

Análise de reforço estrutural com Concreto de ultra alto desempenho

Analysis of structural reinforcement with ultra high performance concrete

DOI:10.34117/bjdv7n7-547

Recebimento dos originais: 07/06/2021

Aceitação para publicação: 26/07/2021

Wellington Mazer

Doutor em Ciência pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA
Professo titular do Programa de pós-graduação em engenharia civil da UTFPR - PPGEC
Instituição: Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR
Endereço: R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil
E-mail: wmazer@utfpr.edu.br

Elizamary Otto Ferreira

Engenheira civil pela UTFPR
Mestranda na Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR
Instituição: Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR
Endereço: R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil
E-mail: elizamaryotto@gmail.com

Renata Gnatta Borges

Acadêmica de engenharia civil na UTFPR
Instituição: Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR
Endereço: R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil
E-mail: reborges@gmail.com

Patrícia Vieira Pontes

Acadêmica de engenharia civil na UTFPR
Instituição: Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR
Endereço: R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil
E-mail: patriciapontes07@gmail.com

RESUMO

A evolução da tecnologia dos concretos conduziu ao desenvolvimento do Concreto de ultra alto desempenho (UHPC), material que apresenta alta durabilidade e resistência à compressão acima de 150MPa. A aplicação deste material no Brasil ainda é bastante restrita por isto este trabalho visa apresentar uma alternativa de aplicação do UHPC. Para isso o material foi confeccionado através de uma análise de empacotamento de partículas utilizando duas areias comerciais, sem peneiramento, além de pó de quartzo, micro-sílica e cimento Portland e o UHPC foi caracterizado quanto à resistência à compressão, tração por compressão diametral e flexão e foi aplicado como reforço estrutural nas regiões de compressão e de tração de modelos reduzidos de vigas de concreto armado, com armadura mínima, que foram ensaiadas à flexão em 4 pontos. Os resultados indicam um aumento de 40% na capacidade de carga mesmo sem a utilização de armadura suplementar na região reforçada.

Palavras-chave: Concreto de ultra Alto Desempenho. Empacotamento de Partículas. Reforço Estrutural.

ABSTRACT

The evolution of concrete technology has led to the development of Reactive Powder Concrete (RPC), a material that has high durability and compression strength above 150MPa. The application of this material in Brazil is still quite restricted, so this work aims to present an alternative application of RPC. For this, the material was made through a particle packing analysis using two commercial sands, without sieving, in addition to quartz powder, silica fume and Portland cement and the RPC was characterized in terms of compressive strength, tension by diametrical compression and bending and was applied as a structural reinforcement in the compression and tension regions of reduced models of reinforced concrete beams, with minimal reinforcement, which were tested for bending at 4 points. The results indicate a 40% increase in the load capacity even without the use of supplementary reinforcement in the reinforced region.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Particle Packing, Structural Reinforcement.

1 INTRODUÇÃO

A evolução da construção civil e a preocupação com a durabilidade dessas construções fez com que a engenharia desenvolvesse a tecnologia do concreto com a produção do concreto auto adensável (CAA), o concreto de alto desempenho (CAD) e o concreto de ultra alto desempenho (UHPC). O UHPC não utiliza agregado graúdo em sua composição, eliminando a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, considerada a região frágil do concreto convencional. As principais características do UHPC são a elevada resistência, e baixa porosidade, com consequente grande durabilidade (BIZ, 2001; VANDERLEY, 2004).

Para a produção do UHPC são utilizados cimento Portland, agregado miúdo com diâmetro inferior a 2mm, adições minerais, aditivos químicos, micro-fibras, pó de quartzo e água (SIEG et al, 2012). Outro aspecto importante a ser considerado na produção do UHPC é o empacotamento de partículas, que vai auxiliar no aumento da resistência e da durabilidade dos concretos (AMBROSIO et al, 2018). Apesar da resistência à compressão do concreto ser o principal parâmetro para a especificação de um concreto, o estudo da durabilidade está se tornando cada vez mais comum (GLSSER et al, 2008; RAHMAN e BASSUONI, 2014; LEEMANN et al, 2015; LIU et al, 2017; MAZER, et al, 2019).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar o desenvolvimento de pesquisas utilizando o concreto de ultra alto desempenho no intuito de verificar a viabilidade de sua aplicação como reforço estrutural, e para este caso foram moldadas vigas em escala

reduzida para analisar o comportamento do UHPC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta Para embasar o presente trabalho será apresentado alguns aspectos importantes para o desenvolvimento do UHPC.

2.1 CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram um concreto de ultra resistência e que possui ductilidade, denominando-o de concreto de pós reativos. Cheyrezy et al (1995) apresentam o UHPC como sendo um concreto com alta quantidade de sílica ativa e muito baixa relação água/cimento, sendo necessários o estudo granulométrico e o tratamento térmico para a obtenção das propriedades mecânicas e durabilidade desejadas.

O estudo da influência de uma pré-compressão no concreto ainda fresco, do método de cura e do teor de fibras foi feito por Ipek et al (2011). Ainda quanto aos métodos de cura, Damas e Soares (2011) observaram que a cura realizada a 20 °C e a 30 °C não apresentaram diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão, porém curas realizadas a 60 °C e a 90 °C já conduzem a um aumento de resistência e ainda observaram que o tempo de cura ideal seria de 7 dias a 90 °C seguidos de cura a 20 °C até a idade de ruptura. Já Sieg et al (2012) estudaram três diferentes tipos de adições minerais onde observaram que a sílica ativa apresenta melhor desempenho que as demais adições minerais. Serafim e Licetti (2012) estudaram UHPC confeccionados com os cimentos CP II, CP IV e CP V, sendo que para 24 horas e para três dias as resistências do UHPC feitos com CP V foram maiores que os demais, porém para sete dias e para 28 dias os resultados apresentados pelos corpos de prova feitos com CP IV superaram os resultados daqueles feitos com CP V.

Quanto às propriedades do UHPC muitas pesquisas ainda são desenvolvidas visando analisar a influência do tempo, pressão e temperatura da autoclave (YAZICI et al, 2013), diferentes regimes de cura (HIREMATH e YARAGAL, 2017), UHPC leve (GÖKCE et al, 2016) e tipos de fibras (JU et al, 2018).

Algumas aplicações de UHPC podem ser citadas, entre elas está o uso em barreiras laterais em estradas (YAN, 2009) onde o autor apresenta que a utilização do UHPC conduziu a uma redução no consumo de concreto e no peso da barreira, apesar do custo ser em torno de 30% maior, porém esse aumento de custo é compensado com o aumento da durabilidade uma vez que o UHPC apresentou um coeficiente de difusão de cloretos

55 vezes menor, um coeficiente de abrasão 4 vezes menor e no período de ensaios não apresentou carbonatação, quando comparados com o concreto convencional. Outra aplicação do UHPC foi feita como barreira contra explosões (BIBORA et al, 2017) onde foi observada a influência da resistência à flexão e do tamanho dos grãos do UHPC.

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Para a melhoria das propriedades do UHPC é necessário efetuar o empacotamento de partículas, em que se determina a densidade de empacotamento que, segundo De Larrad (2011), pode ser definida como o volume de sólidos em relação ao volume total, ou seja, consiste no arranjo granular com diferentes tamanhos de grãos que produz a menor quantidade de vazios no esqueleto granular.

Diversos modelos matemáticos podem ser utilizados para otimizar a distribuição de partículas, entre os quais são citados os modelos de Andreassen, Andreassen modificado também denominado Alfred, Toufar e De Larrad (BARANHUK, 2014). Além destes modelos tradicionais existem outros propostos por diversos pesquisadores, como por exemplo o modelo de empacotamento recursivo de misturas de partículas densas (ELLIOTT, 2002), o desenvolvimento de um concreto ecológico pelo empacotamento de partículas (FENNIS, 2011) e a modelagem para a mínima taxa de vazios para misturas de areia e silte (CHANG et al, 2015).

Diversas pesquisas têm sido feitas sobre os tipos de empacotamentos e seus efeitos sobre as propriedades do concreto. Cieslak e Grzybowski (2012) analisaram a influência dos métodos de empacotamento de Andreassen e Andreassen modificado na resistência à compressão de UHPC, assim como diferentes valores para o coeficiente de empacotamento, tendo observado que os métodos não apresentam diferenças estatísticas, porém os valores do coeficiente de empacotamento interferem nos resultados.

A aplicação do empacotamento de partículas para diferentes tipos de concretos foi estudada por Silveira et al (2019a), Silveira et al (2019b) e Silveira et al (2019c) onde os autores utilizaram o método para dosar um concreto de alto desempenho, um concreto auto adensável e um concreto seco, comparando todos eles a mesmos concretos dosados pelo método da curva granulométrica dentro da zona ótima definida pela NBR 7211 (ABNT, 2011), sendo que em todos os casos, os concretos dosados pelo método do empacotamento compressível apresentou melhores resultados de resistência à compressão e menor consumo de cimento. Além do aumento da resistência à compressão, Klein et al (2020) observaram que o empacotamento de partículas também auxilia no

aumento do módulo de elasticidade estático. Lenz et al (2017) observaram que o empacotamento dos agregados aumenta a relação agregados secos/cimento (m) conduzindo a uma menor porosidade do material fato este que contribui para o aumento da durabilidade, além de densificar e aumentar a rigidez do conjunt.

2.3 DURABILIDADE

Um dos principais fatores que influenciam a durabilidade de um concreto frente a ação de agentes agressivos é a sua porosidade e permeabilidade, propriedades estas que podem ser relacionadas com a resistência à compressão e dependem da relação água/cimento, entre outros fatores. Neste contexto o UHPC apresenta todas as características para ser um material com grande durabilidade, pois apresenta uma baixa relação água/cimento, são utilizadas adições minerais que contribuem para o aumento da durabilidade frente a agentes agressivos e o empacotamento de partículas diminuem o índice de vazios, conseqüentemente o material apresenta uma baixa porosidade. Esse aumento da durabilidade do UHPC frente a ciclos de gelo-degelo com cloreto de sódio foi estudado por Wang et al (2017) comprovando esses aspectos.

Tang et al (2015) apresentam uma excelente revisão sobre estudos recentes da durabilidade do concreto, envolvendo reação álcali-agregado, ataque de sulfatos e cloretos, entre outros. O uso de adições minerais e baixa relação água cimento é recomendado por diversos pesquisadores (SKALNI et al, 2002; MAES et al, 2013). As adições minerais reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) para formar silicato de cálcio hidratado que é um composto com maior resistência química e mecânica, porém existe uma quantidade máxima que pode ser adicionada, limitada à quantidade de Ca(OH)_2 (ABRAHÃO et al, 2019).

A influência do empacotamento de partículas frente a ação de cloretos e sulfatos foi estudada por Ambrosio et al (2019) onde observaram que o baixo índice de vazios e baixa absorção influenciaram na quantidade de sulfatos e de cloretos que penetraram no concreto, reduzindo esta quantidade em mais de 5 vezes, além do aumento da resistência à compressão.

2.4 REPARO E REFORÇO DE ESTRUTURAS

Quando a durabilidade das estruturas de concreto se apresenta prejudicada se faz necessário realizar uma intervenção através de reforço estrutural ou de recuperação estrutural, dependendo do caso. Em se tratando de reforço estrutural, uma das técnicas que

apresenta uma grande evolução de pesquisas e tem grande potencial de utilização é o reforço estrutural com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), nesse sentido existem pesquisas com a utilização da técnica em pilares curtos (MAZER et al, 2014), pilares esbeltos (MENDES et al, 2017) e dimensionamento do reforço (SILVA et al, 2019), em vigas submetidas à flexão (PIVATTO et al, 2020) e estudos sobre a ancoragem do reforço (SCHNEIDER et al, 2017).

Com as técnicas de reparo estrutural, cita-se a importância do ângulo da junta do reparo (SLOSASKI e MAZER, 2020) que observaram que quando um elemento está submetido à compressão, um ângulo de 0° com a horizontal apresenta desempenho superior ao ângulo de 45° , já na flexão o ângulo de 45° apresentou desempenho adequado, e em todos os casos foi observada a influência positiva da utilização de ponte de aderência.

Pesquisas utilizando materiais diversos para reparo foram conduzidas por Mazer e Martins (2014) que obtiveram uma argamassa de alta resistência inicial e final, com valores de 3,5MPa após uma hora da mistura, 75,8MPa em 24 horas e 133,8MPa a 28 dias. Simenes et al (2021) testaram argamassas com fibras ancoradas, fibras onduladas, concreto convencional, graute polimérico e graute cimentício, sendo este último apresentando melhores resultados em comparação com os demais indicando a importância da reologia auto-adensável do material. Ruivo (2021) utilizou baixos teores de óxido de grafeno em argamassas para reparo tendo observado melhores desempenhos à compressão e flexão em relação ao material de referência.

Com o intuito de aplicar um material com maior durabilidade de vida à baixa permeabilidade com as características de ser auto adensável e de possuir alta resistência mecânica, este trabalho contribui para o estudo da aplicação do UHPC no reforço à flexão de vigas, utilizando modelos reduzidos para a análise.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DURABILIDADE

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o CP V – ARI, cujas propriedades químicas e físicas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Propriedades Químicas do Cimento utilizado (Fonte: Fabricante)

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
%				
4,26	18,93	2,72	60,73	4,11
SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
%				
2,99	3,30	0,68	0,77	0,71

Tabela 2: Propriedades Físicas do Cimento utilizado (Fonte: Fabricante)

PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO					
Exp. Quente		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325
mm		%	cm ² /g	%	%
0,23		30,0	4.342	0,04	0,43
Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
03:30	04:11	22,6	38,7	44,5	53,0

3.1.2 Agregados

Para a confecção do UHPC foi utilizado como agregado miúdo utilizado uma areia natural proveniente de cavas do Rio Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba. Já para concreto convencional, além da areia natural, também foi utilizado agregado graúdo classificado como brita n° 01, de origem granítica.

Para o UHPC foi feito o empacotamento das partículas de agregados miúdos segundo o método de Andreassen modificado, conforme indicado na Equação 1 e a curva granulométrica apresentada na Figura 1.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (1)$$

Onde: CPFT = porcentagem acumulada de partículas menores que D_p;

D_p = diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s = diâmetro da menor partícula em mm;

D_L = diâmetro da maior partícula em mm;

q = coeficiente de empacotamento.

Figura 1: Análise granulométrica do UHPC

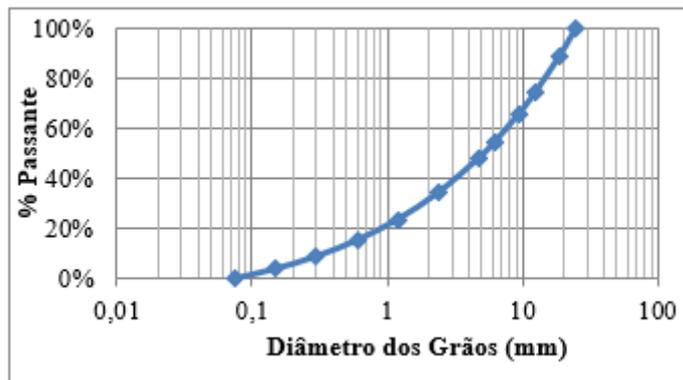
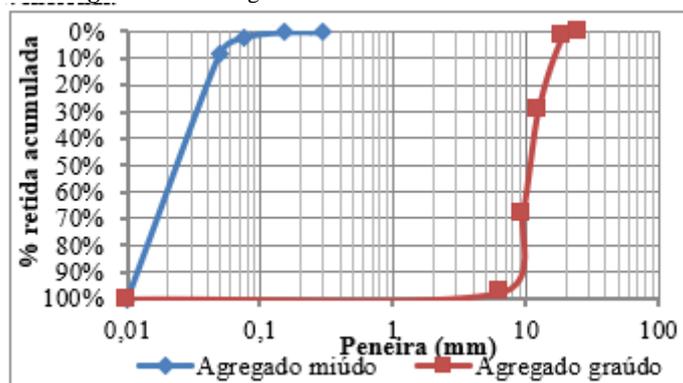


Figura 2 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo utilizados para a produção do concreto convencional.

Figura 2: Análise granulométrica do concreto convencional.



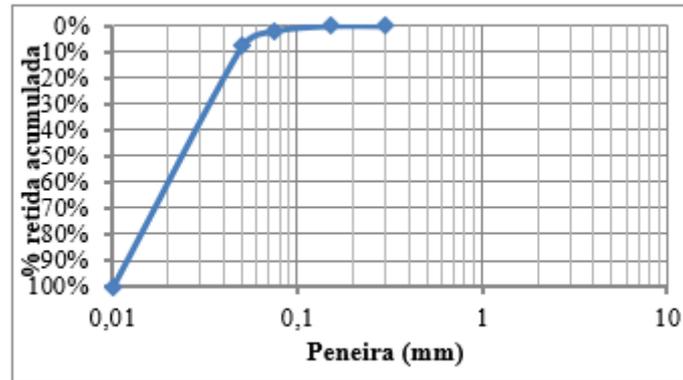
3.1.3 Adições

Para o UHPC foi utilizada sílica ativa com teor de SiO₂ superior a 85% e massa específica de 2,2 g/cm³. O pó de quartzo possui as propriedades apresentadas na Tabela 3 e na Figura 3, enquanto o aditivo utilizado foi um superplastificante tipo II à base de éter-policarboxilatos com densidade 1,06.

Tabela 3: Caracterização química do pó de quartzo (Fonte: Fornecedor)

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO PÓ DE QUARTZO	
Umidade (%)	0,020
Perda ao fogo (%)	0,130
Teor de SiO ₂ (%)	> 99,000
Teor de Fe ₂ O ₃ (%)	< 0,050
Teor de Al ₂ O ₃ (%)	< 0,300
Teor de TiO ₂ (%)	< 0,035

Figura 3: Análise granulométrica do pó de quartzo.



3.1.4 Traços dos concretos

O concreto convencional (CCV) foi dosado conforme o método ABCP/ACI para 30 MPa e para o concreto de ultra alto desempenho foi utilizado o traço indicado abaixo. Na Tabela 4 é apresentado o proporcionamento (traço) utilizado.

Tabela 4: Traços utilizados.

	Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica	Quartzo	Aditivo
CCV	1	1,75	2,76	0,54	-	-	-
UHPC	1	1,40	-	0,22	10%	15%	3%

Foram moldados três diferentes tipos de UHPC, diferenciando-os no tipo de fibra a ser utilizado, sendo elas as fibras de polipropileno, metálicas e de vidro, todas em um teor de 0,12% em relação ao volume de cimento.

Após a separação dos materiais, foi feita a mistura dos materiais secos, na ordem de areias, cimento, pó de quartzo, sílica ativa e então a fibra correspondente à etapa. Em seguida, como modo de preparo do concreto, inicialmente adicionava-se uma pequena quantidade de água e aditivo na bacia da argamassadeira, prosseguindo com a adição de uma parcela da mistura dos materiais secos. Acompanhando a mistura, ao observar o aumento de consistência da massa, era adicionado mais água e aditivo, e assim era intercalado até se utilizar todo o material. Este processo de mistura na argamassadeira durava cerca de 12 minutos.

Imediatamente após o preparo da massa, os corpos de prova foram moldados nas quantidades indicadas na tabela 5. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e colocados em cura térmica a 90 °C por 72 horas em um banho maria e em seguida mantidos em cura submersa até completar 28 dias.

Tabela 5: Número de corpos de prova para cada ensaio.

Ensaio	Número de corpos de prova
Resistência à compressão por tração diametral	3 x 6 = 18
Resistência à tração na flexão	3 x 4 = 12
Resistência à compressão axial*	4 x 6 = 24
Absorção por imersão e índice de vazios	2 x 3 = 6
Total	60

*Para este ensaio foram moldados corpos de prova de concreto convencional para efeito de comparação com o UHPC.

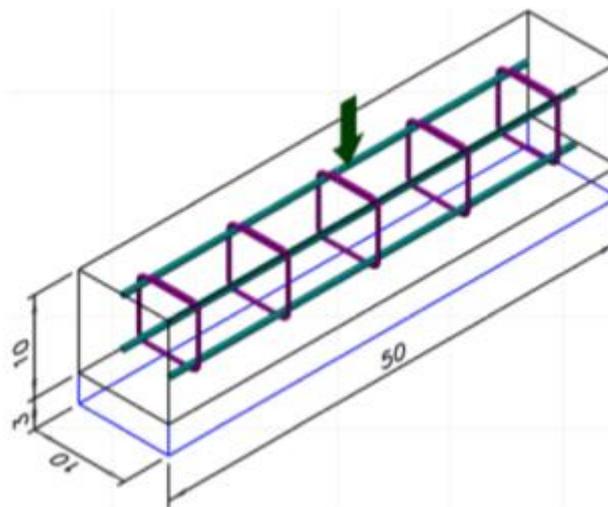
O número de corpos de prova foi definido com base em estudo estatístico para ter 95% de confiança, conforme a Equação 2.

$$N = z^2 \times \frac{\sigma}{\varepsilon^2} \quad (2)$$

Onde z representa a variável reduzida da curva normal que para 95% de confiança assume o valor de 1,96; σ corresponde ao desvio padrão da amostra que foi assumido o valor de 10%; e ε representa o possível erro do ensaio assumido como 10%. Com base nesses valores, o número mínimo de corpos de prova para o nível de confiança pretendido é de quatro corpos de prova, porém foram moldados seis corpos de prova para segurança nos resultados e poder eliminar eventuais valores espúrios.

Para fazer a aplicação do UHPC em reforço estrutural foram moldadas pequenas vigas de 10x10x50 cm com armadura de 6,3mm e estribos de 4,2mm a cada 10 cm, em concreto convencional e um reforço de 3 cm de espessura em UHPC, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Modelo de viga utilizada.



As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a três pontos, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), sendo que o reforço em UHPC foi efetuado 60 dias após a moldagem da viga em concreto convencional de 25MPa.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS

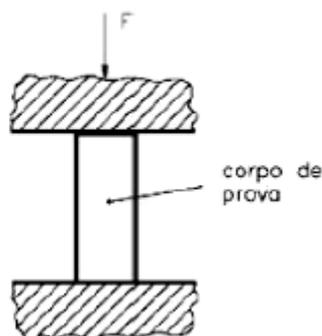
3.2.1 Absorção por imersão e índices de vazios

A determinação do teor de absorção de água por imersão e do índice de vazios é realizado conforma a NBR 9778 (ABNT, 2005).

3.2.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial refere-se ao valor limite da capacidade de suportar cargas verticais aplicadas ao longo do seu plano axial longitudinal. O ensaio a seguir foi feito obedecendo à norma NBR 13.279 (ABNT, 1995), como ilustrado na Figura 5.

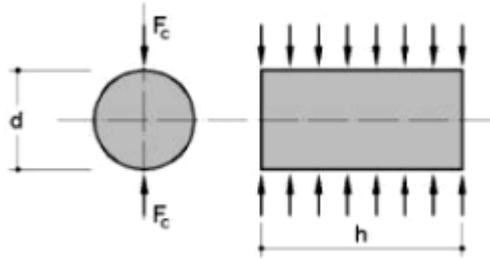
Figura 5: Ilustração do esquema de forças aplicado no ensaio de compressão.



3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

A compressão ocorre quando uma força axial é aplicada em sentido ao interior de uma peça com carregamento definido em plano axial de geratrizes diametralmente opostas, conforme orientado na norma NBR 7222 (ABNT, 1994). Sob essas condições de compressão, ocorre no plano da aplicação de força um esforço de tração indireto, sendo esse o fator de ruptura do corpo, como ilustrado na Figura 6.

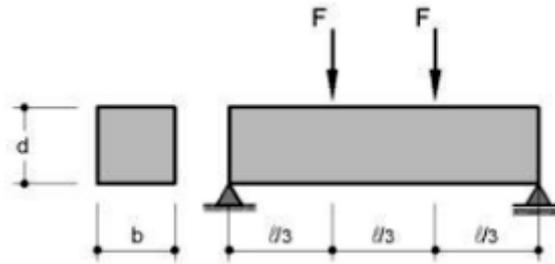
Figura 6: Ilustração do esquema de forças aplicado no ensaio de tração por compressão diametral.



3.2.4 Resistência à tração na flexão

Este ensaio se refere à condição de tração na flexão do material pela aplicação de uma força perpendicular às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades. Para medir a resistência à tração, foi flexionado um corpo de prova prismático com apoios equidistantes à aplicação da força. O ensaio a seguir foi feito obedecendo à norma NBR 12142 (ABNT, 2010) sendo ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Ilustração do esquema de forças aplicado no ensaio de tração na flexão.



3.2.5 Resistência à flexão em três pontos

Este ensaio tenta simular o comportamento de uma viga submetida a um carregamento vertical concentrado. Para a execução deste ensaio foi utilizada uma prensa EMIC DL 30, com capacidade de 30 toneladas. Na Figura 8 está exemplificado o ensaio realizado.

Figura 8: Esquema de realização do ensaio de flexão a três pontos.



O reforço em UHPC foi realizado na região de compressão do concreto em três vigas e em outras três vigas esse reforço foi realizado na região de tração e em ambos os casos não foi colocada armadura adicional.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICES DE VAZIOS

Na Tabela 6 são apresentados os resultados de absorção e índice de vazios dos concretos estudados.

Tabela 6: Resultado de ensaios físicos

	CCV	UHPC
Absorção (%)	2,96	0,84
Índice de vazios (%)	6,84	1,80

Os resultados acima representam a média de três corpos de prova. Na Tabela 6 é possível observar que a absorção do UHPC foi 3,5 vezes menor que o valor observado no CCV e o índice de vazios foi 3,8 vezes menor. Tais resultados levam a acreditar que a durabilidade do UHPC é maior que do CCV, ressaltando a contribuição do alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento e do empacotamento dos agregados realizados no UHPC.

4.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

4.2.1 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, médias de 6 corpos de prova, são apresentados na Tabela 7, sendo o concreto convencional e os três tipos de UHPC, com fibras de polipropileno, fibras metálicas e fibras de vidro.

Tabela 7: Resultado de resistência à compressão axial

	CCV	UHPC com polipropileno	UHPC com metálica	UHPC com vidro
Média (MPa)	39,1	173,9	123,7	82,7
Desvio Padrão (MPa)	2,5	8,4	16,3	11,7
Coef. De variação (%)	6,4	4,8	13,2	14,1
Máximo (MPa)	41,0	186,6	140,7	102,6

Os coeficientes de variação do concreto convencional e do UHPC com fibras de polipropileno abaixo de 10% indicam uma produção e moldagem bem padronizadas destes concretos, porém os UHPC com fibras metálicas e de vidro apresentam estes valores altos mostrando a necessidade de melhorias no sistema de produção, ainda o

UHPC com fibras de vidro apresentou uma resistência à compressão muito mais baixa que o esperado.

Fazendo uma análise de variância (ANOVA) foi observado que os resultados são estatisticamente diferentes entre si, comprovado pela comparação de médias feita pelo método de Tukey's, em um nível de significância de 5%. Isso posto, é possível afirmar que o UHPC confeccionado com fibra de polipropileno obteve uma resistência à compressão axial 40% maior que o confeccionado com fibras metálicas e 110% maior que o confeccionado com fibras de vidro para esse estudo.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio para os tipos de UHPC, médias de seis corpos de prova, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

	UHPC com polipropileno	UHPC com metálica	UHPC com vidro
Média (MPa)	5,8	6,9	5,2
Desvio Padrão (MPa)	0,96	0,8	0,7
Coef. De variação (%)	16,7	11,6	13,3

A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão axial foi de 3,3%; 6,5% e 6,3% para os UHPC com fibras de polipropileno, metálicas e de vidro, respectivamente.

Na análise de variância (ANOVA) foi verificado que existe diferença estatística nos resultados e a comparação de médias pelo método de Tukey's indicou que os resultados do UHPC com fibras metálicas diferem dos resultados do UHPC com fibras de vidro, com nível de significância de 5%, sendo as demais comparações consideradas estatisticamente iguais.

4.2.3 Resistência à tração na flexão

Considerando que apenas o UHPC seria utilizado com a finalidade de reforço estrutural, este ensaio foi realizado somente nestes concretos, excluindo-se o concreto convencional. Os resultados deste ensaio, médias de quatro corpos de prova, são apresentados na Tabela 7

Tabela 7: Resultados de resistência à flexão.

	UHPC com polipropileno	UHPC com metálica	UHPC com vidro
Média (MPa)	21,9	21,0	20,6
Desvio Padrão (MPa)	1,6	0,7	2,7
Coef. De variação (%)	7,3	3,3	13,1

Neste ensaio somente o UHPC com fibras de vidro apresentou um coeficiente de variação acima de 10%, indicando necessidade de melhorias no sistema de produção. Outro aspecto a ser considerado é a relação entre a resistência à flexão e a resistência à compressão axial, sendo de 12,6% para o UHPC com fibras de polipropileno e de 17,0% para o UHPC com fibras metálicas, enquanto que o UHPC com fibras de vidro possui uma proporção de 24,9%, apesar de ser a mais alta relação este fato necessita de uma interpretação cuidadosa por ter a mais baixa resistência à compressão axial.

Ao efetuar a análise de variância (ANOVA) foi verificado que os resultados são estatisticamente iguais, fato este comprovado pela comparação de médias feita pelo método de Tukey's, em um nível de significância de 5%, ou seja, o tipo de fibra não apresenta influência na resistência à tração na flexão.

4.3 FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

Este ensaio foi realizado em vigas sem reforço e nas vigas com reforço na região de compressão e na região de tração, onde foi determinado o momento fletor que causou o aparecimento de fissuras, cujos resultados, média de três corpos de prova, são apresentados na Tabela 9 e na Figura 9 são ilustradas vigas sendo ensaiadas.

Tabela 9: Resultados de resistência à flexão por 3 pontos.

	Viga em concreto convencional	Vigas com reforço na região de compressão	Vigas com reforço na região de tração.
Média (kN.cm)	340,5	473,6	494,1
Desvio padrão (kN.cm)	29,8	23,6	14,0
Coef. de variação.	17,5	10,0	2,8

Através da análise de variância (ANOVA) foi observado que existe diferença estatística entre os resultados e a comparação de médias pelo método de Tukey's indica que os reforços efetuados apresentam resistência maiores que a viga de referência, porém entre eles não existe diferença estatística.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar algumas propriedades do concreto de ultra alto desempenho (UHPC) e verificar sua viabilidade de aplicação em reforço estrutural. Para isso foram executados três diferentes tipos de UHPC, utilizando fibras de polipropileno, metálicas e de vidro e moldadas vigas em escala reduzida para realizar a ruptura das mesmas na flexão.

Considerando os ensaios de absorção e índice de vazios conclui-se que o UHPC apresenta uma durabilidade superior ao concreto convencional devido aos menores valores dessas propriedades que ocorrem devido a uma baixa relação água/cimento e efeitos do empacotamento de partículas.

Quanto aos valores de resistência mecânica, o UHPC com fibra de polipropileno se sobressaiu em relação aos demais na resistência à compressão axial, porém na resistência à flexão e tração por compressão diametral não foram observadas diferenças estatísticas.

Quanto à sua aplicação como reforço estrutural, o mesmo se mostrou promissor, podendo ser utilizado tanto na região comprimida quanto na região tracionada da viga, porém estes estudos são iniciais, sendo necessária a análise de mais casos, em diferentes situações.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, T. B.; MAZER, W.; MEDEIROS, A., *et al.*, “Estudo da influência de diferentes adições minerais no concreto: índice da reação do hidróxido de cálcio”. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2019, Out. 2019.

AMBROSIO, G. R.; SILVEIRA, G. C.; MAZER, W.; MEDEIROS, A. INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NA DURABILIDADE DE CONCRETOS. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2018, Abr. 2018.

AMBROSIO, G.; SILVEIRA, G. C.; MAZER, W. MEDEIROS, A.; “Influência do empacotamentos de partículas na durabilidade de concretos”. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2019, Out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5793: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: *Agregados para concreto: especificação*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2009. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Argamassa e concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - método de ensaio: método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: *Concreto - determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2010. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à compressão: método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 2 p.

BARANHUK, A. D., “Análise da influência do empacotamento dos agregados na porosidade do concreto”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UTFPR, Curitiba, 2014.

BIBORA, P.; DRDLOVÁ, M.; PRACHAR, V.; SVITÁK, O., “UHPC for Blast and Ballistic Protection, Explosion Testing and Composition Optimization”. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, v. 251, n. 012004, pp. 1-12, 2017.

BIZ, C. E., “Concreto de pós reativos”, Dissertação de Mestrado, UEC, Campinas, SP, Brasil, 2001.

CHANG, C. S.; WANG, J. Y.; GE, L., “Modeling of minimum void ratio for sand-silt mixtures”. *Engineering Geology*, v. 196, pp. 293-304, 2015.

CHEYREZI, M.; MARET, V.; FROUIN, L., “Microstructural analysis of rpc (reactive powder concrete)”. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, pp. 1491-1500, 1995.

CIESLAK, M. J.; GRZYBOWSKI, T. A. “Análise experimental comparativa entre concretos de pós reativos dosados pelos modelos de Alfred e Andreasen”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UTFPR, Curitiba, 2012.

DAMAS, G. P.; SOARES, T. C. C., “Análise da Influencia da Temperatura de cura na Resistência a Compressão axial nos Concretos de Pós Reativos”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UTFPR. Curitiba, 2011.

ELLIOTT, J. A.; KELLY, A.; WINDLE, A. H., “Recursive packing of dense particle mixtures”. *Journal of Materials Science Letters*, v. 21, pp. 1249 – 1251, 2002.

FENNIS, S. A. A. M. DESIGN OF ECOLOGICAL CONCRETE BY PARTICLE PACKING OPTIMIZATION, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5a1e445b-36a7-4f27-a89a-d48372d2a45c>, 2011

GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E., “Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions”. *Cement and Concrete Research*, v. 38, pp. 226–246, 2008

GÖKCE, H. S.; SURMELIOGLU, S.; ÇAKIR, O. A., “A new approach for production of reactive powder concrete: lightweight reactive powder concrete (LRPC)”. *Materials and Structures*, pp. 50-58, 2-17. 2016.

HIREMATH, P.; YARAGAL, S. C., “Investigation on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Different Curing Regimes”. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, pp. 9758–9762, 2017.

IPEK, M.; YILMAZ, K.; SUMER, M.; SARIBIYIK, M. “Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase”. *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 61–68, 2011.

JU, Y.; WANG, L. LIU, H.; MA, G., “Experimental Investigation into Mechanical Properties of Polypropylene Reactive Powder Concrete”. *ACI Materials Journal*, Jan. 2018.

KLEIN, N. S.; LEINZ, L. A.; MAZER, W., “Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes”. *Construction and Building Materials*, v. 242, pp. 118086, 2020.

LARRARD, F. D.; Concrete Mixture Proportioning. A scientific approach. In: *Taylor & Francis e-Library*, 2011.

LEEMANN, A.; NYGAARD, P.; KAUFMANN, J.; LOSER, R., “Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete”. *Cement & Concrete Composites*, v.62, pp. 33-43, 2015.

LENZ, L. A.; LONDERO, C.; KLEIN, N.; MAZER, W.; PEREIRA, D. A., “Avaliação da influência do empacotamento dos agregados na durabilidade de concretos através de ensaios não destrutivos: resistividade elétrica e propagação de ondas de ultrassom”. *Revista Técnico-científica do CREA-PR*. Pp. 1- 18, 2-17.

LIU, Z.; ZHANG, F.; DENG, D.; XIE, Y.; LONG, G.; TANG, X., “Physical sulfate attack on concrete lining—A field case analysis”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 6, pp. 206–212, 2017.

MENDES, A. P.; CLIVATTI, N.; ARAÚJO, S. K.; MAZER, W., “Análise da eficiência de compósitos de fibra de carbon utilizado como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado”. *Revista Sodebras*, v. 12, n. 139, pp. 127 – 131, 2017.

MAES, M.; GRUYAERT, E.; BELIE, N., “Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion”. *Materials and Structures*, v. 46, pp. 89–103. 2013.

MAZER, W.; ARAÚJO, J. M.; MEDEIROS, A.; WEBER, A. M., “Evaluation of sulfate ions in degrading armed concrete structures of a sewage treatment station: case study”. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 4, pp. 17, 2019.

MAZER, W.; MARTINS, L. A., “Self-compacting mortar of high performance for grouting”. *Revista Engenharia e Construção Civil*, v. 1, n. 1, pp. 61 – 74, 2014.

MAZER, W.; PENNER, E.; STELLA, A. C., “Estudo de pilares curtos confinados com compósitos de fibra de carbon”. *RETEC*, v. 7, n. 2, pp. 30 – 39, 2014.

PIVATTO, A. B.; PUPPI, R. F. K.; KIMURA, E.; MAZER, W., “Análise experimental de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas à flexão por CRFC”. *Revista de engenharia civil IMED*, v. 7, n. 2, pp. 1 – 19, 2020.

RAHMAN, M. M.; BASSUONI, M. T., “Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation”. *Construction and Building Materials*, v. 73, pp. 652–662, 2014.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M., “Composition of reactive powder concretes”. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, pp. 1501-1511. 1995.

RUIVO, C. C. G. P., “Desenvolvimento de argamassa para reparo de estruturas na construção civil utilizando óxido de grafeno como aditivo”. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n.1, pp. 8082-8100, 2021.

SCHNEIDER, F. H.; SCHULTZ, J. L.; WIERZBICKI, L. R.; MAZER, W. “Análise do desempenho da ancoragem do reforço da fibra de carbon em vigas submetidas à flexão”. *Revista Técnico-científica do CREA-PR*, edição especial, pp. 1 – 17, 2017.

SERAFIM, D.; LICETTI, J. C., “Análise do desempenho de três tipos de cimento no concreto de pós-reativos”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UTFPR, Curitiba, 2012.

SIEG, A. P. A.; NAKANISHI, E. Y.; MOHAMAD, G.; MAZER, W. “Concreto de Pós Reativos – Estudo das Adições Mineraias: Cinza de Casca de Arroz, Metacaulim e Sílica Ativa”. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2012, Out. 2012.

SILVA, M. T. Q. S.; TOKARSKI, R. B.; BRUNHARA, C. A.; CORRÊA, C. J.; MAZER, W., “Parâmetros de cálculo de pilares medianamente esbeltos com diferentes fck’s e camadas de fibras de carbono”. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, pp. 31653-31666, 2019.

SILVEIRA, G. C.; MEDEIROS, A.; MAZER, W., *et al.*, “Estudo comparativo entre a utilização do método do empacotamento compressível e a zona ótima para dosar concreto de alto desempenho e concreto convencional”. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2019, Out. 2019.

SILVEIRA, G. C.; MEDEIROS, A.; MAZER, W., *et al.* “Estudo comparativo entre a utilização do método do empacotamento compressível e a zona ótima para dosar concreto autoadensável”. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2019, Out. 2019.

SILVEIRA, G. C.; MEDEIROS, A.; MAZER, W., *et al.* “Estudo comparativo entre a utilização do método do empacotamento compressível e a zona ótima para dosar concreto seco”. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2019, Out. 2019.

SIMENES, C. S.; HUBNER, M. V.; GAMINO, A. L., “Estudo experimental de técnicas de reparo e reforço aplicadas ao concreto estrutural”. *Brazilian Journal of Development*, v.7, n. 6, pp. 57010-57044, 2021.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. Sulfate Attack on Concrete. In: *Taylor & Francis e-Library*, 2002

SLOSASKI, L. R.; MAZER, W., “Avaliação da influência da variação do ângulo da junta de concretagem na resistência mecânica de concretos”. *Revista Técnico-científica do CREA-PR*, n. 23, pp. 1 – 16, 2020.

TANG, S. W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, Z. J., “Recent durability studies on concrete structure”. *Cement and Concrete Research*, v. 78, pp. 143–154, 2015.

VANDERLEI, R. D., “Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas”. 196p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

WANG, Y.; AN, M.; YU, Z.; HAN, S.; JI, W., “Durability of reactive powder concrete under chloride-salt freeze–thaw cycling”. *Materials and Structures*, v. 50, n. 18, 2017.

YAN, G., “Application of reactive powder concrete in highway barriers”, *International Conference on Transportation Engineering 2009 (ICTE 2009)*, 2009.

YAZICI, H.; DENIZ, E.; BARADAN, B., “The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 42, pp. 53–63, 2013.