

Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC)

Mechanical characterisation of the stiffness and strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)

Douglas Dutra Rompa 

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão 

Resumo

O Concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC) é um novo material desenvolvido para apresentar propriedades superiores, tais como alta resistência à compressão (superior a 100 MPa), grande durabilidade, baixa permeabilidade e comportamento dúctil satisfatório. O presente artigo reporta a extensiva caracterização mecânica do UHPFRC e comparação com a referência do concreto de pós reativos (CPR). Nesse sentido, são obtidos os valores de resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28}$), módulo de elasticidade estático (E_{ci}), tenacidade (T) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d). Observou-se que o UHPFRC apresentou aumento de 1,21 e 1,5 vez respectivo à resistência e à tenacidade em relação ao CPR respectivamente. No entanto, quando comparados o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade tangente inicial, tanto o CPR quanto o UHPFRC apresentaram valores similares. As fibras não colaboraram para um nível baixo de tensão, mas foram ativadas para carregamentos superiores a 30% da tensão de ruptura. O módulo de elasticidade dinâmico do UHPFRC foi monitorado até os 365 dias, quando se observou que o material apresentou ganho de 3,08 GPa (1,07 vez) em relação aos 40 dias de maturidade. Tal ganho tardio de rigidez é gerado pela adição mineral de sílica ativa. Além disso, uma lei constitutiva de compressão foi obtida para o UHPFRC e para o CPR, obtendo-se um valor de $R^2 = 0,992$.

Palavras-chave: Concreto de ultra alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC). Fibras. Concreto de pós reativos (CPR). Caracterização mecânica.

Abstract

Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) is a new material developed to present superior properties, such as high uniaxial compressive strength (superior to 100 MPa), high durability, low permeability and satisfactory ductile behaviour. This paper presents the mechanical characterisation of UHPFRC and compares it with a reference mixture of reactive powder concrete (RPC). The mechanical characterisation consisted in obtaining the following properties: compressive strength at 28 days ($f_{c,28}$), static elastic modulus (E_{ci}), toughness (T) and dynamic elastic modulus (E_d). UHPFRC presented 20% and 51% gain of strength and toughness, in relation of RPC. Nevertheless, the stiffness values (i.e., E_{ci} and E_d) were very similar to RPC. This behaviour is explained by the fact that steel fibres are not activated at low levels of stress, however, at higher loads, the toughness increases in UHPFRC samples. Furthermore, E_d were monitored up to 365 days, and there was considerable gain in stiffness over time, mainly due the addition of silica fume. Furthermore, a constitutive compression law was obtained for UHPFRC and RPC, with $R^2 = 0,992$.

Keywords: Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). Reactive Powder Concrete (RPC). Mechanical characterisation.

¹Douglas Dutra Rompa

¹Centro Universitário Central Paulista
São Carlos - SP - Brasil

²Gustavo de Miranda Saleme
Gidrão

²Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 23/11/18
Aceito em 29/09/19

Introdução

Em 1993, o trabalho de Richard e Cherezy foi precursor ao elevar as características mecânicas de misturas cimentícias a patamares até então nunca vistos. Assim, foi desenvolvido o concreto de pós reativos (CPR), por meio de utilização de partículas mais finas, adições minerais e tratamento térmico (CHEYREZY; RICHARD, 1994; RICHARD; CHEYREZY, 1995). Esses materiais se destacaram por sua grande durabilidade e alta resistência, características observadas devido à seleção rigorosa de materiais, projeto de empacotamento de partículas e processo de mistura padronizado (ALI, 2013; HABEL; GAUVREAU, 2008; SPASOJEVIĆ, 2008). Assim, o CPR apresentava resistência à compressão na ordem de 150-200 MPa com cura de autoclave (CHEYREZY; RICHARD, 1994; RICHARD *et al.*, 1995) e porosidade inferior a 4% (ZDEB, 2013). Portanto, devido a suas características superiores de baixa porosidade e consideráveis durabilidade e resistência, o material tornou-se proeminente na utilização em instalações de armazenamento de resíduos industriais e nucleares (YAZICI *et al.*, 2015).

Com notórios avanços tecnológicos dos superplastificantes e adições minerais, permitiu-se a produção de concretos com altas proporções de finos, perfeitamente empacotados e com baixas relações água/aglutinante (ZDEB, 2013; FEHLING *et al.*, 2014). Segundo Shi *et al.* (2015), o termo de “Concreto de Ultra Alto desempenho” (CUAD ou UHPC – *Ultra-High-Performance Concrete*) aparece no ano de 1994, quando De Larrard e Sedran (1994) otimizam uma mistura de CPR por meio do empacotamento de grãos, tendo denominado esse novo traço de UHPC. Nesse sentido, é notório que a mistura de CPR é o grande precursor do UHPC (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; AİTCIN, 2007). Dessa forma, como requisitos básicos, o UHPC deverá apresentar (a) propriedades mecânicas elevadas no longo prazo, (b) baixa permeabilidade e (c) longa vida em ambientes adversos (ZDEB, 2013; HANNA; MORCOUS; TADROS, 2014).

É notório que atualmente existem várias definições de UHPC na literatura, mas é bem aceito que se trata de uma mistura cimentícia com relação água-cimento (a/c) de aproximadamente 0,2 e resistência mínima à compressão aos 28 dias de no mínimo 100 MPa (HUNG; LEE; CHAN, 2019), resistência à tração de 5 MPa (ASSOCIATION..., 2013; HABEL *et al.*, 2006; RUSSEL; GRAYBEAL, 2013; TUAN *et al.*, 2011; WILLE *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2016), sendo ainda esses valores de 5 a 16 vezes maiores que aqueles observados em concreto convencional (WANG *et al.*, 2015). No entanto, com o aumento severo de resistência e a diminuição das imperfeições da microestrutura, o material tende a romper de forma frágil e brusca. Para contornar essa limitação, a fragilidade é geralmente compensada pela adição de fibras, o que transforma o UHPC em UHPFRC – *Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete* (FEHLING *et al.*, 2014).

Como estimativa inicial sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de uma mistura de UHPC/UHPFRC com cura a vapor, Cavill, Rebstrost e Perry (2006) elaboraram as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas usuais do UHPFRC

| Propriedade | Valor |
|---|---|
| Fluidez – <i>Flow table</i> | 190-200 mm após 20 golpes |
| Resistência à compressão com cura térmica | 150 MPa |
| Resistência à tração sob flexão | 24 MPa |
| Primeira fissura em flexão | 20 MPa |
| Módulo de elasticidade | 47 GPa |
| Densidade | 2.450 kg/m ³ |
| Retração | < 500 μ depois de 50 dias em cura úmida e 0 em cura com calor |

Fonte: Cavill, Rebstrost e Perry (2006).

Tabela 2- Propriedades de durabilidade do UHPC

| Propriedade | Valor |
|---------------------------------|----------------------------|
| Porosidade total | 2-6% |
| Microporosidade | < 1% |
| Absorção de água | < 0,2 kg/m ² |
| Difusão de íons Cl ⁻ | 0,02E-12 m ² /s |
| Resistência elétrica (s/ fibra) | 1,13E3 kΩcm |
| Resistência elétrica (c/ fibra) | 137 kΩcm |
| Coefficiente de abrasão | 1,3 |

Fonte: Cavill, Rebstrost e Perry (2006).

Devido às propriedades mecânicas e de durabilidade, o UHPFRC tornou-se em pouco tempo um material emergente, com várias aplicações na indústria (AHLBORN; PUESE; MISSON, 2008; REBENTROST; WIGHT, 2008; SALEEM, 2011), fornecendo soluções econômicas, sustentáveis, duráveis e inovadoras em áreas em que o concreto normal luta para encontrar uma solução viável.

Propriedades mecânicas do UHPC/UHPFRC

Resistência à compressão uniaxial (f_c)

A resistência à compressão uniaxial (f_c) do UHPFRC/UHPC foi extensivamente investigada por muitos pesquisadores. Corinaldesi e Moriconi (2012) avaliaram a influência do fator a/c e maturidade em relação ao valor de f_c . As amostras foram curadas à temperatura ambiente (20 °C + 100% UR) com relações a/c variáveis de 0,20 a 0,32. Os autores notaram que o aumento progressivo da relação a/c nem sempre conduz a matrizes de UHPC menos resistentes, uma vez que, para um valor intermediário de a/c = 0,24, observa-se o melhor resultado de f_c , diferentemente do que é esperado para casos de concretos convencionais. Essa observação experimental é explicada pelo fato de que as propriedades da mistura fresca tais como a coesão e trabalhabilidade passam a influenciar severamente as propriedades mecânicas do UHPC/UHPFRC. Além disso, os autores relataram o rápido desenvolvimento de f_c ao longo do tempo, uma vez que foram observados valores de f_c nos primeiros dias na ordem de 30-40 MPa, e para a idade de 28 dias, 150-160 MPa, com cura térmica.

Resultados similares foram observados por Habel *et al.* (2006) e Toledo Filho *et al.* (2012). Habel *et al.* (2006) demonstraram que misturas de UHPFRC constituídas por CEM I 45,2 R apresentaram rápido desenvolvimento da reação de hidratação, sendo o fenômeno observado pelo aumento do grau de hidratação (r). Esses autores demonstraram experimentalmente que as propriedades mecânicas começavam a se desenvolver após 26 h da adição de água na mistura ($r = 0$) e que já aos 7 dias observava-se $f_c = 140$ MPa com $r = 0,83$. Toledo Filho *et al.* (2012) desenvolveram um UHPFRC sustentável baseado em cimento de escória de alto forno, sílica, microfibras de wollastonita, fibras de aço e superplastificante. Mais uma vez, observou-se rápido desenvolvimento da resistência à compressão, cujo valor de f_c no terceiro dia era igual a 75 MPa, seguido por 111 MPa, 162 MPa e 180 MPa para as idades subsequentes de 7, 28 e 180 dias respectivamente.

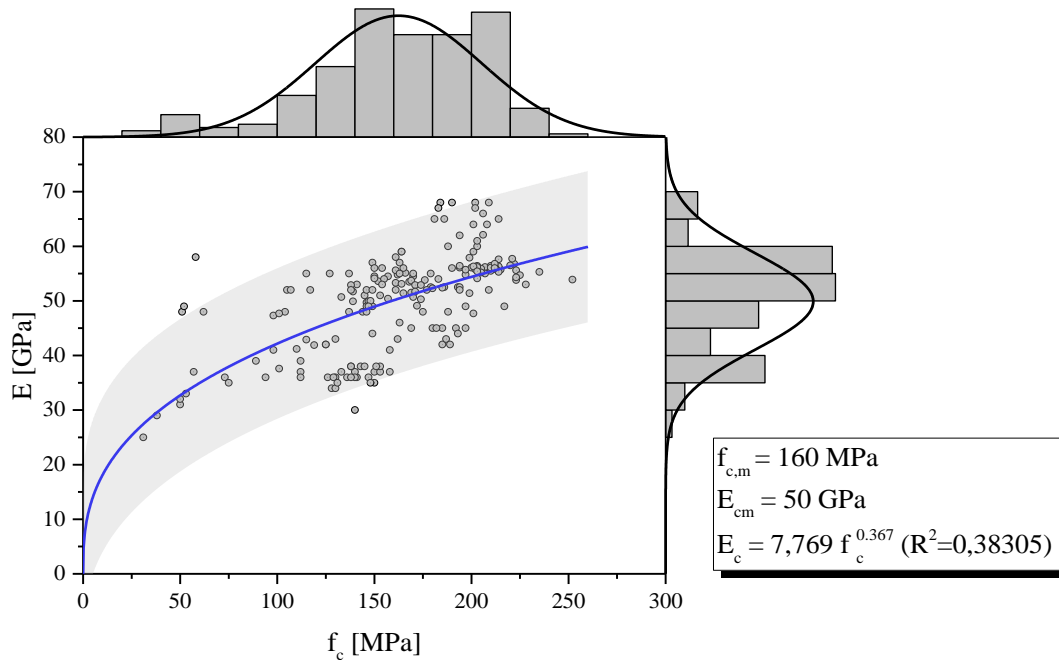
Módulo de elasticidade do UHPFRC

Graybeal (2007) desenvolveu uma equação para a estimativa do módulo de elasticidade estático tangente inicial do UHPFRC (E_{ci}) em função da resistência de compressão uniaxial característica (f_c), conforme a Equação 1. Similarmente, Alsalmán *et al.* (2017) coletaram dados da literatura para a elaboração da Equação 1, por meio de 223 amostras em diferentes idades, com E_{ci} variando na faixa de 25 GPa a 68,3 GPa. Ainda nessa base de dados, pode-se inferir por análise estatística que o valor usualmente encontrado na literatura para o módulo de elasticidade do UHPC/UHPFRC é na faixa de 37 GPa a 68 GPa, com valor médio de aproximadamente 50 GPa, conforme a distribuição normal do eixo vertical da Figura 1.

Comparativamente, pode-se afirmar que concretos convencionais apresentam E_{ci} usualmente na faixa de 25 GPa a 55 GPa (GIDRÃO, 2015). Portanto, conclui-se por meio da Figura 1 e observações experimentais de Gidrão (2015) que a melhora da resistência e das demais propriedades mecânicas do UHPFRC não é acompanhada por considerável aumento de E_{ci} . Cabe ressaltar que esse fenômeno, juntamente com a utilização de estruturas leves e delgadas, pode gerar problemas patológicos como os estados-limites de serviço e vibrações e deformações excessivas, além da instabilidade, o que justifica futuras investigações nesses assuntos.

$$E_{ci} = 3,840\sqrt{f_c'} \quad 126MPa \leq f_c' \leq 193MPa \quad \text{Eq. 1}$$

Em que f_c' é calculado conforme o ACI 318-11 (AMERICAN..., 2011).

Figura 1 - Distribuição dos valores de E_{ci} obtidos pela literatura

Dado o contexto de potencial de aplicabilidade do UHPFRC e do UHPC na indústria da construção civil, pode-se listar os seguintes objetivos para o presente artigo:

- apresentar a metodologia básica de fabricação do UHPFRC em uma betoneira usual;
- caracterizar a resistência uniaxial de compressão aos 28 dias ($f_{c,28}$);
- obter o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_{ci}) desse material;
- quantificar a tenacidade para a compressão;
- determinar a influência das fibras nas propriedades supracitadas; e
- realizar um estudo comparativo das propriedades supracitadas com o concreto de pós reativos.

Materiais e métodos

O presente trabalho objetiva a caracterização da rigidez e resistência de misturas de UHPFRC e CPR. Nesse sentido, foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos (5 cm diâmetro x 10 cm comprimento) para dois traços diferentes (i.e., UHPFRC e CPR). Utilizaram-se apenas agregados finos, e o traço foi baseado nos extensivos estudos experimentais já realizados no laboratório de estruturas da USP-São Carlos, LE-SET (KRAHL; CARRAZEDO; EL DEBS, 2018; KRAHL; GIDRÃO; CARRAZEDO, 2018). A Tabela 3 demonstra os traços estudados em massa. Dessa forma, 5 corpos de prova de cada traço foram ensaiados aos 28 dias para a obtenção do f_c e do E_{ci} , com ensaio de compressão uniaxial. Os outros 5 foram analisados por meio do ensaio acústico, um ensaio não destrutivo, realizado nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 40 dias. A areia utilizada foi industrial, da mineração Jundu, com diâmetro máximo de agregado de 0,42 mm. Já as fibras metálicas apresentavam dimensões características de 12 mm (maior dimensão) x 0,2 mm (diâmetro), com resistência de $f_u = 2700 \text{ MPa}$. Essas fibras ainda apresentam banho de cobre, com o objetivo de melhorar a aderência com a matriz cimentícia, conforme os procedimentos usuais para a produção do UHPFRC (JANKOVIC *et al.*, 2016; KRAHL *et al.*, 2018; PENG; HU; DING, 2010), em que o material é tipicamente produzido com fibras revestidas de cobre para aumentar o atrito e melhorar a transferência de tensões entre fissuras.

Neste trabalho a mistura de UHPFRC foi feita em um misturador de eixo horizontal de grande potência (vide Figura 2a), próprio para a produção do UHPFRC. Primeiramente, todos os componentes (exceto as fibras) foram misturados a seco por 5 min. Posteriormente, adicionaram-se água e superplastificante na mistura. Após 10 min de mistura, obteve-se a homogeneidade necessária, conforme se observa na Figura 2b. Nesse

instante são adicionadas fibras metálicas, e o concreto fresco é misturado por mais 5 min. O espalhamento foi determinado conforme a NBR 15823-2 (ABNT, 2017), que resultou em 60 cm, conforme as Figuras 2c e 2d. Ainda que não fosse necessário, os corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm foram moldados com o auxílio de uma mesa vibratória para eliminar possíveis vazios. Após 24 h da concretagem, os moldes foram retirados, e os corpos de prova foram transferidos para a cura úmida.

Aos 28 dias, 5 corpos de prova de cada traço foram retificados e ensaiados em condição saturada com superfície para a obtenção da resistência de compressão uniaxial ($f_{c,28}$) e módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}). As outras 5 amostras foram analisadas por meio de ensaio acústico, fazendo-se os ensaios com 1, 3, 7, 14, 28, 40 e 365 dias de maturidade do concreto.

Tabela 3 - Dosagens de concreto, em massa

| ID | Cim.* (kg) | Areia (kg) | Sílica ativa (kg) | Fibras (%)** | Água (kg) | Sp. (%)*** |
|--------|---------------|------------|----------------------|-----------------|-----------|---------------|
| UHPFRC | 1 | 1 | 0,266 | 1,165 | 0,2 | 9 |
| UHPC | 1 | 1 | 0,266 | - | 0,2 | 9 |

Nota: *o cimento utilizado foi o CPV-ARI Votorantim;
 **a porcentagem das fibras é sobre o volume total; e
 ***a porcentagem do superplastificante é sobre a massa de cimento.

Figura 2 - Aspectos sobre a produção do concreto



Ensaio de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram efetuados em uma prensa Instron servo-hidráulica com capacidade de 1.500 kN e controle de deslocamento. Dois sensores LVDT com comprimento de 50 mm foram fixos em cada lado do corpo de prova para se calcular o deslocamento longitudinal (*vide* Figura 3). O módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) foi obtido pela reta dada pelos níveis de tensão de 0-30% do carregamento de ruptura (i.e., $0,30 f_c$), conforme as prescrições da NBR 8522 (ABNT, 2019).

Ensaio acústico

Nesta seção adota-se o procedimento e equações dados pelas normas internacionais E1876-01 (AMERICAN..., 2001) e C215-02 (AMERICAN..., 2003) para o ensaio acústico. Esse ensaio consiste basicamente em excitar a peça a ser analisada com um impacto de curta duração, captando por meio de um microfone o sinal acústico gerado pela vibração. Por meio de uma transformada rápida de Fourier (FFT), leva-se o problema no domínio do tempo para o da frequência, e assim se determina a frequência natural fundamental ($f_{n,1}$) da peça. Posteriormente é possível correlacionar, por meio de equações apresentadas na literatura (Equações 2 a 7), essa mesma frequência natural fundamental a parâmetros como massa específica do material (ρ), geometria do corpo de prova (comprimento, largura, diâmetro), coeficiente de Poisson dinâmico (ν_d) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d). O esquema do ensaio pode ser contemplado conforme a Figura 4. Um corpo de prova cilíndrico pode apresentar dois modos de vibração fundamentais:

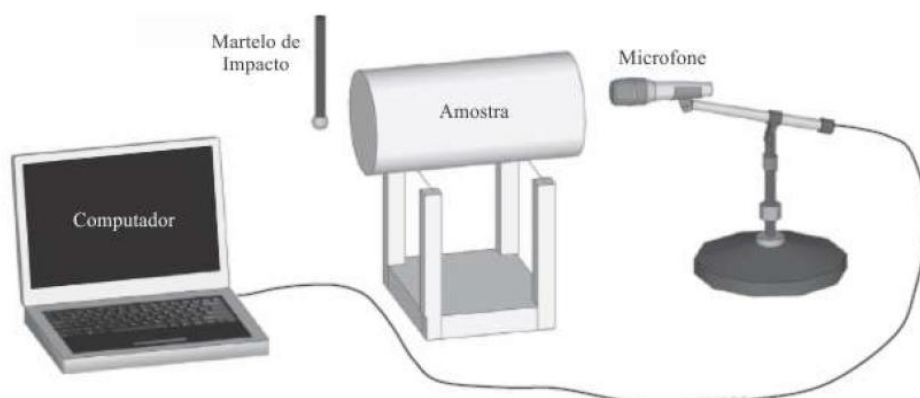
- (a) flexional; e
- (b) longitudinal.

A caracterização desses picos de frequência natural é conforme a Figura 5.

Figura 3 - Esquema do ensaio estático

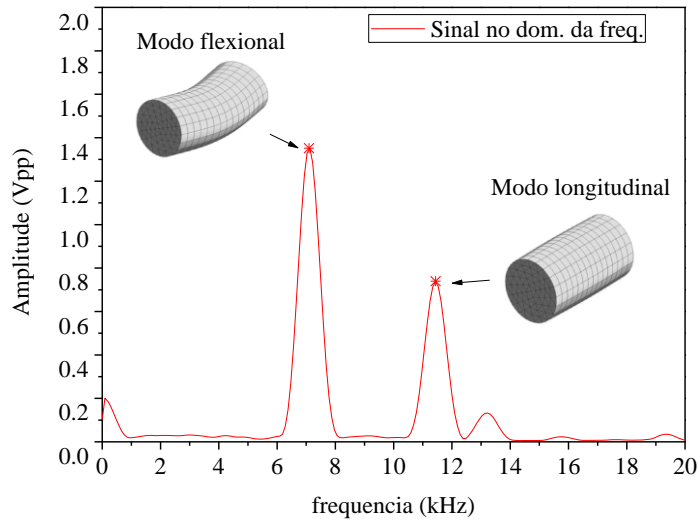


Figura 4 - Esquema do ensaio acústico



Fonte: Haach *et al.* (2013).

Figura 5 - Caracterização dos picos de frequência natural



Fonte: Krahl, Gidrão e Carrazedo (2018).

O módulo de elasticidade obtido pelo modo de vibração flexional ($E_{d,f}$, em Pa) é determinado através da Equação 2:

$$E_{d,f} = 1,6067 \left(\frac{L^3}{D^4} \right) m \cdot f_{N,1,f}^2 \cdot T_1' \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

m é a massa do corpo de prova (em gramas);

D é o diâmetro do corpo de prova (em mm);

L é o comprimento do corpo de prova (em mm);

$f_{N,1,f}$ é a frequência natural fundamental flexional obtida em um sinal como o da Figura 5 (em hertz); e

T_1' é um fator de correção para o modo fundamental flexional dado pela Equação 3:

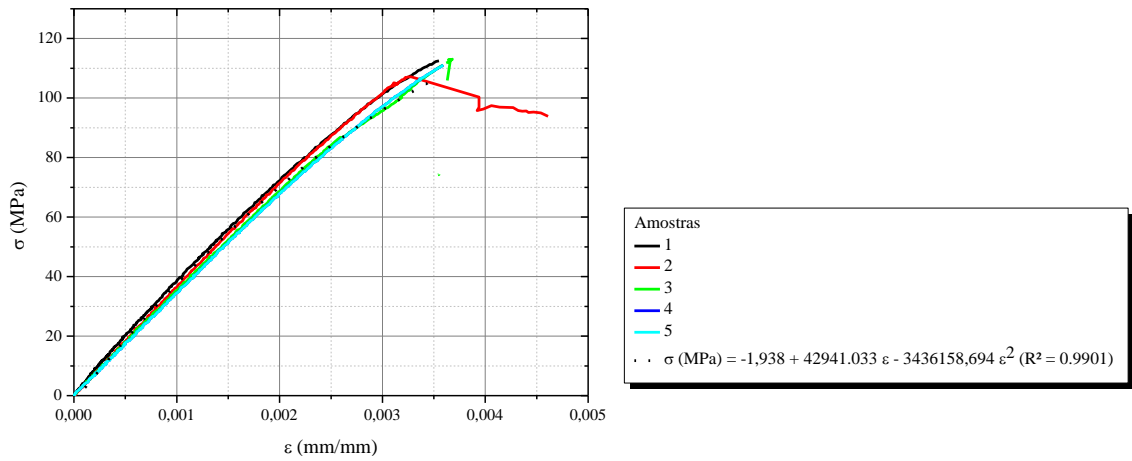
$$T_1' = 1 + 4,939(1 + 0,0752\nu_d + 0,8109\nu_d^2) \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 0,4883 \left(\frac{D}{L} \right)^4 - \frac{4,691(1 + 0,2023\nu_d + 2,173\nu_d^2) \left(\frac{D}{L} \right)^4}{1,000 + 4,754(1 + 0,1408\nu_d + 1,536\nu_d^2) \left(\frac{D}{L} \right)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que ν é o coeficiente de Poisson dinâmico, estimado em 0,20.

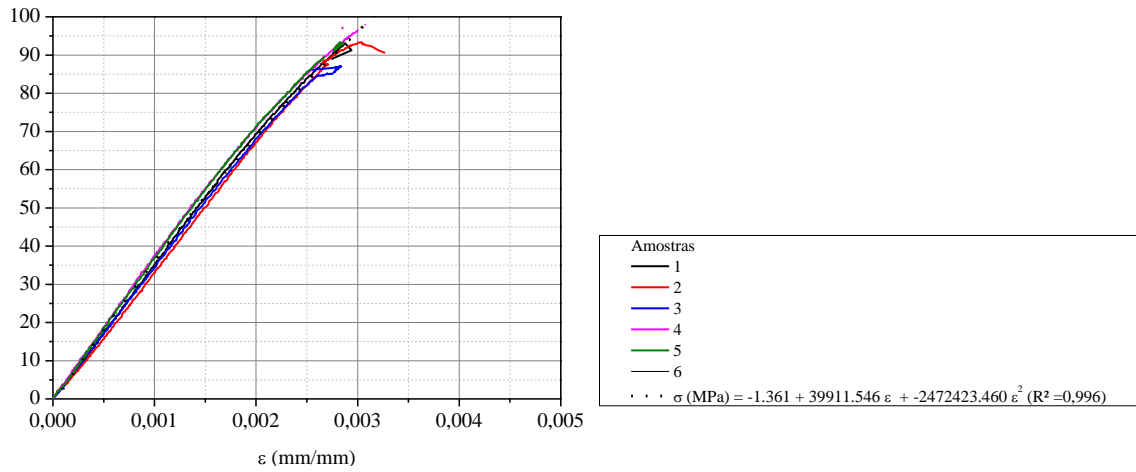
Já o módulo de elasticidade dinâmico é obtido por vibração longitudinal ($E_{d,l}$, em Pa), mediante a excitação do corpo de prova cilíndrico com um impacto de curta duração de forma centrada, determinado conforme a Equação 4:

$$E_{d,l} = 5,093 \left(\frac{L}{D^2} \right) m \cdot f_{N,1,l}^2 \quad \text{Eq. 4}$$

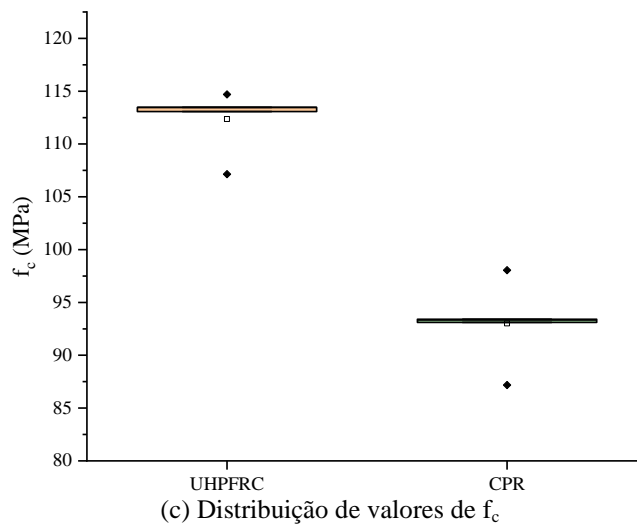
Figura 6 - Relação constitutiva de compressão e distribuição de valores



(a) Para o UHPFRC



(b) Para o CPR



(c) Distribuição de valores de f_c

Resultados

Mecânicos estáticos

As Figuras 6a e 6b apresentam respectivamente os diagramas de tensão-deformação na compressão para o UHPFRC e o CPR. Para o UHPFRC notam-se valores de resistência médios de 112 MPa. Já para o CPR observam-se valores médios de 93 MPa. A Figura 6c apresenta um *box plot* com as resistências das amostras de CPR e UHPFRC. Nesse caso, observa-se que a adição de fibras gerou certo grau de confinamento, que aumenta a resistência média de compressão dos corpos de prova em 1,21 vez. Além disso, foi obtida uma lei constitutiva para o CPR e o UHPFRC por meio de um *fit* parabólico experimental. Tal lei constitutiva é conforme as Equações 5 e 6, respectivamente para o UHPFRC e o CPR, ambos apresentando correlação de $R^2 = 0,99$. Uma vez que a resistência à compressão é superior a 100 MPa, pode-se adotar a nomenclatura de UHPFRC, conforme concretos com propriedades mecânicas similares na literatura (HUNG; LEE; CHAN, 2019; SU *et al.*, 2016).

$$\sigma \text{ (MPa)} = -1,938 + 42941.033 \varepsilon - 3436158,694 \varepsilon^2 \quad \text{Eq. 5}$$

$$\sigma \text{ (MPa)} = -1.361 + 39911.546 \varepsilon - 2472423.460 \varepsilon^2 \quad \text{Eq. 6}$$

A tenacidade é a energia que o material absorve até sua ruptura, dada pela área sob o gráfico de tensão-deformação de compressão, conforme a Equação 7 (KRAHL; GIDRÃO; CARRAZEDO, 2019). Esse parâmetro é medido da deformação zero até a deformação de pico ($\varepsilon_{\text{pico}}$). A Figura 7a apresenta a diferença entre a tenacidade obtida pelas leis constitutivas parabólicas do CPR e do UHPFRC. Desses resultados observa-se que a utilização de fibras metálicas aumenta não somente a resistência do corpo de prova, mas também sua tenacidade. A Figura 7b apresenta o *box plot*, que contém a tenacidade calculada para amostras de CPR e de UHPFRC. Nota-se que a tenacidade do UHPFRC é 1,5 vez maior que a do CPR sem fibras, o que demonstra novamente que a adição de fibras aumenta consideravelmente a tenacidade na ruptura do UHPFRC, contribuindo para uma ruptura dúctil. Diferentemente, para o caso do CPR foi observada uma ruptura frágil.

A resiliência é dada pela energia elástica de deformação, calculada pela área abaixo do ramo linear do diagrama de tensão-deformação. Nesse sentido, nota-se pela Figura 7a que as resiliências do UHPFRC e do CPR são iguais.

$$T_c = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{\text{pico}}} \sigma d\varepsilon \quad \text{Eq. 7}$$

O módulo de elasticidade estático é apresentado na Figura 8. Nota-se que a adição de fibras não influencia o valor médio de E_{ci} , observando-se praticamente o mesmo valor médio (quadrados no *box plot*) para o UHPFRC e o CPR, de acordo com a Figura 8.

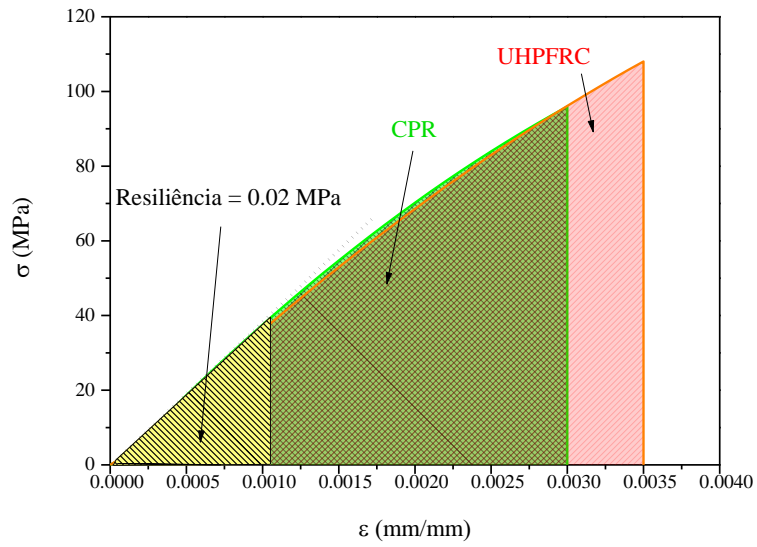
Módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 9a demonstra o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico E_d em função do tempo (em dias) para os traços de CPR e de UHPFRC. É possível verificar que, dentro da variabilidade experimental, o comportamento de E_d é praticamente igual para os dois casos. Observa-se que já em 5 dias ambos os concretos apresentam módulo de elasticidade dinâmico próximo de 32 GPa, sendo esse valor aproximadamente 80% do valor de E_d para 28 dias. Esse rápido crescimento de E_d em função da maturidade é explicado pela utilização do CPV-ARI, que acelera as reações de hidratação do cimento anidro que ocorrem ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

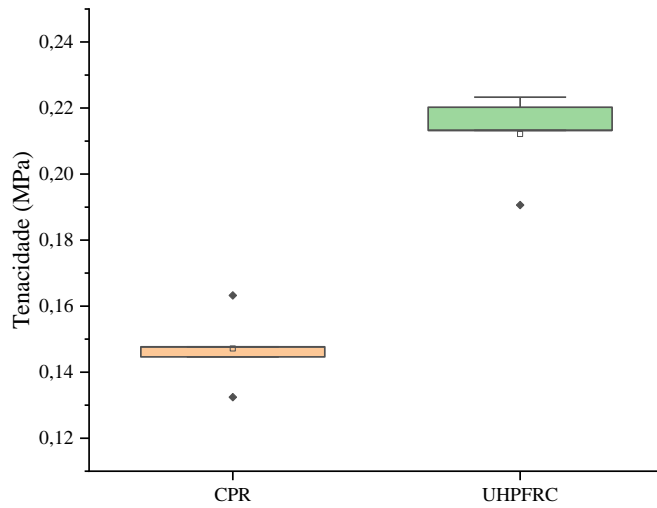
A Figura 9b apresenta o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico do UHPFRC até os 365 dias de maturidade. Do gráfico nota-se que em idades mais avançadas ocorrem reações pozolânicas tardias devido à adição de pó de sílica ativa, atingindo valores médios de 52 GPa para 365 dias de cura úmida.

Essa tendência é confirmada estatisticamente pela Figura 9c, onde se comparam em um *box plot* os valores de E_d para as maturidades de 40 e 365 dias. Observando os valores médios, nota-se o aumento de 40,86 GPa (40 dias) para 43,88 GPa (365 dias), um aumento médio de 1,07 vez. Essa é uma indicação estatística do aumento de módulo de elasticidade dinâmico devido às reações pós-reativas.

Figura 7 - Comparação entre as tenacidades do UHPFRC e CPR



(a) Leis constitutivas



(b) Box plot

Figura 8 - Distribuição de valores de E_{ci}

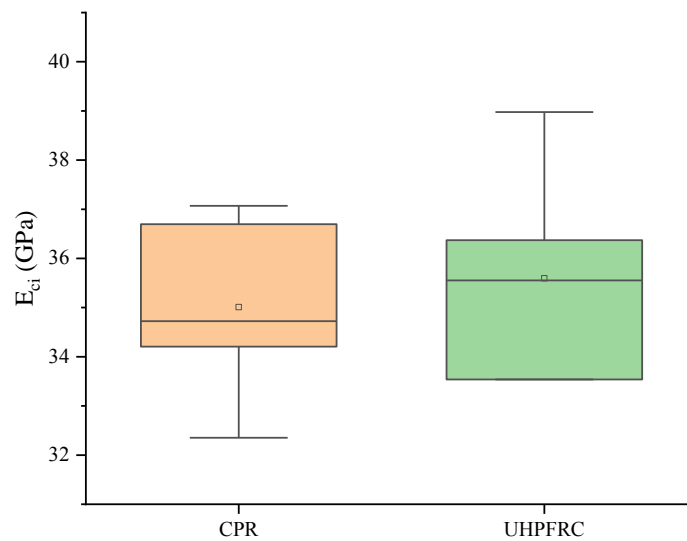
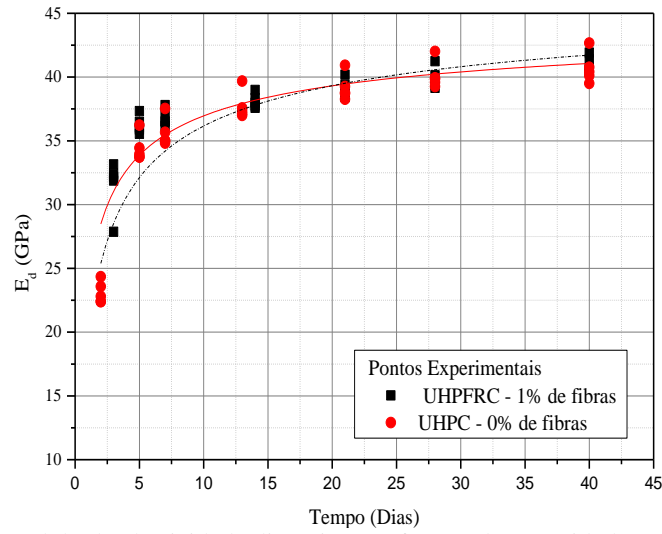
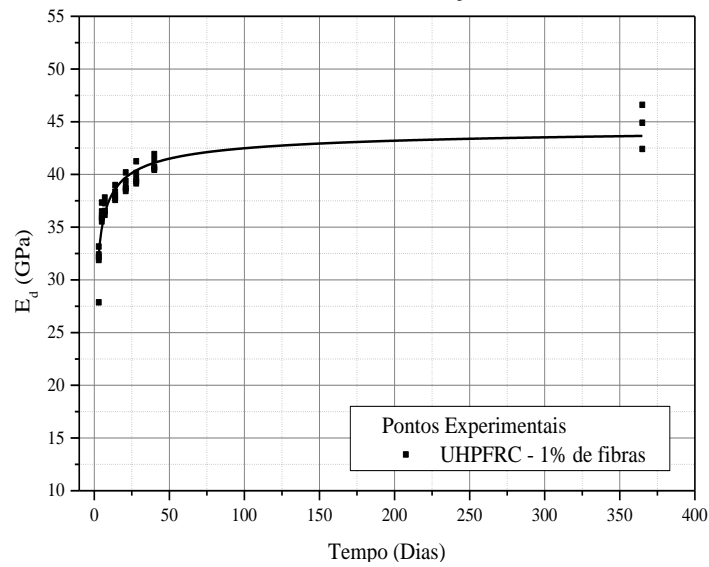


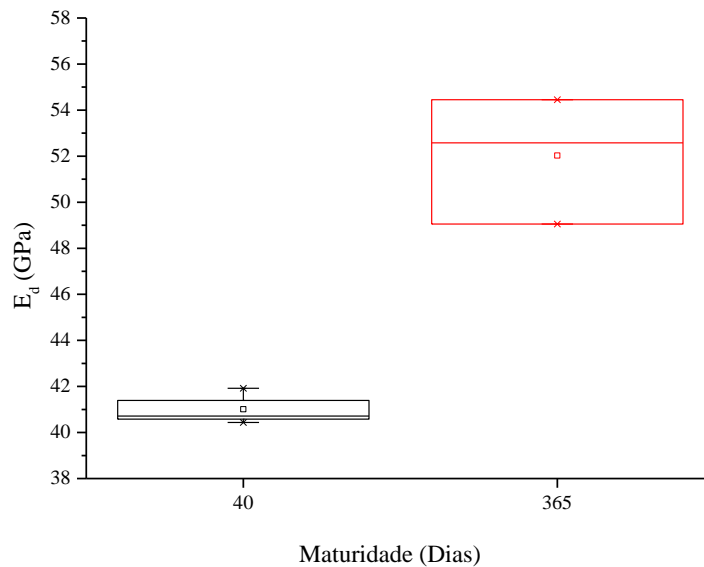
Figura 9 - Módulo de elasticidade dinâmico



(a) Evolução do módulo de elasticidade dinâmico em função da maturidade (CPR vs. UHPFRC)



(b) Evolução do módulo de elasticidade dinâmico do UHPFRC até 1 ano



(c) Comparação entre o módulo de elasticidade do UHPFRC com 40 dias e 365 dias

A Figura 10 apresenta a relação entre os módulos dinâmicos e estáticos (i.e., E_d/E_{ci}). Dessa figura observa-se que apresenta média de 1,11 e 1,12 respectivamente para o UHPFRC e o CPR. Resultados similares são obtidos pela literatura, em que se afirma que concretos de alta resistência apresentam relação E_d/E_{ci} geralmente de 1,10 (GIDRÃO, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Efeito de adição das fibras metálicas

Conforme os resultados até agora apresentados, pode-se confirmar que as fibras não colaboram para o aumento do módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, devido ao baixo nível de fissuração em que essas propriedades são determinadas. A Figura 11 apresenta a comparação entre módulo de elasticidade dinâmico do UHPFRC e CPR aos 28 dias. Nota-se que ambos os materiais apresentam o valor médio de E_d muito próximo, o que demonstra que para pequenas deformações e sem fissuração os materiais se comportam de forma similar. A Figura 12 confirma a hipótese, pois aos 28 dias a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico do concretos com fibras e o sem fibras (i.e., $E_{d,c/fibras}/E_{d,s/fibras}$) apresenta distribuição normal centrada em 1, o que demonstra que a adição de fibras estatisticamente não representa ganho de rigidez da mistura. Sabe-se que a fibra metálica é um material que apresenta um módulo de elasticidade mais elevado que o concreto ($E_{fibra} = 210 \text{ GPa} \gg E_{d,s/fibras} = 40 \text{ MPa}$), no entanto essa adição é em pequena fração volumétrica ($V_f = 1,16 \%$), o que praticamente não altera o módulo de elasticidade. Além disso, o módulo de elasticidade dinâmico é obtido sob baixas deformações (e consequentemente pouca danificação da matriz cimentícia), onde a fibra não se encontra ativada e totalmente embutida na matriz.

Diferentemente, para os níveis de deformação e fissuração maiores, as fibras são “ativadas”, melhorando o comportamento do concreto. Nesse sentido, a Figura 13 apresenta o histograma de proporção entre f_c para concretos com fibras e sem fibras (i.e., UHPFRC/CPR). Pode-se perceber para esse caso que a distribuição normal fica em torno da média de 1,20, demonstrando a melhoria em 20% na capacidade de carga última para concretos com utilização de fibras. Após tensões de $0,3 f_c$ a $0,4 f_c$ ocorre danificação da matriz cimentícia, e assim, a adição de fibras atua como ponte de transferência de tensões, aumentando a resistência à compressão, o que contribui para o controle de fissuração, confinamento e, consequentemente, para o aumento de suas tensões últimas de ruptura f_c . Esse resultado também confirma os comportamentos superiores de tenacidade e resistência do UHPFRC em relação ao CPR (Figuras 6c, 7a e 7b).

Figura 10 - Comparação entre UHPFRC e CPR aos 28 dias

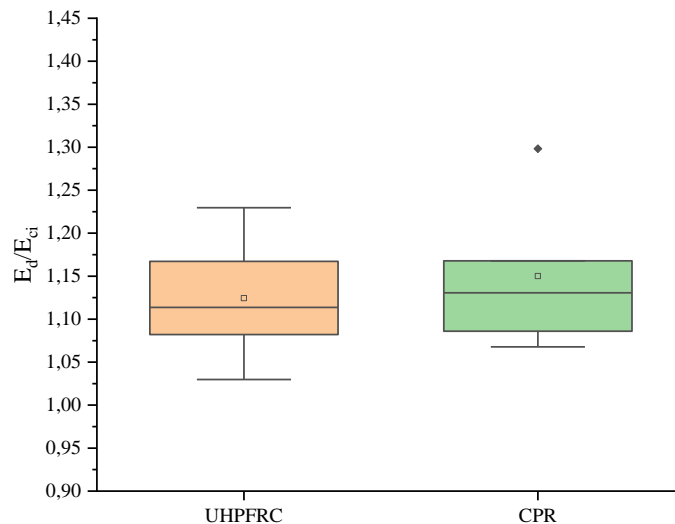


Figura 11 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico entre UHPFRC e CPR aos 28 dias

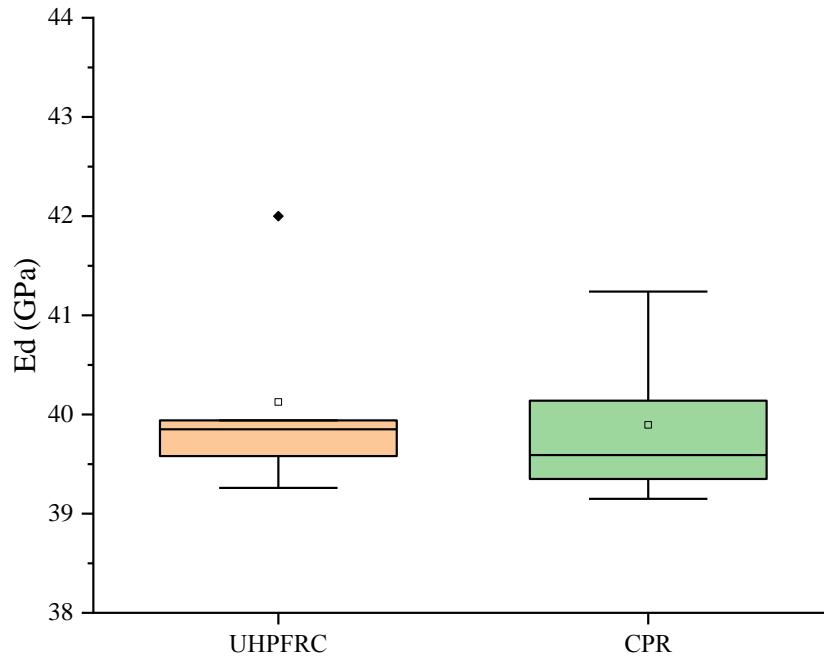


Figura 12 - Análise estatística da razão $E_{d,c}/E_{d,s}/E_{fibras}$

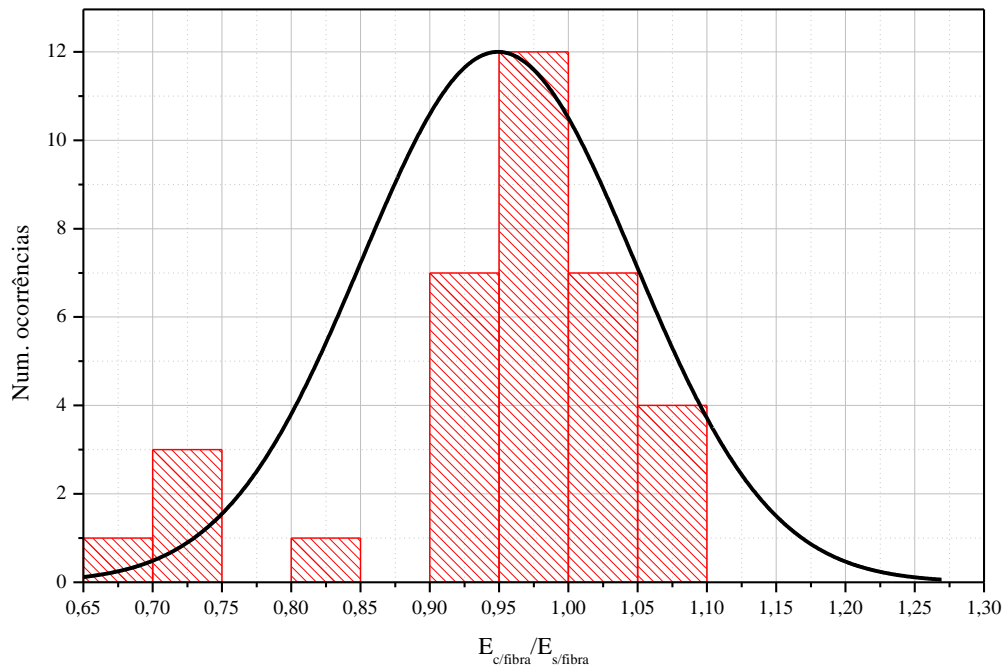
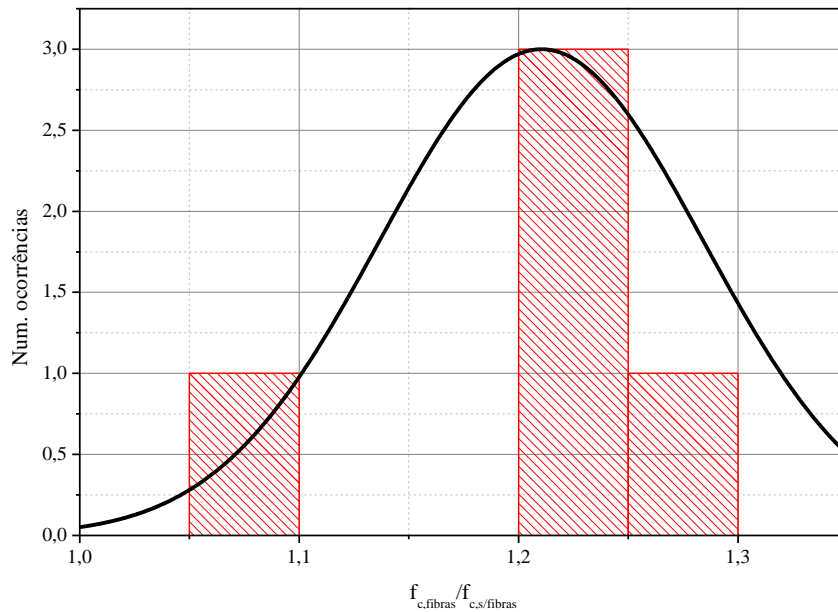


Figura 13 - Análise estatística da razão $f_{c, \text{fibras}}/f_{c, \text{s/fibras}}$ 

Conclusões

O presente artigo desenvolveu o estudo de caracterização mecânica de concretos de pós reativos e UHPFRC quanto a resistência, rigidez (estática e dinâmica) e tenacidade. Os seguintes aspectos são relevantes:

- o UHPFRC apresentou resistência 1,21 vez maior ($f_c = 112$ MPa) que a referência de CPR;
- foi obtida uma lei constitutiva parabólica para o CPR e para o UHPFRC;
- a tenacidade do UHPFRC na compressão foi 1,5 vez maior que a do CPR. O aumento da tenacidade resolve um problema clássico do concreto de alta resistência, que é a ruptura brusca;
- cabe salientar que a determinação da tenacidade seria mais conclusiva quando obtida pelo ensaio de flexão, sendo essa situação mais adequada para maiores conclusões sobre esse parâmetro. Nesse sentido, os autores recomendam a avaliação dessa situação para futuros estudos. No entanto, espera-se que essas observações levem às mesmas constatações apresentadas neste artigo;
- observou-se um crescimento de 3,08 GPa (1,07 vez) para o módulo de elasticidade dinâmico de amostras com maturidades entre 40 e 365 dias. Tal crescimento é devido à adição de pós reativos;
- obteve-se a relação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático de $E_d/E_{ci} = 1,1$, aos 28 dias;
- a adição de fibras metálicas não gerou considerável melhoria na rigidez; e
- o aumento considerável da resistência, assim como valores de rigidez praticamente iguais aos concretos usuais indicam a necessidade de mais estudos do material em situações de estados-limites de serviço, sobretudo em casos de deformações excessivas, vibrações e instabilidade.

Referências

- AHLBORN, T. M.; PUESE, E. J.; MISSON, D. L. **Ultra-high performance concrete for Michigan bridges: material performance: phase I**. Michigan: Dept. of Transportation, 2008.
- AÏTCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2007.
- ALI, A. **Behaviour of prestressed ultra-high performance concrete i-beams subjected to shear and flexure**. Ottawa, 2013. University of Ottawa, Ottawa, 2013.
- ALSALMAN, A. *et al.* Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918-928, 2017.

- AMERICAN CONCRETE INSTITUT. **ACI 318**: building code requirements for structural concrete. 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **C215-02**: standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. West Conshohocken, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **E1876-01**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIATION FRANCAISE DE GÉNIE CIVIL. **Ultra high performance fibre-reinforced concretes, recommendations**. France, 2013.
- CAVILI, B.; REBENTROST, M. Ductal—a high-performance material for resistance to blasts and impacts. **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 7, n. 1, p. 37-45, 2006.
- CHEYREZY; RICHARD, P. Reactive powder concretes with high ductility and 200 - 800 mpa compressive strength. **Special Publication ACI**, v. 144, 1994.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Mechanical and thermal evaluation of ultra high performance fiber reinforced concretes for engineering applications. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 289-294, 2012.
- DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994.
- FEHLING, E. *et al.* **Ultra-high performance concrete UHPC**. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- GIDRÃO, G. de M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. São Paulo, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- GRAYBEAL, B. A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 2, 2007.
- HAACH, V. G. *et al.* Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT & International**, v. 59, p. 18-24, 2013.
- HABEL, K. *et al.* Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1362-1370, 2006.
- HABEL, K.; GAUVREAU, P. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 938-946, 2008.
- HANNA, K.; MORCOUS, G.; TADROS, M. Effect of supplementary cementitious materials on the performance of concrete pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 4, p. 789-793, 2014.
- HUNG, C.-C.; LEE, H.-S.; CHAN, S. N. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes. **Composites Part B: Engineering**, v. 158, p. 269-278, 2019.
- JANKOVIĆ, K. *et al.* The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 147-156, 2016.
- KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, M. K. Mechanical damage evolution in UHPFRC: experimental and numerical investigation. **Engineering Structures**, v. 170, 2018.
- KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. de M. S.; CARRAZEDO, R. Compressive behavior of UHPFRC under quasi-static and seismic strain rates considering the effect of fiber content. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 633-644, 2018.
- KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. de M. S.; CARRAZEDO, R. Cyclic behavior of UHPFRC under compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, Sep. 2018, p. 103363, 2019.

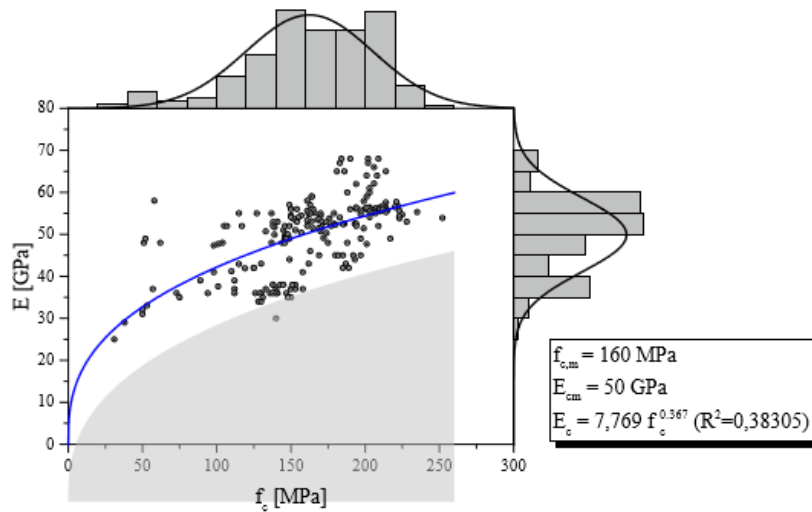
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. New York: McGraw-Hil, 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2016.
- REBENTROST, M.; WIGHT, G. Experience and applications of ultra high performance concrete in Asia. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE,2., 2008. **Proceedings [...]** 2008.
- RICHARD, P. *et al.* Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.
- RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.
- RUSSEL, G. H.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community**. Federal Highway Administration of United States Office of Infrastructure Research and Development, 2013.
- SALEEM, M. A. **Alternatives to steel grid bridge decks**. Florida, 2011. Tesis, Florida International University, 2011.
- SHI, C. *et al.* A review on ultra high performance concrete: part I: raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741-751, 2015.
- SPASOJEVIĆ, A. Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design. **Epfl**, v. 4051, p. 203, 2008.
- SU, Y. *et al.* Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 708-718, 2016.
- TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Performance assessment of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites in view of sustainability. **Materials and Design**, v. 36, p. 880-888, 2012.
- TUAN, N. van *et al.* Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1104-1111, 2011.
- WANG, D. *et al.* A review on ultra high performance concrete: part II: hydration, microstructure and properties. **Construction & Building Materials**, v. 96, p. 368-377, 2015.
- WILLE, K. *et al.* Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. **Materials and Structures**, v. 45, n. 3, p. 309-324, 2011.
- WU, Z. *et al.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction & Building Materials**, v. 103, p. 8-14, 2016.
- YAZICI, H. *et al.* Mechanical properties of reactive powder concrete for different curing regimes. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 8, n. 6, p. 2698-2702, 2015.
- ZDEB, T. Ultra-high performance concrete: properties and technology. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, v. 61, n. 1, p. 183-193, 2013.

Errata

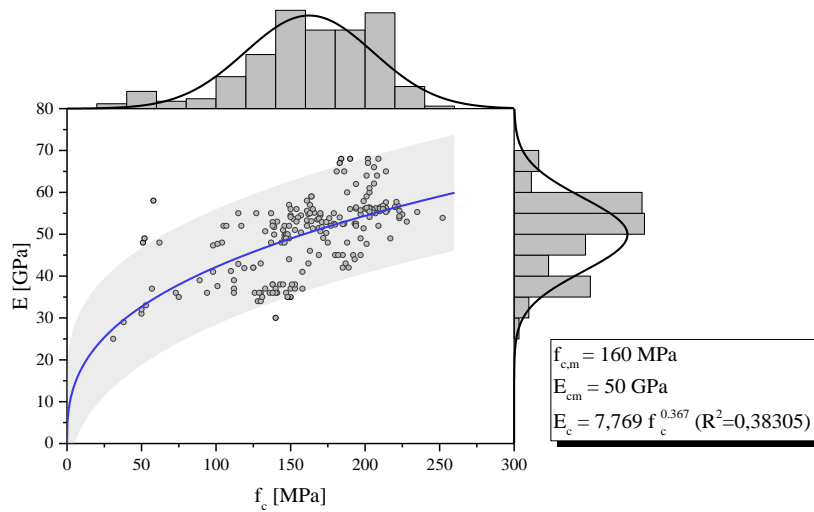
No artigo "Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC)", com número de DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200388>>, publicado no periódico Ambiente Construído, 20(2):73-88.

Na página 76:

Onde se via a Figura 1:

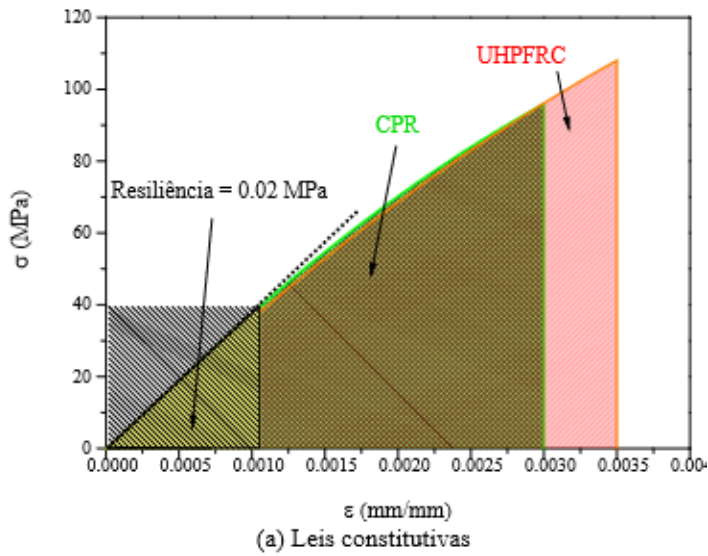


Vê-se a Figura 1:

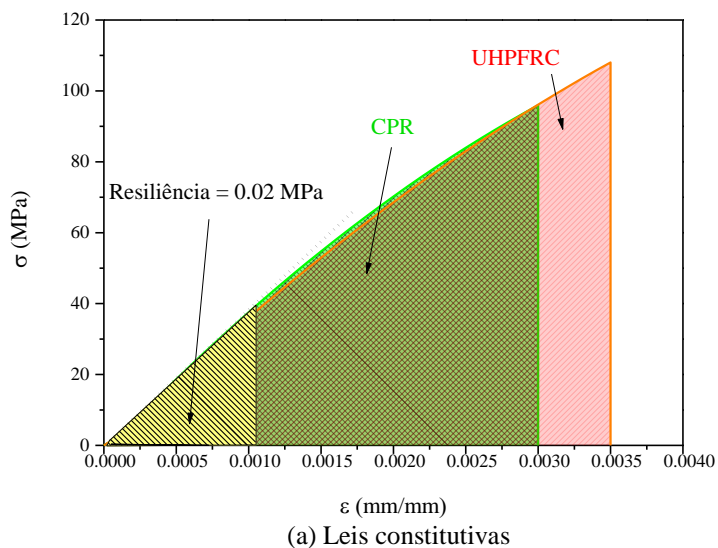


Na página 82:

Onde se via a Figura 7a:



Vê-se a Figura 7a:



Douglas Dutra Rompa

Curso de Engenharia Civil | Centro Universitário Central Paulista | Rua Miguel Petroni, 5111, Lot. Hab. São Carlos 1 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13563-470 | Tel.: (16) 3362-2111 | Email: douglasmameluco@gmail.com

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-carlense, 400 | São Carlos - SP - Brasil | E-mail: gustavo.gidrao@gmail.com

AmbienteConstruído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.