

CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO – CONCEPÇÃO, DESEMPENHO E ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA NO MERCADO BRASILEIRO ATUAL.

ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE – CONCEPTION, PERFORMANCE AND TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS IN THE CURRENT BRAZILIAN MARKET.

Thaís de Siqueira Souza¹
Simone Perruci Galvão²

RESUMO

Para atender a uma demanda crescente do mercado por estruturas com formas e dimensões cada vez mais desafiadoras, o concreto convencional vem sendo incrementado por outros tipos de composições e traços, materializando projetos inusitados. Diante desta demanda surge o concreto de ultra alto desempenho (CUAD), material que alia as propriedades do concreto autoadensável (CAA), do concreto reforçado com fibra (CRF) e do concreto de alto desempenho (CAD). Neste artigo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o CUAD, em trabalhos publicados entre os anos de 2015-2021, buscando-se informações sobre traços utilizados, controle de produção e execução, propriedades desenvolvidas e análise técnica. Foi observado que os materiais mais utilizados para a fabricação do CUAD, são: Cimento (em geral, CP V-ARI); Sílica ativa (teores em torno de 25%, em relação à massa de cimento); Agregados miúdos (granulometria não superior a 3 mm); relação água/aglomerante (entre 0,20 e 0,26); fibras de aço, com ϕ 0,2 mm e 12 mm de comprimento) (teores entre 2% à 3%, em relação ao volume total do concreto) e aditivos superplastificantes (teores de 1% a 3%, em relação à massa do cimento). Os trabalhos investigados chegaram a resultados de 175 MPa de resistência à compressão, quando empregado a cura térmica associada a cura sob pressão. Tal elemento já é uma realidade no Brasil e no mundo, fazendo-se necessário a produção de normas técnicas aplicadas a este tipo de concreto e mais estudos que consolidem a utilização deste material, indicando melhores materiais, técnicas de produção e execução, além dos métodos de dosagem mais indicados e melhores custos.

Palavras-chave: concreto de ultra alto desempenho, concreto com pós reativos, concreto com fibras.

ABSTRACT

To answer a market growing demand for structures with increasingly challenging shapes and dimensions, the conventional concrete has been increased by other types of compositions and mix proportions, materializing unusual projects. Facing this demand, ultra high performance concrete (UHPC) emerges, a material that combines the properties of self-compacting concrete (SCC), fiber reinforced concrete (FRC) and high performance concrete (HPC). In this article, a bibliographical review on the UHPC was carried out, analyzing works published between the years 2015-2021, seeking information about concrete mixes used before, production and execution control, developed properties and technical and economic analysis. Was observed that the most used materials for the manufacture of the UHCP are: Cement (in general, CP V-ARI); Active silica (contents around 25%, in relation to the cement mass); Fine aggregates

¹ Bacharelanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2021.

² Doutora em Engenharia de Materiais, UFPE; Professora Adjunta da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA.

(granulometry not exceeding 3 mm); water/binder ratio (between 0.20 and 0.26); ϕ mm 12 steel fibers (contents between 2% to 3%, in relation to the total volume of the concrete) and superplasticizer additives (contents of 1% to 3%, in relation to the cement mass). The studied works reached results of 175 MPa of compressive strength, when thermal curing associated with pressure curing was used. This element is already a reality in Brazil and in the world, making it necessary to produce technical standards applied to this type of concrete and more studies to consolidate the use of this material, indicating better materials, production and execution techniques, in addition to methods recommended dosage and better costs.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete. Concrete.
Reactive Powder Concrete. Fiber Concrete.

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados pelo homem, por sua versatilidade, custo e propriedades adequadas aos mais vastos empregos.

Tendo este aspecto, por característica, propiciado uma tendência crescente do setor por estruturas com formas e dimensões cada vez mais desafiadoras, levando ao desenvolvimento de novas composições e melhorias do concreto, materializando projetos inusitados. Neste âmbito, vem surgindo, por exemplo, o concreto de ultra-alto desempenho (CUAD), uma evolução do concreto de alto desempenho (CAD).

No concreto com pós reativos (CPR), um dos tipos de CUAD, não são utilizados agregados graúdos em sua composição; logo, a presença dos vazios internos no mesmo e os pontos de concentração de tensões que promoveriam uma distribuição de cargas não homogêneas, aumentando a concentração de tensões e eventual falha da microestrutura do material, são minimizadas, esta característica viria reduzir a resistência última do mesmo.

Viana (2019) destaca em seu trabalho que, devido os agregados graúdos inexistirem nos concretos CPR, evitam-se os problemas apresentados por concretos convencionais, justamente na zona de transição entre pasta e agregado.

O concreto com pós reativos traz em sua composição apenas partículas de até 0,2 mm (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011), além desta característica estes concretos podem apresentar alta resistência e alto desempenho, sendo considerados um concreto de ultra-alto desempenho.

Esta composição influencia no aumento da resistência última do concreto, propiciando redução das dimensões das peças estruturais e abrindo um leque de possibilidades quanto à forma e liberação de áreas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Além de apresentar um corpo constituído de finos, como uma de suas características, o concreto com pós reativos faz utilização de fibras de aço em sua constituição, lhe conferido ductilidade e, em conjunto, resistência à tração e flexão, o que permite eliminar a armadura passiva em estruturas de concreto armado, auxiliando ainda mais na diminuição de seções, uma vez que não é necessário espessuras de cobrimento dessa armadura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; EIDE; HISDAL, 2012 *apud* CHRIST, 2019; WILLE; NAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011, *apud* CHRIST, 2019).

De acordo com Viana (2019), os concretos de pós reativos (CPR) constituem o tipo de CUAD mais estudado e utilizado.

Por ser uma tecnologia ainda não difundida no mercado da construção civil brasileira, a análise sobre os materiais a serem utilizados para a confecção do CUAD, técnicas de dosagens e de controle

em obra são fundamentais, assim como a análise da viabilidade do emprego deste material.

Logo, o presente trabalho traz uma análise discursiva acerca dos principais resultados publicados em pesquisas sobre o CUAD, ressaltando-se a sua composição básica, a microestrutura do material, as propriedades desenvolvidas no estado fresco e endurecido. Além de ressaltar os fatores relativos ao controle de produção, vantagens de seu emprego em relação ao CAD e análise de viabilidade.

METODOLOGIA

Foi executada uma pesquisa exploratória, de análise da literatura, sobre o tema em questão. Os meios explorados são artigos de revistas, anais, dissertações e teses sobre o tema, publicados entre os anos de 2015-2021 no google scholar e Scielo. O foco foi dado às obras nacionais, embora busque-se algum dado de literaturas estrangeiras para consolidar a narrativa.

Informações sobre as características do concreto com pós reativo foram ressaltadas, em virtude deste ser um dos tipos de CUAD mais estudados pela literatura, assim como os materiais que o compõem, sequência ótima de mistura, tipos de curas indicados, propriedades nos estados fresco e endurecido, a empregabilidade e viabilidade técnica diante o contexto do mercado atual.

O conteúdo abordado esclarece dúvidas quanto a este concreto, apresentando diversos parâmetros sobre o mesmo dentro de um único documento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conceituação

Quando se trata de concreto de ultra-alto desempenho, os estudos realizados são isolados e não tem muita conexão, o que torna os resultados destas pesquisas sem condições de instigar o desenvolvimento de

regras de projetos, dosagens e métodos de aplicação desse material (BUTTIGNOL *et al*, 2018).

De acordo com Buttignol *et al* (2018), existe uma necessidade de junção, divulgação dos resultados e ordenação dos estudos, no sentido de promover uma maior interação entre os centros de pesquisa dedicados ao tema e comunidade pesquisadora, para que o cenário atual dos estudos seja compreendido e avançado.

A definição de requisitos básicos para fabricação e aplicações estruturais, que possibilite o desenvolvimento de novas aplicações práticas para o material é um dos principais aspectos para o avanço de pesquisas (BUTTIGNOL *et al*, 2018).

O termo CUAD não foi empregado em diversas pesquisas, uma vez que não havia uma definição do que seria o CUAD. O termo só chegou a ser definido em 2013, quando o Instituto Americano do Concreto (ACI) e a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) chegaram ao consenso que um concreto de ultra-alto desempenho seria aquele que não disporia de agregado graúdo em sua composição, além de baixíssima relação água/cimento e alcance de resistência à compressão, aos 28 dias, superior a 150MPa e resistência à tração maior que 8MPa (AFGC, 2013 *apud* CHRIST, 2019).

O concreto de ultra-auto desempenho detém as características de três outros tipos de concreto, o concreto autoadensável (CAA), o concreto reforçado com fibra (CRF) e o concreto de alto desempenho (CAD) (TORREGROSA, 2013 *apud* CRHIST *et al*, 2019)

Materiais empregados para produção do CUAD

Dos 12 artigos pesquisados que foram selecionados, oito destes comentavam sobre os materiais constituintes do CUAD (LIVI, 2017; SALVADOR FILHO, 2017; MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017; PERRY; PARSEKIAN; SHRIVE, 2017; ROMPA; GIDRÃO, 2020; CRHIST, 2019; CHRIST

et al, 2019; VIANA, 2019; BALESTRA; OZELAME; SAVARIS, 2020).

Entre os materiais utilizados, além da água, para a produção do CUAD, destacaram-se o cimento CP V-ARI (LIVI, 2017; VIANA, 2019; ROMPA; GIDRÃO, 2020; BALESTRA; OZELAME; SAVARIS, 2020), por ser o mais puro comercializado; e a adição mineral pozolânica, sílica ativa (SALVADOR FILHO, 2017; LIVI, 2017; SHRIVE, 2017; BUTTIGNOL *et al*, 2018; PERRY; PARSEKIAN; ROMPA; CHRIST *et al*, 2019; CRHIST, 2019; VIANA, 2019; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020; GIDRÃO, 2020); e a cinza volante (CHRIST *et al*, 2019; ROMPA, GIDRÃO, 2020).

Nas pesquisas realizadas, foram encontrados teores de sílica ativa empregadas entre 19,8% e 57,6%, sendo o teor mais comum adotado, àqueles entre 25% e 26%, em relação à massa de cimento (LIVI, 2017; CRHIST, 2019; VIANA, 2019; ROMPA; GIDRÃO, 2020; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020).

Entre os agregados mais comuns destacam-se os agregados miúdos, com granulometria não superior a 3 mm (SALVADOR FILHO, 2017; CRHIST *et al*, 2019; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020).

No CUAD, o controle da relação a/c deve ser rígido, correndo o risco de qualquer erro ocasionar em uma baixa considerável da resistência final.

Para garantir a trabalhabilidade do concreto, com baixíssima relação a/c e elevado consumo de cimento, faz-se necessário que sejam incluídos super e/ou hiperplastificantes nesta mistura. Os teores empregados destes materiais situam-se numa faixa de 1% a 3%, em relação à massa do cimento, a depender do tipo adotado.

Habel *et al* (2006), apud Buttignol *et al* (2018) indica que a utilização de tais aditivos ocasiona um longo período de dormência, cerca de 24 horas, antes do

início do processo de hidratação e ganho de resistência.

Outro material empregado na composição deste concreto são as fibras, especialmente as fibras de aço (MULLER; KOELLE & ALMEIDA, 2017; PERRY, PARSEKIAN & SHRIVE, 2017; CRHIST, 2019; CRHIST *et al*, 2019; ROMPA; GIDRÃO, 2020; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020).

Entre as fibras mais utilizadas, observadas nos estudos analisados, destacam-se as fibras de aço, com 12 mm (maior dimensão) x 0,2 mm (diâmetro), adicionadas em relação ao volume total do concreto, com concentrações de 2% à 3%. (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017; PERRY; PARSEKIAN; SHRIVE, 2017; ROMPA; GIDRÃO, 2020; CRHIST *et al*, 2019; BALESTRA; OZELAME; SAVARIS, 2020).

A resistência à tração do CUAD é adquirida pela concentração, orientação, incorporação e distribuição das fibras na mistura. Devido ao teor elevado utilizado, as fibras se tornam responsáveis por 60% do custo do concreto (WALRAVEN, 2004 *apud* CRHIST *et al*, 2019).

Outra característica da fibra adotada é relativa a sua correta disposição na matriz, uma vez que as fibras não inibem o aparecimento de fissuras, apenas impedem sua propagação, trabalhando como uma ponte de ligação de tensões.

Um aspecto relevante a ser ressaltado quanto ao uso das fibras nestes concretos é relativo à relação entre a orientação das fibras, em relação ao sentido da tensão principal de tração, e o desempenho do compósito como um todo, sendo esta uma relação diretamente proporcional (CARVALHO; MOTA, 2018; GIDRÃO, 2019;).

O Quadro 1, apresenta um resumo dos principais materiais comumente utilizados da fabricação do CUAD e seus teores usuais, conforme trabalhos analisados.

Quadro 1 – Principais na confecção do cuad e faixas de teores usuais.

Material	Teores
Cimento CP V-ARI	100%
Sílica Ativa*	25% e 26%
a/c	0,20 e 0,26
Aditivo Superplastificante**	1% a 3%
Fibras***	2% à 3%

Fonte: Autor, 2021.

Nota:

*a porcentagem da sílica ativa é calculada em relação à massa de cimento;

**a porcentagem de aditivo superplastificante é calculada em relação à massa de cimento;

*** a porcentagem das fibras é calculada em relação ao volume total do concreto.

Dosagem

De acordo com pesquisas realizadas para a execução do presente trabalho, foi observado que as dosagens do CUAD são predominantemente empíricas. Diversos estudos trazem especificações a serem respeitadas, para que o concreto produzido apresente as propriedades esperadas, entre estas:

- Máxima compacidade granular, proporcionando efeito de “empacotamento”;
- Baixa relação água/aglomerantes;
- Utilização de aditivos superplastificantes;
- Incorporação de fibras para que a resistência à tração seja aumentada.

Com análise dos materiais disponíveis na literatura sobre a dosagem de concretos do tipo CUAD, observou-se que os métodos de dosagem baseavam-se em uma busca pelo melhor grau de empacotamento possível dos materiais utilizados, não havendo assim, material satisfatório no quesito métodos de dosagens.

O método proposto encontrado foi o relatado por Christ (2019), os demais autores utilizaram como base de seus estudos, o mais alto grau de empacotamento das partículas dos materiais constituintes do

concreto estudado, para determinação das quantidades de cada um, não definindo um método para a dosagem (SALVADOR FILHO, 2017; LIVI, 2017; ROMPA; GIDRÃO, 2020;).

Christ (2019), na tentativa de propor uma dosagem para CUAD, utilizou quatro traços, contendo: cimento, sílica ativa, cinza volante, pó de quartzo e carbonato de cálcio.

Este autor utilizou o método de empacotamento proposto por Andreassen e Anderssen modificado (1980), que é um método contínuo para se determinar o empacotamento das partículas com base na máxima otimização granular através da equação:

$$\frac{PAD}{100\%} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad \text{Eq (1)}$$

Onde:

PAD = Percentual acumulado do diâmetro avaliado

D = Diâmetro a ser avaliado (mm)

Dmax = Diâmetro da maior partícula (mm)

Dmin = Diâmetro da menor partícula (mm)

q = Coeficiente de distribuição

Tal método foi utilizado na dosagem para avaliar a compacidade da matriz cimentícia. O estudo forneceu resultados que destacaram um maior potencial de resistência mecânica, além de uma relação linear entre a resistência à compressão e a compacidade da mistura. Quanto maior foi a compacidade, maior a resistência à compressão.

Entretanto, tal estudo não atingiu a resistência necessária de 150 MPa, aos 28 dias, como requer a definição do Instituto Americano do Concreto e da Associação Francesa de Engenharia Civil.

O autor acredita que tal parâmetro poderia ter sido alcançado se o concreto tivesse sido submetido a um maior tempo de cura (o autor realizou seu estudos submetendo os concretos à condição de cura úmida constante, até o momento de ensaio de resistência à compressão – realizada aos

7, 28 e 91 dias), ou até mesmo se fazendo utilização de cura térmica ou por pressão confinante no estado fresco (CHRIST, 2019).

Outro fator importante, conforme comentado anteriormente, é a relação água/aglomerante. Faixas desta relação, encontrava-se em valores entre 0,20 e 0,26, nos trabalhos avaliados. (SALVADOR FILHO, 2017; LIVI, 2017; BUTTIGNOL *et al*, 2018; CRHIST *et al*, 2019; CHRIST, 2019; ROMPA; VIANA, 2019; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020; GIDRÃO, 2020).

Fehling *et al*. (2015) *apud* Christ (2019), publicou um estudo afirmando que valores acima de 0,24 poderiam acarretar retrações por secagem e retração autógena, podendo propiciar a formação de poros, redução da resistência da matriz e aumento da permeabilidade;

Já em relação aos aditivos superplastificantes, indispensáveis quando se trabalha com concretos de baixíssimas relações a/c, observou-se que os teores mais utilizados encontram-se entre 1% e 3%, adicionados em relação à massa de cimento, como comentado anteriormente. (LIVI, 2017; CRHIST *et al*, 2019; CHRIST, 2019; VIANA, 2019; BALESTRA; OZELAME; SAVARIS, 2020).

A porcentagem desse material está associada à relação água/cimento. Os autores Rompa e Gidrão (2020), foram os únicos dentre os pesquisadores levantados que utilizaram o teor de 9% do aditivo superplastificante, valor muito acima do intervalo utilizado nos outros estudos, enquanto sua relação a/c foi de 0,2, a mais baixa encontrada nos trabalhos levantados para a confecção do presente trabalho.

Com esta baixa relação a/c, o consumo de cimento é elevado, chegando a valores de 800kg/m³ a 1000kg/m³, neste caso, recomenda-se a utilização de aditivos redutores de retração (SALVADOR FILHO, 2017; LIVI, 2017; MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017; PERRY; PARSEKIAN; SHRIVE, 2017; CRHIST, 2019;; CRHIST *et al*, 2019; BALESTRA,

OZELAME & SAVARIS, 2020; ROMPA; GIDRÃO, 2020).

Além do mecanismo de retração, propriedade inadequada ao material, uma vez que pode acarretar uma rede de fissuras e comprometimento das propriedades do material, o mais alto teor de cimento e do aditivo, também propicia o aumento de custo do material final, devendo-se analisar os teores mais indicados para cada material, aliando sempre o custo ao benefício.

Leis clássicas e fundamentais do comportamento do concreto são os principais parâmetros utilizados na dosagens do CUAD, tais leis definem que a resistência de um concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento. (RIBEIRO, 2018).

Aspectos executivos do concreto de ultra-alto desempenho

Como é sabido, quando se trata do material concreto, a sequência da mistura pode afetar as propriedades do concreto no estado fresco, especificamente quanto à homogeneidade e consistência.

Para os concretos de ultra-alto desempenho, a sequência de mistura mais encontrada seguiu as seguintes etapas: (CRHIST, 2019; ROMPA; BALESTRA, OZELAME & SAVARIS, 2020; GIDRÃO, 2020):

- Inserção de todos os elementos secos (cimento, sílica ativa, areia) (exceto as fibras), por 5 minutos no misturador;
- Adição da água e do superplastificante e, após 10 minutos de mistura, a adição das fibras; mistura por mais 5 min, até que estejam completamente dispersas no concreto.

A mistura dos componentes pode ocorrer durante até 20 minutos, devido à ausência do agregado graúdo que, no Concreto de Alto Desempenho, auxilia na dispersão dos componentes menores. Esse tempo pode variar devido o critério de cada autor quanto ao traço e sequência de mistura. (TUTIKIAN, ISAIA E HELENE, 2011 *apud* LIVI, 2017).

Em estudo realizado por Livi (2017), o autor conseguiu obter a consistência e trabalhabilidade desejada após 4 minutos e 30 segundos de mistura, utilizando uma sequência de mistura diferente da referenciada anteriormente.

Livi (2017) homogeneizou manualmente o cimento e a sílica ativa e os reservou em um saco. Com o misturador ligado, introduziu a água com o aditivo superplastificante já dissolvido e, imediatamente, adicionou o cimento e a sílica ativa gradativamente nesta mistura, esta ação durou 30 segundos.

Após 2 minutos do primeiro contado da água com o cimento, o sistema foi parado por mais 30 segundos, para retirada de material aderido nas paredes do recipiente, e a mistura continuou por mais 2 minutos.

Em tal estudo, a autora não utilizou fibras, o que pode ter contribuído no rápido preparo, uma vez que a utilização de tal elemento influencia a trabalhabilidade da massa.

Neste estudo, a autora alcançou resistências superiores à 150MPa, como preconiza a definição do CUAD, utilizando uma condição de cura aplicando-se pressão e temperatura (LIVI, 2017).

Outro ponto importante a ser levantado diz respeito à técnica de cura empregada, ela irá influenciar na formação dos hidratos.

A cura térmica, por exemplo, pode ser empregada em duas etapas. Na primeira, o calor é fornecido ao concreto ainda no estado fresco, buscando-se a aceleração das reações de hidratação. Na segunda etapa, o desenvolvimento de novos produtos hidratados é proporcionado, quando o concreto no estado endurecido é submetido ao aquecimento e mantido em um nível de umidade próximo a saturação, durante poucas horas, melhorando assim a resistência da matriz e diminuindo as deformações tardias. (AFGC, 2013 apud LIVI, 2017).

Segundo pesquisas realizadas em concretos com pós reativos, o efeito da cura térmica é, na maioria dos casos, benéfica no

desenvolvimento das propriedades mecânicas, pois proporciona uma melhor ativação da reação pozolânica da sílica ativa e cristalização dos hidratos. (VANDERLEI, 2004).

Em laboratório, já estão sendo desenvolvidos concretos capazes de resistir a compressões superiores à 800MPa, preparados com agregados metálicos e fazendo utilização de cura térmica sob pressão (SOKOLOVICZ, 2020).

Livi (2017) realizou um estudo acerca do procedimento de cura térmica e cura sob pressão e suas repercussões na propriedade de resistência à compressão do CUAD, quando submetido as mesmas.

A autora observou que a resistência à compressão, aos 7 dias, apresentou um aumento de 54% (utilizando a cura sob pressão de 5MPa) e 62% (utilizando a cura sob uma pressão de 10MPa), em relação a um concreto submetido à cura úmida. Estes concretos apresentaram resistência de 160 MPa e 166MPa, aos 28 dias, respectivamente, atendendo ao critério característico de um CUAD.

A cura sob pressão é realizada através da aplicação de uma carga em uma área. A área considerada é a face circular do corpo de prova cilíndrico (LIVI, 2017). As amostras foram submetidas à aplicação de pressão mediante utilização da prensa.

Livi (2017), desenvolveu uma prensa em parceria com o Laboratório de Metrologia e Automação (Labmetro/EMC/UFSC), utilizando um sistema de polias, tubos galvanizados e pesos, conforme mostra a Figura 1. Esta estrutura foi utilizada em seu trabalho. É possível visualizar na Figura 1, o instrumento produzido que é responsável pela aplicação da pressão nas amostras.

Figura 1 – Estrutura da prensa concluída



Fonte: Adaptado Livi (2017)

Uma câmara de aquecimento via radiação infravermelha com sistema de lâmpadas foi acoplada à prensa para que a cura térmica pudesse ocorrer paralelamente a cura sob pressão. Na Figura 1 é indicado o local onde tal câmara foi anexada, que é também o local onde as amostras serão colocadas. Nas Figuras 2a e 2b é possível ver a câmara de aquecimento pronta e instalada.

Figura 2 – Estrutura da prensa com sistema de lâmpadas acoplado (a) Câmara de aquecimento instalada (b) Sistema de aquecimento funcionando



a)



b)

Fonte: Livi (2017)

As amostras foram submetidas a aplicação de pressão mediante utilização da prensa (Figura 1). As pressões de (0,1 MPa, 5MPa e 10MPa) foram aplicadas gradualmente logo após o enchimento e posicionamento dos moldes no equipamento, aproximadamente 30 minutos após o início da hidratação.

A cura térmica (23° C, 40° C e 60°C) foi avaliada com três tempos de espera para o início de cada: foi iniciada juntamente com a pressurização (0h) e com tempos de espera de 2h e 4h. O regime isotérmico (onde a temperatura desejada é alcançada e o sistema estabiliza-se) foi de 17,30h e 6,5h para 40°C e 60°C, respectivamente. Já para a temperatura ambiente, o período isotérmico teve uma duração de 23h.

Após a desmoldagem, os corpos de provas foram encaminhados para câmara úmida, em tanque com água saturada com cal e ali permaneceram até as datas de ensaios de 7 e 28 dias.

O emprego de temperaturas de 40° e 60°C, nos corpos de prova ensaiados, mostraram um efeito de aumento na resistência à compressão aos 7 dias, porém, aos 28 dias, não houveram ganhos nesse quesito. O estudo concluiu que, a melhor combinação para uma elevada resistência à compressão, aos 28 dias, seria a utilização de uma pressão de compactação de 10MPa, associada a cura térmica à 40°C. (LIVI, 2017).

Análises realizados por Soliman (2019), expõe que concreto de ultra-alto desempenho, submetidos à curas térmicas de até 150°C, apresentaram aceleração nas reações de hidratação do cimento. Quando utilizadas temperaturas entre 200°C e 300°C (os autores não especificaram a idade e a duração da aplicação de tal temperatura) características do pó de quartzo são alteradas, havendo a possibilidade de ocorrerem reações pozolânicas, acarretando no aumento da resistência à compressão (HEINZ; URBONAS; GERLICHER, 2012 *apud* CHRIST, 2019).

O Quadro 2 a seguir mostra os estudos comentados sobre a produção de concreto de ultra-alto desempenho e as curas utilizadas. Foi tomado como “satisfatório”, os estudos que atenderam à premissa de 150MPa, de resistência à compressão, aos 28 dias.

Quadro 2 – Relação entre estudos e tipo de curas utilizadas.

Autor	Cura úmida (até idade de ensaio)	Cura térmica			Satisfatório
		T (°C)	Tempo (horas)	Pressão	
Livi (2017)	SIM	23; 40; 60.	0; 17,3; 6,5.	0,1M Pa, 5MP a, 10M Pa.	SIM*
Vianda (2019)	SIM**	230	24	-	NÃO
Christ (2019)	SIM	-	-	-	NÃO
Balestra; Ozelame; Savaris (2020)	SIM	90	72	-	NÃO
Rompa & Gidrão (2020)	SIM	-	-	-	NÃO

Fonte: Autor, 2021.

*Satisfatório para as amostras submetidas a pressão de 5MPa e 10MPa.

**Cura submersa durante 24 horas, apenas.

Microestrutura dos CUAD

Em seu trabalho, Livi (2017) realizou a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), para analisar as amostras submetidas à cura com compactação em pressão atmosférica de

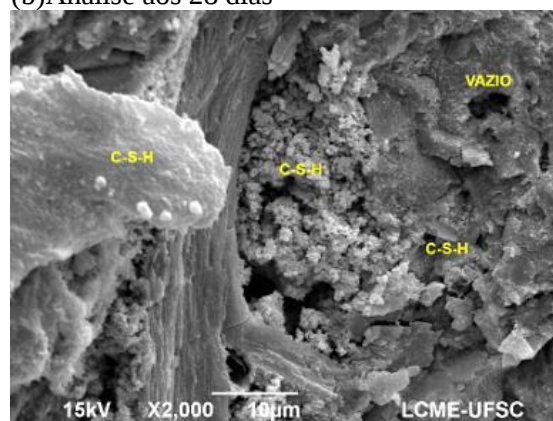
0,1MPa, 5MPa e 10MPa, com hidratação interrompida em 7 e 28 dias.

Conforme o autor esperava, a fase cimentícia hidratada, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), tornou-se cada vez mais densa com o avanço da idade. Outras modificações não foram encontradas, por esse motivo o estudo não foi tratado no decorrer do corpo de seu texto e sim como apêndice.

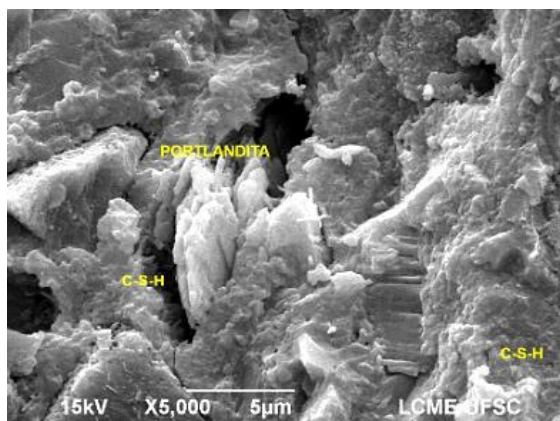
A análise microestrutural realizada em amostras fraturadas, submetidas à condição de cura sob pressão atmosférica (0,1MPa), Livi (2017) observou aos 7 dias, a formação de um C-S-H maciço e amorfo, com dimensões na ordem de 1 µm. Este hidrato forma uma estrutura reticular, conforme mostra a Figura 3a.

Aos 28 dias, no entanto, observa-se um C-S-H com morfologia predominantemente densa e amorfa, além da presença de Ca(OH)₂ – Portlandita- nos poros. Estas por sua vez, apresentaram morfologias diferentes da tradicional placa hexagonal (Figura 3b) (LIVI, 2017).

Figura 3 – Morfologia da superfície fraturada de amostra submetidas à pressão atmosférica, ampliação de 2.000x. (a)Análise aos 7 dias, (b)Análise aos 28 dias



(a)

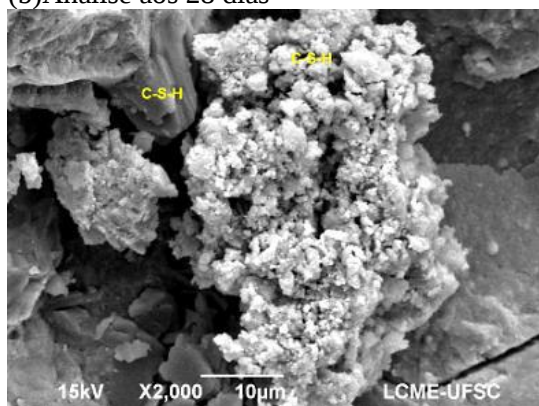


(b)

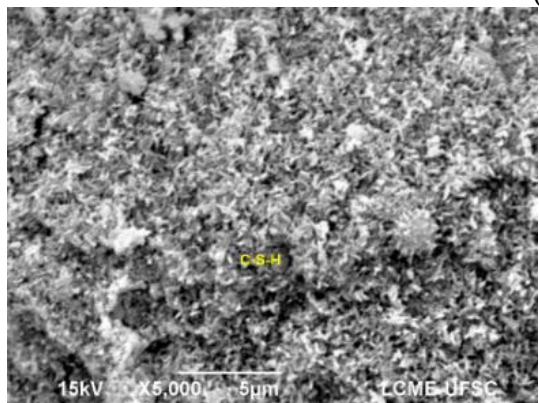
Fonte: Livi (2017)

Nas amostras investigadas, na condição de cura sob pressão de 5MPa, foram observadas o aumento da homogeneidade e compacidade do silicato de cálcio hidratado com o avanço da idade, como pode ser visto na Figura 4 (LIVI, 2017).

Figura 4 – Morfologia da superfície fraturada de amostra submetidas à pressão de 5MPa, ampliação de 2.000x. (a)Análise aos 7 dias, (b)Análise aos 28 dias



(a)

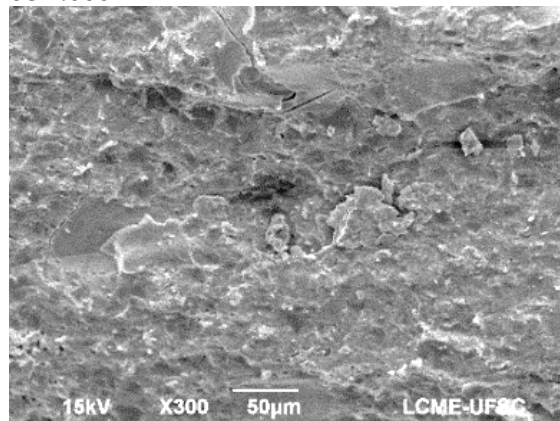


(b)

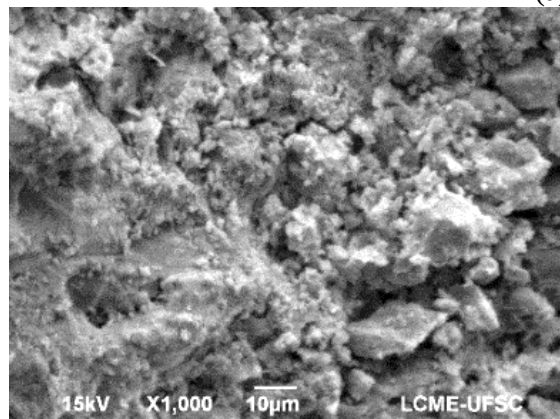
Fonte: Livi (2017)

Assim, como nas amostras submetidas à pressão de 5MPa; na pressão de 10MPa o concreto também apresentou um silicato de cálcio hidratado homogêneo e denso, aos 28 dias (Figura 5) (LIVI, 2017).

Figura 5 – Microfotografias da superfície fraturada de amostra submetidas à pressão de 10MPa. (a)Ampliação de 300x, (b)Ampliação de 1.000x



(a)



(b)

Fonte: Livi (2017)

Nos artigos estudados para a confecção deste trabalho, o único autor que apresentou uma análise de microscopia eletrônica de varredura de suas amostras foi Livi (2017), o que deixa mais uma lacuna no tocante de estudos e análises referentes ao concreto de ultra-alto desempenho.

Propriedades no estado fresco e endurecido

As propriedades do concreto no estado fresco e endurecido são afetadas pela natureza e a reatividade dos materiais adicionados à mistura.

A quantidade de fibras ao concreto de ultra-alto desempenho, por exemplo, influenciam diretamente nas propriedades do concreto. Neste caso, quanto maior o teor de fibras, maior a resistência à tração e tenacidade, em contrapartida, a trabalhabilidade do composto é afetada negativamente. (SALVADOR FILHO, 2017).

Em relação as propriedades do concreto CUAD, algumas propriedades foram ressaltadas nos trabalhos avaliados e serão expostas a seguir.

De acordo com Habel (2006), apud Buttignol et al (2018), o aditivo superplastificante, termina formando uma película em volta dos grãos de cimento, impedindo a interação destes com a água e retardando o processo de hidratação do grão por um dado momento. Após esse tempo de dormência, há um rápido desenvolvimento das propriedades da mistura, de maneira que aos 7 dias, há um ganho de 60% de sua resistência à tração e 80% da resistência à compressão. Transcorridos 90 dias, o processo de hidratação está virtualmente completo.

Não foram encontrados os métodos de como o autor tenha chegado à conclusão que o processo de hidratação tenha sido concluído, uma vez que apenas se teve acesso a citação de tal estudo por Buttignol et al (2018), no decorrer da concepção do presente trabalho.

Rompa e Gidrão (2020) realizaram estudos sobre concreto de ultra-alto desempenho, onde os autores produziram concretos do tipo CUAD com e sem a utilização de fibras em sua composição. Neste trabalho as variáveis foram denominadas por suas siglas, em inglês, sendo o “UHPFRC” (*Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*) e “UHPC” (*Ultra-High-Performance Concrete*) ou “CPR, sendo utilizado o mesmo traço para ambos.

Na confecção destes concretos foram utilizados os materiais: CP V- ARI, sílica ativa, areia, água e superplastificante,

e o traço utilizado foi: 1:0,266:1:0,2:0,09.(C:SA:A:A/C:S).

No composto reforçado com fibras, a proporção utilizada foi de 1,165%, sobre o volume total do concreto, e o teor de 9% de superplastificante para os dois materiais foi calculado em relação a massa de cimento.

Após a moldagem, as amostras foram submetidas à cura úmida em temperatura ambiente (no estudo não foi indicado o ambiente de cura).

É possível visualizar as propriedades no estado fresco do concreto com fibra produzido nesta pesquisa. A Figura 6 mostra o *slump test* e a Figura 7 o espalhamento (que foi de 60cm, alcançando assim, a característica de autoadensamento). (ROMPA; GIDRÃO, 2020).

Figura 6 – *Slump test* – Mistura com fibras



Fonte: Rompa & Gidrão (2020)

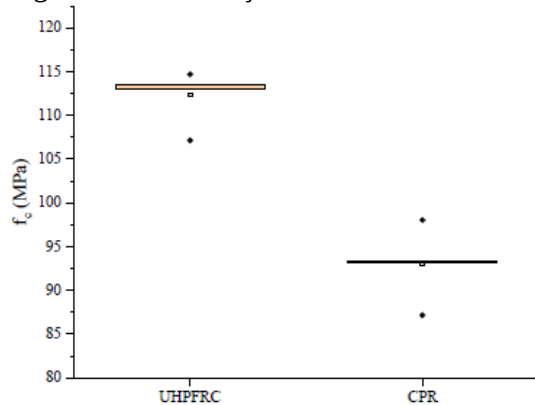
Figura 7 – Espalhamento - Mistura com fibras



Fonte: Rompa & Gidrão (2020)

O gráfico referente à resistência à compressão é mostrado na Figura 8 e evidencia os valores alcançados pelo UHPFRC e pelo CPR (UHPC), resultando em 112MPa e 93MPa, respectivamente.

Figura 8 – Distribuição de valores de f_c



Fonte: Rompa & Gidrão (2020)

Os concretos produzidos por Rompa & Gidrão (2020), não alcançaram o patamar de resistência à compressão para um CUAD, entretanto, os autores apontam que com a adição das fibras metálicas a tenacidade foi aumentada em 1,5 vezes, em relação ao CPR, o que resolve o problema clássico de ruptura brusca comum em concretos de alta resistência.

Como citado anteriormente, Christ (2019) desenvolveu um estudo de dosagem para CUAD. Neste estudo utilizou 4 traços de referência distintos, sem utilização de fibras metálicas, e o traço com melhor desempenho, com a utilização de fibras. Em tais traços foram utilizados: cimento CPV ARI; sílica ativa; cinza volante; pó de quartzo; carbonato de cálcio; areia 1; areia 2; água; aditivo superplastificante e modificador de viscosidade. Os teores de cada material podem ser conferidos na Tabela 1:

Tabela 1 – Traços unitários desenvolvidos pelo método proposto por Christ (2019)

Materiais	IDE 87		IDE 98		IDE 118		IDE 133	
	Unit.	kg/m³	Unit.	kg/m³	Unit.	kg/m³	Unit.	kg/m³
Cimento	1	493,5	1	493,5	1	493,5	1	493,5
Sílica	0,198	97,7	0,223	109,98	0,537	256,1	0,576	284,1
Cinza Volante	0,436	215,3	0,688	339,34	---	---	0,871	430,0
Pó de Quartzo	---	---	---	---	0,939	463,19	---	---
Carbonato de Cálcio	0,683	337,2	0,726	358,38	---	---	---	---
Areia 1	2,444	1206,3	---	---	2,286	1128,2	2,315	1142,3
Areia 2	---	---	2,125	1048,8	---	---	---	---
Água/aglomerante	0,23	185,5	0,25	276,53	0,26	230,6	0,23	241,5
Superplastificante (%)	3	24,20	3	18,86	3	22,76	3	36,23
Modificador de Viscosidade (%)	1	16,13	1	24,23	1	15,17	1	24,15

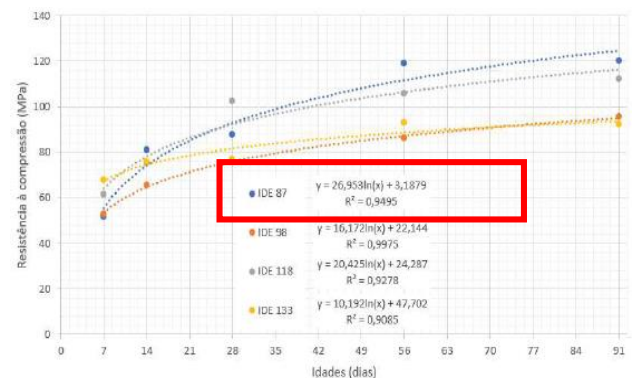
Fonte: Christ (2019).

Na primeira etapa, Christ (2019) rodou os quatro traços de referência e todos apresentaram trabalhabilidade similar à de um concreto autoadensável, com espalhamentos superiores a 625mm.

A partir daí, as amostras foram submetidas a um estudo de resistências potenciais e foi observado que a mistura que apresentou melhor resultado foi a mistura IDE 87, com o menor índice de desvio de empacotamento (IDE).

Na Figura 9 é possível visualizar os gráficos de resistências potenciais das quatro misturas.

Figura 9 – Resistências potenciais de cada mistura em diferentes idades



Fonte: Adaptado Christ (2019).

Na segunda etapa do processo, Christ (2019) utilizou a mistura com maior resistência potencial e estudou tal mistura com a utilização de três teores diferentes de fibras de aço, 1%, 2% e 2,9%, em relação ao volume de concreto.

A trabalhabilidade do material com diferentes percentuais de fibras foi avaliada segundo a NBR 15823-2 (ABNT, 2017), observou-se que os diferentes teores de fibras não influenciaram de maneira significativa na trabalhabilidade (Figura 10) (CHRIST, 2019).

Figura 10 – Espalhamento, a) REF; b) 1% fibras; c) 2% fibras; d) 2,9% fibras



Fonte: Christ (2019)

Os espalhamentos encontrados ficaram entre 62cm e 63,5cm, sendo o espalhamento menor o do composto por 2% de fibras e o mais alto o com 1% de fibras (CHRIST, 2019).

As amostras foram submetidas à cura úmida com controle de temperatura de $25 \pm 3^\circ\text{C}$, até serem retiradas para avaliação nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), para corpo de provas cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Como pode ser observado (Tabela 2), nenhuma das amostras apresentaram a resistência à compressão de 150MPa, aos 28 dias, sendo o maior valor alcançado de 126MPa, para o teor de fibras de 2,9% (CHRIST, 2019).

Tabela 2 – Resistência à compressão das misturas com diferentes teores de fibras

CPs	Fibras	7 Dias			28 Dias			91 Dias		
		MPa			MPa			MPa		
		Ind.	Potencial	Média	Ind.	Potencial	Média	Ind.	Potencial	Média
REF	0%	52			81			96,8		
		44,9	52	46,5	84,8	84,8	82,3	98	98	90,5
		42,5			81,1			76,7		
		43,4			76,6			91,8		
1%	1%	44,8	51,8	46,7	87,6	87,6	81,7	92,3	120	101,4
		51,8			80,8			120		
		75,8			102,9			122,5		
		77,4	78,8	77,3	109,4	111,5	107,9	123,2	123,5	123,1
2%	2%	78,8			111,5			123,5		
		71			100,1			130,2		
		73,2	73,2	71,9	110,8	110,8	95,9	113,4	130,2	121,6
		71,4			76,9			121,2		
3%	3%	85,2			116,2			129,8		
		78,6	85,2	82,7	115,2	116,2	115,2	129,7	129,8	122,6
		84,3			114,3			108,4		
		76,6			101,5			132,1		
2,9%	2,9%	72,1	76,6	74,2	106,1	117,5	108,4	127,9	132,1	130,4
		74			117,5			131,2		
		95,9			126,6			115,5		
		79,8	95,9	87,4	106,6	126,6	119,5	132,3	138,5	128,8
2,9% (highlighted)	2,9%	86,5			125,2			138,5		
		80,6			110,7			137,6		
		79,3	80,6	79,6	113,7	113,7	112,5	136	137,6	136,2
		78,8			113			135		

Fonte: Christ (2019)

Foi observado também que o acréscimo de fibras impactou diretamente na tenacidade do material, resultando em uma maior capacidade de suportar cargas antes de deformar, até os 2 mm.

O emprego das fibras afetou diretamente a resistência à tração (vide Tabela 3), sendo que quanto mais fibras foram inseridas, maior o valor obtido, chegando a 26,1 MPa, no traço com 2,9% de fibras (CHRIST, 2019).

Tabela 3 – Resistência à tração na flexão máxima (fp), na primeira fissura (f1), tenacidade (t150) e resistência a flexão equivalente das amostras

Traço	MPa			Joule		$R^0_{f,150}$
	f_p	f_1	t_{150}	f_p	f_1	
CP01-07-1%	11,3	10,6	70,06	0,099		
CP02-07-1%	9,0	8,8	56,84	0,097		
CP03-07-1%	10,5	10,0	66,10	0,099		
CP01-07-2%	14,4	10,6	85,69	0,121		
CP02-07-2%	12,2	12,1	68,05	0,085		
CP03-07-2%	14,5	11,4	83,31	0,110		
CP01-07-2,9%	17,8	9,2	97,29	0,160		
CP02-07-2,9%	16,5	11,6	97,76	0,130		
CP03-07-2,9%	14,7	10,5	81,47	0,120		
CP01-28-1%	12,3	10,1	72,71	0,110		
CP02-28-1%	18,5	12,4	101,65	0,120		
CP03-28-1%	14,3	10,8	85,12	0,120		
CP01-28-2%	20,5	12,9	110,60	0,129		
CP02-28-2%	18,9	13,4	102,64	0,115		
CP03-28-2%	21,4	12,4	109,36	0,132		
CP01-28-2,9%	16,7	13,5	97,84	0,109		
CP02-28-2,9%	24,5	12,4	136,67	0,165		
CP03-28-2,9%	17,0	12,4	98,36	0,119		
CP01-91-1%	15,0	13,1	83,96	0,096		
CP02-91-1%	14,0	14,0	72,72	0,078		
CP03-91-1%	13,3	12,4	77,15	0,093		
CP01-91-2%	22,1	14,0	129,20	0,138		
CP02-91-2%	23,8	14,1	135,97	0,145		
CP03-91-2%	17,9	12,0	104,57	0,131		
CP01-91-2,9%	19,4	15,2	113,96	0,113		
CP02-91-2,9%	26,1	13,4	145,92	0,163		
CP03-91-2,9%	22,4	15,1	128,87	0,128		

Fonte: Adaptado Christ (2019)

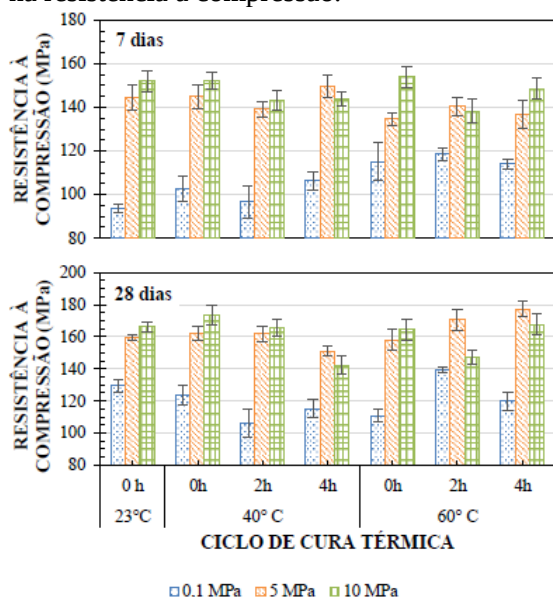
No trabalho realizado por Livi (2017), sobre a influência da temperatura e

pressão em concretos de ultra-alto desempenho, foram produzidos 21 CPs, estes foram submetidos à diferentes temperaturas, pressões e tempo de espera para início da cura.

O concreto foi confeccionado sem utilização fibras, sendo o concreto constituído por com cimento CP V - ARI, sílica ativa (25%, adicionado em relação ao cimento), relação água/cimento de 0,25 e 1,1% de aditivo superplastificante, em relação pasta de cimento, obtendo o traço: 1;0,25;0,25;0,011.

Na Figura 11 a seguir encontram-se os gráficos referentes ao efeito do tempo de espera na combinação entre cura térmica e sob pressão na resistência à compressão.

Figura 11 – Efeito do tempo de espera na combinação entre cura térmica e sob pressão na resistência à compressão.



Fonte: Livi (2017)

A partir deste estudo, Livi (2017) concluiu que a pressão influenciou diretamente na massa específica, no módulo de elasticidade e na resistência à compressão. Sendo, quanto maior a pressão, maior foi a massa específica e a resistência à compressão.

Neste estudo, Livi (2017) classificou os poros em bolhas de ar, capilares (200 a 50 μm), macroporos (50 a 50 nm) e microporos (inferior a 50 nm),

respectivamente, em relação a dimensão decrescente dos diâmetros.

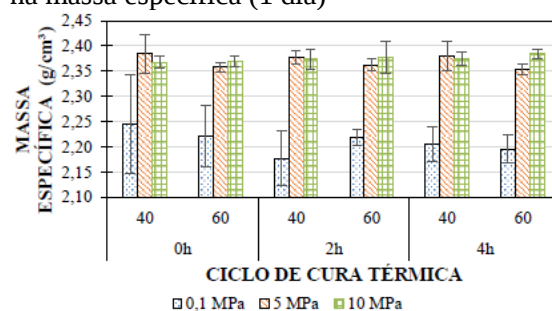
Segundo o autor, o aumento da pressão reduziu a porosidade total e a quantidade de bolhas de ar na mistura, aumentou a concentração de microporos (à temperatura ambiente), reduziu a porosidade capilar (em amostras aquecidas) e reduziu o grau de hidratação.

O resultado obtido ocorreu devido a redução da quantidade real de água presente na pasta devido à compactação. No entanto, não foi detectada diferença significativa entre os resultados das amostras compactadas com 5 MPa e 10 MPa (LIVI, 2017).

Livi (2017) concluiu que, em casos onde se possa aplicar cura sob pressão e aquecida, não há necessidade da espera para realizar a cura após o tempo de pega, determinado pelo aparelho de Vicat.

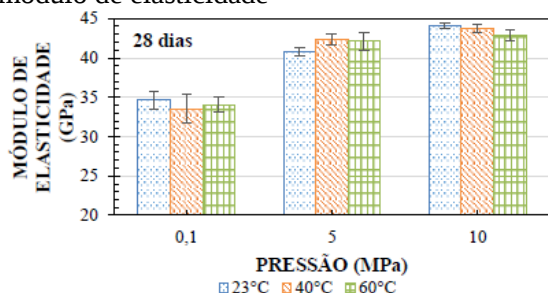
Os melhores resultados globais obtidos, em relação à resistência à compressão (Figura 11), maior massa específica (Figura 12) e maior módulo de elasticidade (Figura 13), aos 28 dias, ocorreram com utilização de pressão de compactação de 10 MPa, combinada à cura térmica de 40°C, ainda assim as amostras que utilizaram 5MPa de pressão apresentaram resultados satisfatórios, com diferenças pequenas e maior facilidade de implementação (LIVI, 2017).

Figura 12 – Efeito do tempo de espera na combinação entre cura térmica e sob pressão na massa específica (1 dia)



Fonte: Livi (2017)

Figura 13 – Efeito da pressão e temperatura no módulo de elasticidade



Fonte: Livi (2017)

Se o intuito do produto a ser gerado for a resistência à compressão, aos 7 dias, a cura térmica resultou em uma resistência superior a 100MPa, com módulo de elasticidade superior à 30 GPa. Caso a finalidade do composto for o desmolde precoce (1 dia), Livi (2017) indica a utilização de cura sob pressão com 10 Mpa, juntamente ou não com cura térmica, apresentando valor médio de módulo de elasticidade de 37GPa.

A fluência é o acréscimo de deformações que ocorrem mesmo à uma tensão constante. Apresenta como efeitos indesejados o aumento de deformações em lajes e vigas, momentos fletores adicionais pelo aumento da curvatura em pilares, entre outros (ARAÚJO, 2002).

De acordo com SRITHARAN (2015), o coeficiente de fluência para o CUAD é, aproximadamente 0,8, valor este bem abaixo dos encontrados em concretos convencionais que chegam até a 4,6.

Segundo TOUTLEMONDE & RESPLENDINO (2011) *apud* Buttignol *et al* (2018), este valor chega próximo de 1,0 em Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF), quando submetido à cura térmica, tal valor restringe-se a valores entre 0,2 e 0,5, fator que melhora os efeitos negativos citados anteriormente, evidenciando assim, mais uma vantagem da utilização de cura térmica em concretos de ultra-alto desempenho. (BUTTIGNOL *et al*, 2018).

Como o CUAD apresenta baixíssima porosidade e elevado consumo de cimento, a retração autógena, que ocorre durante a hidratação, pode gerar

microfissuras devido às altas tensões induzidas pela tração.

Em casos onde os corpos de provas são submetidos à ambientes úmidos, a água tende a percolar pelos vazios formados por essas microfissuras e hidratar os compostos químicos ainda não hidratados. Tal ação culmina no aumento de resistência à compressão de até 15%, entretanto a depender da direção e propagação, pode prejudicar a resistência à tração (BUTTIGNOL *et al*, 2018; VIEIRA; MOLIN, 2011).

Viabilidade

Como definição global, define-se “viabilidade” como algo “com fortes probabilidades de se levar a cabo ou de se concretizar por reunir todas circunstâncias/características necessárias” (VIABILIDADE, 2019).

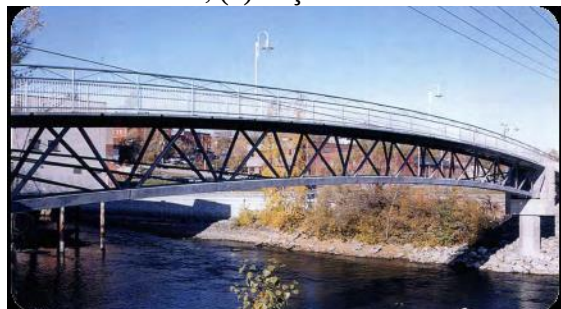
No caso do CUAD, devido as respostas no tocante de sua elevada resistência à compressão e resistência à tração, a sua utilização possibilita que o projetista diminua seções de concreto, reduzindo assim, o peso global da estrutura, e melhorando a utilização da área útil disponível.

Em contrapartida, o concreto de ultra-alto desempenho ainda enfrenta dificuldades devido à falta de dosagem eficiente, para que seja produzido de maneira igualitária com padrões pré-definidos. Atualmente é comercializado em âmbito nacional e internacional, porém o elevado valor impossibilita a disseminação dessa tecnologia, em um primeiro momento (CHRIST, 2019).

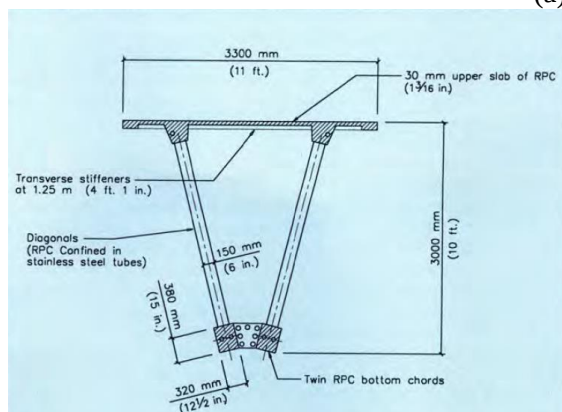
Algumas obras com o uso do CUAD serão relatadas a seguir, ressaltando-se algumas vantagens deste material.

A primeira ponte em CUAD foi construída no ano de 1997, em Sherbooke – Canadá (Figura 14a). A treliça abaixo da passarela foram constituídas de tubos de aço preenchidos com concreto (CHRIST *et al*, 2019).

Figura 14 – Passarela para pedestre confeccionada com CUAD no Canadá. 1(a) Ponte construída, (b) Seção transversal



(a)



(b)

Fonte: Blais; Couture, (1999) *apud* Christ *et al*, (2019).

Esta ponte é destinada a pedestres e possui vão livre entre pilares de 60 metros. É possível visualizar na seção transversal da ponte (Figura 14b), que seus elementos são de esbeltez singular, com laje de trânsito de apenas 3cm de espessura, reduzindo a carga permanente da estrutura em aproximadamente 500 kgf/m², características proporcionadas pela utilização do concreto de ultra-alto desempenho (CHRIST *et al*, 2019; AXIAL ENGENHARIA, s.d.)

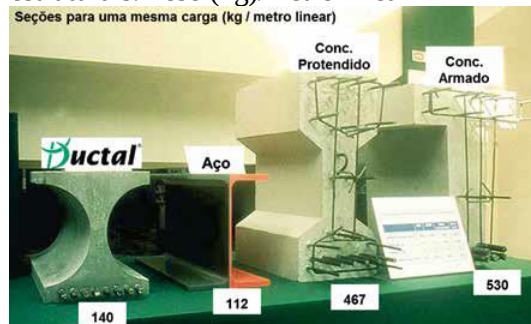
Muller, Koelle & Almeida (2017), fizeram um apanhado sobre as obras no mundo que utilizaram o concreto de ultra-alto desempenho, reforçado com fibras. Os autores alegaram que este material, devido a sua granulometria, permite reproduzir texturas com precisão, podendo ainda serem pigmentados, mantendo seu desempenho e aspecto mineral.

A utilização do CUAD proporciona elementos cada vez mais delgados, com

presença de curvas e formas antes nunca imagináveis de se fazer com o concreto.

Uma maneira de expor a capacidade de esbelteza para perfis submetidos à um mesmo carregamento, pode ser analisado na Figura 15.

Figura 15 – Comparação de elementos estruturais. Peso (kg)/metro linear



Fonte: Muller; Koelle & Almeida (2017).

Nesta figura (Figura 17), observamos quatro perfis, sendo, respectivamente: um de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras, um perfil metálico, um concreto protendido, e, por fim, um concreto armado, todos capazes de suportar uma mesma carga.

O perfil de CUAD tem uma diminuição de peso por metro linear em mais de 70%, em comparação com o concreto convencional armado, e apenas 20% a mais em relação ao perfil metálico (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017).

O Museu das Civilizações Europeias e Mediterrâneas – na França, é um projeto do arquiteto Rudy Ricciotti, em parceria com a fabricante de concreto Lafarge Holcim. Se refere à um cubo formado por uma “rede” produzida com um concreto de ultra-alto desempenho pigmentado, funcionando como um exoesqueleto da estrutura. Na Figura 16 é possível ver toda a estrutura externa do museu que é toda em CUAD vazado, sendo enfatizado em detalhe na Figura 17.

Figura 16 - Museu das Civilizações Europeias e Mediterrâneas



Fonte: Lanxess (2017).

Figura 17 - Museu das Civilizações Europeias e Mediterrâneas – Detalhe de estrutura em CUAD.



Fonte: Lanxess (2017).

Foi construído através de 1.100 metros cúbicos de concreto pré-moldado e 250 metros fabricados *in-situ*. Devido a este projeto, o arquiteto recebeu diversos prêmios, entre eles o Prêmio de Obras de Concreto Colorido de 2017 e o “Grand Prix National de l’Architecture”, em 2006. É possível visualizar a quantidade de vazios proporcionados pelo concreto na Figura 18.

Figura 18 – Detalhe de disposição dos painéis em concreto. Museu das Civilizações Europeias e Mediterrâneas.



Fonte: Contemporist *apud* Passeio revestimentos, 2013.

Outra obra que utiliza o CUAD foi o Hotel Residencial Nakâra – França, as conexões entre as áreas comuns do hotel são feitas por grandes paredes de concreto branco de ultra alto desempenho utilizadas com a ideia de proporcionar maior iluminação natural, mantendo a visão aberta do mediterrâneo. (ARCHDAILY, 2016).

O empreendimento foi projetado pelo arquiteto Jacques Ferrier, em 2015, e fabricado pela Ductal®. Possui uma área de 9.700m². (ARCHDAILY, 2016) (Figura 19).

Figura 19 - Hotel Residencial Nakâra



Fonte: Ducros (2016).

De acordo com relatos da FHWA (Federal Highway Administration), s.d., mais de 30% das pontes norte-americanas apresentam problemas estruturais e necessitam de reforço. Visando aumentar a vida útil de tais estruturas em 100 anos, o Estado decidiu lançar um programa de reabilitação e reconstrução (quando necessário) de pontes. Já foram recuperadas 200 pontes com a utilização do CUAD.

Nas Figuras 20 e 21 é possível visualizar duas dessas pontes (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017).

Figura 20 – Ponte Gen. Pulaski Skyway, Nova Jersey, recuperada com CUAD



Fonte: Brazilian Voice (2018).

Figura 21 – Ponte do Rio Nipigon, Ontário, recuperada com CUAD.



Fonte: CBC (2018).

No Brasil, a primeira obra realizada com o CUAD foi a revitalização da fachada do Ministério das Relações Exteriores – São Paulo, o projeto foi idealizado pelo Escritório de Arquitetura FGFMF, onde a premissa ressaltada foi que o edifício não poderia receber carregamentos excessivos, para tal, o concreto de ultra alto desempenho proporcionou um elemento arquitetônico, com 3cm de espessura média, vazado, com aproximadamente, 40% de vazios (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017).

O projeto teve como resultado um painel arquitetônico com 90m² (Figura 22) e a utilização do CUAD possibilitou uma redução de, aproximadamente, 1/3 do peso, em torno de 7 toneladas a menos, caso fosse utilizado o concreto convencional. Não houve a necessidade de reforço estrutural pelo baixo carregamento da estrutura do painel (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017).

Figura 22 – Ministério das Relações Exteriores após revitalização de fachada utilizando painéis em CUAD.



Fonte: Muller; Koelle & Almeida (2017).

A utilização de concretos de ultra-alto desempenho já é uma realidade mundial, porém ainda não apresenta parâmetros para a proposição métodos de dosagem, escolha de materiais, produção e cura satisfatórios.

O concreto de ultra-alto desempenho, reforçado com fibras, segue com grande campo de pesquisa em aberto, o que chega a encarecer o produto por poucas empresas trabalharem com esse tipo de concreto, seguindo seus próprios critérios, materiais e metodologias.

A grande maioria dos autores que foram estudados para a confecção do presente trabalho concordam que são necessários elaboração de normas técnicas, mais estudos na área, além da integração e coordenação entre os centros de pesquisas, para que haja um avanço em conjunto das informações adquiridas e que não se tornem estudos avulsos, onde a troca de experiências fique comprometida. (SALVADOR FILHO, 2017; (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017; CHRIST *et al*, 2019; CRHIST, 2019; LIVI, 2017; BUTTIGNOL *et al*, 2018).

A partir da análise das obras com CUAD ressaltadas, podemos visualizar algumas vantagens, entre estas: alcance de esbeltez elevada com alta capacidade de carga, peso por metro linear chegando apenas a 30%, em comparação com concretos convencionais, dispensa de armação para tração a depender do caso, ampla diversidade em utilizações, resistência perante ambientes agressivos, conferência à estrutura de uma vida útil maior, ausência de possíveis problemas advindos de agregados graúdos, entre outros.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Ao ser analisado de forma geral todo o material levantado, fica claro que o concreto de ultra-alto desempenho já é uma realidade no mercado nacional e internacional. No entanto, também fica clara a falta de padronização de especificações de materiais, métodos consistentes de dosagens e comportamentos no estado fresco e endurecido desse material.

A confecção de normas técnicas faz-se necessária para que parâmetros de avaliações e metodologias sejam seguidos, tornando o material mais utilizado e, assim, mais acessível, uma vez que, no cenário atual, o CUAD ainda é considerado de valor elevado, se comparado aos convencionais já utilizados, o que causa certo receio de novos adeptos.

Outro fator importante a ser levantado diz respeito aos equipamentos utilizados para a produção desse concreto, devido à necessidade da cura térmica e/ou sob pressão, o que faz com que o CUAD seja uma realidade atual mais para a indústria de pré-moldados.

Em um futuro próximo, mediante a desenvolvimento e dispersão de conhecimentos sobre esse material, tal tecnologia tem grande chance de engajar no mercado de construção civil, pois proporcionará liberdade em geometria e

esbelteza de peças, sem que seja necessário abdicar da capacidade e resistência, reduzindo o peso própria das estruturas, produzindo um material mais durável e apto a ser inserido em ambientes mais agressivos.

Para isto, o processo produtivo deve ser estendido para além das fábricas de pré-moldados, sendo incorporado ao ambiente do canteiro de obras. Temos ainda que avançar, sendo este material bem promissor do ponto de vista técnico.

REFERÊNCIAS

AXIAL engenharia. **Concreto de Pós Reativo: o concreto que possui resistência a compressão entre 200 MPA E 800 MPA.** Disponível em: <https://axialengenharia.eng.br/2017/05/09/concreto-de-pos-reactivo-o-concreto-que-possui-resistencia-a-compressao-entre-200-mpa-e-800-mpa/>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ARAÚJO, José Milton de. Modelos de previsão da fluência e da retração do concreto. **Estruturas de Concreto**, Rio Grande, n. 4, p. 1-31, abr. 2002. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero_04.pdf. Acesso em: 12 nov. 2021.

BALESTRA, Carlos Eduardo Tino; OZELAME, Jennifer Stephane; SAVARIS, Gustavo. Efeito da adição de fibras de aço e poliméricas na resistência à compressão do concreto de ultra alto desempenho. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 26-35, 11 maio 2020. Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/50503/34748>. Acesso em: 28 out. 2021.

BIZ, Carlos Eduardo. **Concreto de pós reativos.** 2001. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BUTTIGNOL, T. E. T. *et al.* Aplicações do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em obras de reforço e recuperação de estruturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018. p 1 - 9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328171582_Aplicacoes_do_Concreto_de_Ultra_Alto_Desempenho_CUAD_em_obras_de_reforco_e_recuperacao_de_estruturas . Acesso em: 4 abril 2021.

CARVALHO, Leonardo Lima Costa; MOTTA, Carla Araújo. Uso de Fibras de Aço para Execução do Concreto Armado. **Boletim do Gerenciamento**, [S.l.], v. 8, n. 8, p. 65-74, ago. 2019. ISSN 2595-6531. Disponível em: <https://nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento/article/view/413> . Acesso em: 30 out. 2021.

CHRIST, Roberto *et al.* Conceitos e aplicações do concreto de ultra alto desempenho: panorama nacional e internacional. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. , n. 1, p. 89-102, 10 mar. 2019. Semestral. Disponível em: <http://periodicos.saolucas.edu.br/index.php/dialogos/article/view/77/48> . Acesso em: 29 set. 2021.

CHRIST, Roberto. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (uhpc)**. 2019. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

FERREIRA, Leonardo. **Brazilian Voice**, 2018. Governo confirma a data de reabertura do Pulaski Skyway. Disponível em: [https://brazilianvoice.com/bv_noticias/governo-confirma-a-data-de-reabertura-do-](https://brazilianvoice.com/bv_noticias/governo-confirma-a-data-de-reabertura-do-pulaski-skyway.html)

[pulaski-skyway.html](https://brazilianvoice.com/bv_noticias/governo-confirma-a-data-de-reabertura-do-pulaski-skyway.html). Acesso em: 21 de nov. de 2021.

HOTEL Residencial Nakâra / Jacques Ferrier Architecture. **Archdaily**, 2016. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/788601/hotel-residencial-nakara-jacques-ferrier-architecture>. Acesso em: 21 de nov. de 2021.

LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY. **Premiado por museu: concreto colorido dá a aparência perfeita**. 2017. Disponível em: <https://webmagazine.lanxess.com/pt-br/premiado-por-museu-concreto-colorido-da-a-aparencia-perfeita/>. Acesso em: 21 de nov. de 2021.

LIVI, Carolina Noda. **Influência da temperatura e pressão na hidratação e desempenho mecânico de pastas para concreto de ultra-alto desempenho**. 2017. 354 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MULLER, Rodrigo Menegaz; KOELLE, Paulo; ALMEIDA, Claudio Nascimento. A utilização de UHPC em obras no Brasil. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 87, p. 57-62, jul./set. 2017. Trimestral. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao87/files/assets/basic-html/page57.html . Acesso em: 25 set. 2021.

Novo museu em Marseille na França: um espetáculo em concreto. In: Passeio Revestimentos. **Passeio revestimentos**, 2013. Disponível em: <http://www.passeiorevestimentos.com.br/novo-museu-em-marseille-na-franca-um-espetaculo-em-concreto/>. Acesso em: 21 de nov. de 2021.

PERRY, V.H.; PARSEKIAN, G. A.; SHRIVE, N. G.. Inovação em estruturas

com concreto de ultra-alto desempenho na América do Norte. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 87, p. 50-56, jul./set. 2017. Trimestral. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao87/files/assets/basic-html/page5.html . Acesso em: 25 set. 2021.

PROKOPCHUK, Matt. **CBC**, 2018. Bridge failed in 2016, completely severing the Trans-Canada Highway for several hours. Disponível em: <https://www.cbc.ca/news/canada/thunder-bay/nipigon-bridge-no-costs-1.4922674>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ROMPA, Douglas Dutra; GIDRÃO, Gustavo de Miranda Saleme. Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC). **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 73-88, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200388>.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. **Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais**. 2020. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/19866/TES_PPGEC_2020_SOKOLOVICZ%20BORIS_CASANOVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 30 out. 2021.

SALVADOR FILHO, José Américo Alves. Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 87, p. 39-42, jul./set. 2017. Trimestral. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao87/files/assets/basic-html/page5.html . Acesso em: 25 set. 2021.

[basic-html/page5.html](http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao87/files/assets/basic-html/page5.html) . Acesso em: 25 set. 2021.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. H. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc53.pdf> . Acesso em: 13 mai. 2021.

VIABILIDADE. In: CONCEITO.DE. 2019. Disponível em: <https://conceito.de/viabilidade#>. Acesso em: 15 nov. 2021.

VIEIRA, Geilma Lima; MOLIN, Denise Carpena Coitinho dal. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 25-40, mar. 2011. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212011000100003>. Acesso em: 30 out. 2021.

VIANA, Thiago Marques. **Avaliação do comportamento de Concretos de Pós Reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas**. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2236233&key=0e5630a05bfb69e909f724aa6f196492> Acesso em: 25 set. 2021.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus por

me manter até aqui, à minha família pela força que me passa mesmo distante, pois tenho um grande suporte de pessoas que não medem esforços para me socorrer. Agradeço em especial a minha mãe e minha irmã que sabem as minúcias do que sou e não desistem de mim (e também pela compreensão por minha indisponibilidade), ao grupo de apoio UA que foi onde encontrei companheiros e verdadeiramente uma segunda família, pois me falaram palavras de calma quando precisei, assim como palavras duras quando mereci, me aceitaram em meus melhores e piores momentos, sem julgamentos e com um humor sarcástico que foi capaz de me empurrar sempre em frente. Esse trabalho não seria possível sem o empenho da minha orientadora que soube, com maestria, lidar com toda minha insegurança e ansiedade, por isso, sou grata.