Kawaguchi, Yaginuma, Macam	Fatigue experiments of microconcrete beams under a running load	1992
23	Cochet, Cariou	Very high performance micro-concretes for the confinement of industrial waste	1992
24	Vantomme, De Visscher, Sol, De Wilde	Identification of complex material properties of microconcrete	1993
25	Vantomme, Habiyaremye	Modelisation of material damping of fibre reinforced microconcrete	1994
26	Mayne, Paul, Hover, Kenneth, Kulhawy, Fred	Microconcrete for model drilled shaft foundations	1994
27	Decter, Diamond, Lambe, Mueller	Fluid microconcrete - properties and application	1994
28	Mindess, Alexander	Influence of silica fume on the fracture properties of paste and microconcrete	1994
29	Decter, Gallivan, Gordon	Fluid microconcrete	1995

Continua ...

APÊNDICE A

QUADRO 1: Artigos levantados sobre microconcreto na base de dados do Portal da Capes via mapeamento literário.
(Continuação.)

Seq.	Autor(es)	Título do artigo	Ano
30	Caballero-Badillo	Preparation and properties of a novel microconcrete	1997
31	Colston, O'Connor, Barnes, Mayes, Mann, Freimuth, Ehrfeld	Functional micro-concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano-particles into cement micro-structures	2000
32	Panet, Cheng, Deschamps, Poncelet, Audoin	Microconcrete ageing ultrasonic identification	2002
33	da Silva, Proença, Billardon, Hild	Probabilistic approach to predict cracking in lightly reinforced microconcrete panels	2004
34	Tsembelis, Proud	The dynamic behavior of micro-concrete	2006
35	FelekoÄŸlu, Burak	Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete	2007
36	Netinger, Bjegovi, Kesegi	Influence of cement and aggregate type on fire resistance of microconcrete [Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona]	2008
37	Felekoglu, Tosun, Baradan	Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites	2009
38	Shen	Experimental study on the mechanical property of microconcrete in model test	2010
39	Zhang, Li, Tong	Dynamic compressive test and rate-dependent constitutive model of microconcrete	2013
40	Garcia,Vegas, Cacho	Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete	2014
41	Zhang, Li, Wang	Experimental study and constitutive model of dynamic compressive mechanical behavior of microconcrete under seismic strain rate	2014
42	Lorca, Calabuig, Benlloch, Soriano, Payá	Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition	2014
43	Kadam, Sachin, Singh, Yogendra, Li, Bing	Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete	2014
44	Varhen, Christian, Dilonardo, Isabela, de Oliveira Romano, Roberto Cesar, Pileggi, Rafael Giuliano, de Figueiredo, Antonio Domingues	Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes	2016
45	Ferrari, Arquez, de Hanai	Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) inserted in different configurations of the tensile zone retrofitting with microconcrete containing steel fibers to the strengthening of beams	2016
46	Branch, Kosson, Garrabrants, He	The impact of carbonation on the microstructure and solubility of major constituents in microconcrete materials with varying alkalinities due to fly ash replacement of ordinary Portland cement	2016

FONTE: Autoria própria.