

Douglas Araujo de Moura
Markus Vinícius Matos Ferreira
Daniel Lopes Pereira

Concreto de ultra alto desempenho: introdução, conceitos e aplicações

São Paulo

2017

Douglas Araujo de Moura
Markus Vinícius Matos Ferreira
Daniel Lopes Pereira

Concreto de ultra alto desempenho: introdução, conceitos e aplicações

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para a obtenção do título
de Graduação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Anhembi Morumbi.

Universidade Anhembi Morumbi

Orientador: Msc. Rafaela de Oliveira Amaral

São Paulo
2017

Douglas Araujo de Moura

Markus Vinícius Matos Ferreira

Daniel Lopes Pereira

Concreto de ultra alto desempenho: introdução, conceitos e aplicações/ Douglas Araujo de Moura

Markus Vinícius Matos Ferreira

Daniel Lopes Pereira. – São Paulo, 2017-

68 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Msc. Rafaela de Oliveira Amaral

TCC – Universidade Anhembi Morumbi, 2017.

1. Concreto de ultra alto desempenho. 2. CUAD. I. Ferreira, Markus Vinícius Matos. II. Pereira, Daniel Lopes. I. Pinheiro, Rafaela Amaral. II. Universidade Anhembi Morumbi. III. Escola de Engenharia e Tecnologia. IV. Concreto de ultra alto desempenho: introdução, conceitos e aplicações

Douglas Araujo de Moura
Markus Vinícius Matos Ferreira
Daniel Lopes Pereira

Concreto de ultra alto desempenho: introdução, conceitos e aplicações

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para a obtenção do título
de Graduação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Anhembi Morumbi.

Trabalho aprovado em 9 de dezembro de 2017.

Msc. Rafaela de Oliveira Amaral
Orientadora

Comentários: _____

São Paulo
2017

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho. Agradecemos especialmente à nossa orientadora Rafaela Amaral pelo suporte prestado a qualquer momento por meios eletrônicos e ao professor Elivaldo Elenildo da Silva por tirar dúvidas sobre concreto pretendido e pontes.

Ao professor Claydson Moro, por emprestar seu material de estudo pessoal.

Ao professor Tiago Carmona, por nos orientar quanto ao que fazer no estudo de caso, crucial para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro americano Brian Keierleber por enviar prontamente por email informações relevantes à ponte Jakway Park, na qual trabalhou diretamente.

À Anielle Guedes, por indicar um ótimo lugar para que pudéssemos trabalhar nessa pesquisa durante as madrugadas.

Às nossas companheiras, pais, mães e filhos¹ pelo carinho, compreensão e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Deus, por nos ter dado a vida e o livre-arbítrio para estarmos aqui hoje.

¹ Só o Douglas tem filhos.

*“Em algum lugar, algo incrível
está esperando para ser descoberto”*
(Carl Sagan)

RESUMO

Apresenta-se o histórico do desenvolvimento do concreto de ultra alto desempenho (CUAD), os principais projetos construídos com CUAD no mundo, como a passarela de Sherbrooke, no Canadá, a primeira obra a utilizar CUAD como material estrutural aberto ao público. Pesquisaram-se as propriedades do CUAD como material, os materiais utilizados na sua composição e sua viabilidade técnica, face a soluções com outros materiais construtivos. Para o estudo de caso, desenvolveu-se um programa capaz de auxiliar o projetista a estudar a viabilidade técnica da aplicação do CUAD em vigas protendidas de seção retangular e seção T. Mostra-se que é possível construir vigas protendidas muito mais esbeltas e capazes de vencer grandes vãos com CUAD, sem aumentar a sua seção transversal, o que gera economia de material e estruturas mais leves, esbeltas e rápidas de se construir.

Palavras-chave: concreto de ultra alto desempenho. CUAD. UHPC. ultra high performance concrete.

ABSTRACT

This paper presents the history of development of Ultra High Performance Concrete (UHPC), the main projects built in UHPC in the world, such as the Sherbrooke walkway, the first construction that used UHPC as a structural material opened to public, located in Canada. The research shows UHPC properties, materials used in its composition and its technical viability, comparing this solution with other building materials. For the case study, it has been developed a program to help the projectist to study the technical viability of UHPC in pre-stressed beam with rectangular and T sections. It's shown that it's possible to build slender pre-stressed beams and able to cover large spans with UHPC, without increasing its transversal section, generating material economy and structures that are lighter, slender and faster to be built.

Keywords: concreto de ultra alto desempenho. CUAD. UHPC. ultra high performance concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponte de concreto armado sobre o fosso do castelo de Chazelet, França. Construída por Joseph Monier em 1875.	7
Figura 2 – Influência da taxa de fibras na resistência à tração na flexão do CPR.	20
Figura 3 – Comparação entre seções de diferentes materiais com a mesma capacidade portante.	21
Figura 4 – Fachada executada com o CUAD Edifício do Escritório de Representação do Ministério das Relações Exteriores, na Rua da Consolação, São Paulo – SP.	24
Figura 5 – Detalhe da fachada do mesmo edifício da Figura 4.	24
Figura 6 – Fachada executada com CUAD. Japan House, na Avenida Paulista, São Paulo - SP.	25
Figura 7 – Detalhe da mesma fachada da Figura 6	25
Figura 8 – Passarela de Sherbrooke, Quebec, Canadá. Construída em CPR (concreto de pós reativos) sem o uso de barras de aço.	28
Figura 9 – Curvas de tensão-deformação compressivas para diferentes concretos.	29
Figura 10 – Corte transversal da passarela de Sherbrooke.	29
Figura 11 – Elevação da passarela de Sherbrooke mostrando a protensão longitudinal.	30
Figura 12 – Segmento pré-moldado finalizado da passarela.	30
Figura 13 – Passarela sobre a ravina de Ovejas, Província de Alicante, Espanha.	31
Figura 14 – Representação gráfica da passarela de Ovejas.	32
Figura 15 – Vista longitudinal da passarela.	32
Figura 16 – Treliças abaixo do tabuleiro.	32
Figura 17 – Corte transversal da passarela com detalhamento.	33
Figura 18 – Corte transversal da passarela com detalhamento.	33
Figura 19 – Acidente em ponte de madeira em Buchanan.	35
Figura 20 – Acidente em Buchanan.	36
Figura 21 – Primeira geração da seção π	37
Figura 22 – Segunda geração da seção π	38
Figura 23 – Modelo da seção π no ANSYS.	39
Figura 24 – Moldagem da seção π	39
Figura 25 – Cura térmica a vapor.	40
Figura 26 – Vista em corte.	40
Figura 27 – Detalhamento das juntas longitudinais da seção π	41
Figura 28 – Grauteamento das juntas longitudinais.	41
Figura 29 – Detalhe da protensão.	42
Figura 30 – Detalhamento do diafragma.	42

Figura 31 – Diafragma instalado entre as vigas de uma mesma seção e entre as vigas de seções adjacentes.	43
Figura 32 – Instalação dos elementos estruturais.	43
Figura 33 – Ponte Jakway Park. Apenas o trecho do vão central é feito de CUAD.	44
Figura 34 – Detalhes da viga de seção utilizada no estudo de caso.	45
Figura 35 – Relação do aumento do vão teórico (l) a ser vencido em relação ao aumento do fck	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da composição do concreto convencional, CAD e CUAD	16
Tabela 2 – Dosagem para concretos de pós reativos.	19
Tabela 3 – Exemplos de aplicações de CUAD ao redor do mundo.	22
Tabela 4 – Dosagem do CPR usado na passarela de Sherbrooke.	28
Tabela 5 – Ações consideradas no projeto da passarela.	34
Tabela 6 – Traço do CUAD utilizado.	34
Tabela 7 – Valores de projeto das propriedades materiais do CUAD.	37
Tabela 8 – Aumento do fck relacionado ao aumento do vão que a mesma viga pode vencer	49
Tabela 9 – Aumento da área da seção transversal	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFGC	<i>Association Française de Genie Civil</i>
CADRF	Concreto de alto desempenho reforçado com fibras
CC	Concreto convencional
CCADRF	Compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras
CCFA	Compósito cimentício fibroso de aço
CCR	Compósito Compacto Reforçado
CCUADRF	Compósito cimentício de ultra alto desempenho reforçado com fibras
CGCUAD	Compósito geopolimérico de concreto de ultra alto desempenho
CMSRF	Concreto multiescalável reforçado com fibras
CPR	Concreto de pós reativos
CRC	<i>Compact Reinforced Composite</i>
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
CUADRF	Concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras
CUAR	Concreto de ultra alta resistência
CVUAD	Concreto de vidro de ultra alto desempenho
DPP	Densificado de Partículas Pequenas
DSP	<i>Densified with Small Particles</i>
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FRHPC	<i>Fiber-reinforced high-performance concrete</i>
GUHPC	<i>Geopolymer composite ultra high performance concrete</i>
HPFRCC	<i>High-performance fiber reinforced cement composite</i>

JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LMD	<i>Livre de Macros Defeitos</i>
MDF	<i>Macro Defect Free</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MSFRC	<i>Multi-scale fiber-reinforced concrete</i>
RPC	<i>Reactive powder concrete</i>
SFCBC	<i>Steel fibrous cement-based composite</i>
UHPFRC	<i>Ultra-high performance fiber-reinforced concrete</i>
UHPFRCC	<i>Ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite</i>
UHPC	<i>Ultra-high performance glass concrete</i>
UHSC	<i>Ultra-high strength concrete</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

kg/m^3 Quilograma por metro cúbico

a/c Relação água/cimento

fck Resistência característica do concreto

GPa Gigapascal

kg/MNm Quilograma por meganewton metro

kN Quilonewton

kN/m^2 Quilonewton por metro quadrado

m/s^2 Metro por segundo ao quadrado

m/s Metro por segundo

mm Milímetro

MPa Megapascal

$\mu\text{m/m/}^\circ\text{C}$ Micrometro por metro por grau Celsius

$\mu\text{m/m/MPa}$ Micrometro por metro por megapascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivo específico	3
3	METODOLOGIA	4
4	JUSTIFICATIVA	5
5	DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO	6
5.1	Início do desenvolvimento do concreto	6
5.2	Tecnologias de construções de concreto	8
5.2.1	Concreto armado	9
5.2.2	Concreto protendido	9
5.2.3	Concreto pré-moldado	9
5.3	Concretos especiais	9
6	CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (CUAD)	12
6.1	Breve histórico do concreto de ultra alto desempenho	12
6.2	Definição e características do CUAD	14
6.2.1	Módulo de elasticidade	16
6.2.2	Retração	16
6.2.3	Deformação	17
6.2.4	Propriedades térmicas	17
6.2.5	Resistência ao fogo	17
6.2.6	Comportamento na fadiga	17
6.2.7	Resistência à impacto	17
6.3	CUAD do tipo CPR (concreto de pós reativos)	18
6.4	Sustentabilidade e custo-benefício	20
6.5	CUAD no mundo	22
6.6	CUAD no Brasil	23
7	PROJETOS EM CUAD	26
7.1	Métodos construtivos para CUAD	26
7.2	Aplicações	27
7.2.1	Passarela de Sherbrooke, Canadá	27

7.2.2	Passarela sobre a ravina de Ovejas, Espanha	30
7.2.3	Ponte Jakway Park	35
7.2.3.1	Tabuleiro integral de seção π	35
7.2.3.2	Construção	37
8	ESBELTEZ DE UMA VIGA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO	45
8.1	Características	45
8.2	Condições de cálculo	46
8.3	Aplicação	47
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
11	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICES	57
	APÊNDICE A – ALGORITMO UTILIZADO NO ESTUDO DE CASO	58
	ANEXOS	64
	ANEXO A – TROCA DE E-MAILS COM O ENGENHEIRO BRIAN KEIERBELEER	65

1 INTRODUÇÃO

Concreto de ultra alto desempenho (CUAD) nome dado a uma classe de concretos com desempenho e durabilidade superiores ao do CAD (concreto de alto desempenho). O CUAD busca ter um desempenho semelhante ao de rochas naturais e uma alternativa viável ao aço, com a vantagem de ser facilmente moldado e a capacidade de adquirir geometrias variadas.

Desenvolvido a partir de uma nova abordagem para com o concreto, a fabricação do CUAD envolve o uso de agregados mais finos, mínima adição de água, grande quantidade de aditivos superplasticificantes, controle apurado no processo de cura térmica e uso de fibras poliméricas ou metálicas. Desse modo, o material pode resistir a esforços de compressão de 150 MPa a 800 MPa e uma resistência de tração na flexão de 10 MPa a 102 MPa, a depender das fibras utilizadas no processo de fabricação. É importante ressaltar que, sem a adição de fibras, não ocorre um aumento no módulo de elasticidade em função do aumento das resistências do concreto.

Mesmo ainda sendo um produto caro por conta da baixa demanda e alto consumo de cimento em sua composição (quase três vezes maior que o do concreto convencional), várias obras ao redor do mundo já desfrutam de todas as suas vantagens, que incluem maior esbeltez das estruturas, menor permeabilidade (portanto menor vulnerabilidade à ataques químicos) e valores de resistência a compressão que podem ser 10 vezes maiores que a do concreto convencional.

Grande parte de suas aplicações dá-se em pontes e passarelas, onde é possível aproveitar as qualidades do material de maneira mais efetiva, de modo que a sua importância no contexto brasileiro poderá se consolidar no seu uso para a construção de grandes obras de infraestrutura que o país ainda necessita, como, por exemplo, o planejado trem de alta velocidade que deverá ligar as capitais de São Paulo e do Rio de Janeiro.

As pesquisas mostram que, mesmo que o custo inicial para utilização do CUAD em obras de infraestrutura seja alto, as vantagens de sua utilização e a economia gerada, desde a mobilização de trabalhadores à manutenção da obra compensa o investimento inicial e, consequentemente, leva a uma vida útil maior do empreendimento.

Em relação aos impactos ambientais, a produção do CUAD é altamente industrializada e mesmo que consuma mais cimento por metro cúbico de concreto (dado que a indústria cimentícia tem uma grande parcela de responsabilidade na degradação do meio ambiente), seu uso possibilita a concepção de estruturas com esbeltez e massa próximas à do aço (para uma mesma capacidade portante, uma peça estrutural feita com CUAD tem uma seção 25% maior que a de aço, 70% menor que a de concreto protendido e 74% menor que a de concreto armado), reduzindo drasticamente os impactos ambientais.

Portanto, pode-se dizer que o CUAD é uma tema importante para ser discutido no Brasil, principalmente em momentos onde é preciso aplicar investimento em infraestrutura de maneira sensata e evitar o despedício.

Mesmo com a falta de experiência na área, buscou-se informações técnicas importantes para aprendizado e discussão, como as características físicas do material e obras em que foi utilizado, com foco nos aspectos técnicos da engenharia civil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar, conhecer e estudar o CUAD como material de construção civil e discutir a metodologia utilizada para sua aplicação como solução construtiva.

2.2 Objetivo específico

Apresentar um estudo de análise estrutural, onde, através de processos iterativos efetuado em um programa próprio (desenvolvido para ser executado no Scilab), analisa-se a possibilidade de se vencer grandes vãos com uma viga de CUAD, sem alterar sua seção transversal.

3 METODOLOGIA

Para elaboração deste estudo, tomou-se como base referências bibliográficas, normas e recomendações técnicas, relatórios, artigos e pesquisas divulgadas no meio científico.

Por se tratar de um material relativamente novo e desenvolvido principalmente na Europa, a literatura disponível sobre CUAD em português é escassa, de modo que a revisão bibliográfica foi baseada em publicações de diversos países.

Feita a coleta destas informações, iniciou-se a pesquisa específica sobre as propriedades do CUAD, necessárias para a correta modelagem e entendimento das propriedades físicas do material.

Coletou-se informações da ponte construída com CUAD Jakway Park, nos Estados Unidos, por conta da quantidade de informações disponíveis sobre o projeto e a direta colaboração de um dos engenheiros responsáveis pelo projeto com esta pesquisa. Por se tratar de um empreendimento executado em outro país, o trabalho fundamenta-se nos relatórios técnicos e científicos emitidos pelos engenheiros e pesquisadores responsáveis pelo projeto, já que a visita técnica não foi possível. Este projeto é de grande interesse para se entender os procedimentos necessários para se implantar uma solução construtiva com CUAD.

A pesquisa tem como foco o entender as possibilidades arquitetônicas e estruturais que podem ser atingidas com o CUAD, ao analisar a quanto pode-se aumentar vão teórico de viga pretendida sem aumentar sua seção transversal, bastando aumentar a resistência característica à compressão do concreto.

A parte prática desta pesquisa fundamenta-se principalmente na NBR 6118:2014, no livro publicado por Cholfe e Bonilha (2015) e nas recomendações para projetos com CUAD publicadas pela AFGC (2013).

4 JUSTIFICATIVA

Picchi (1993) afirma que 30% do investimento feito em uma obra é desperdiçado. Além disso, é importante notar que as obras no Brasil tem uma baixa adesão na adoção de processos otimizados na construção civil. Diante disso, vê-se a necessidade de introduzir no mercado um produto que traga racionalização ao canteiro de obras, tenha um desempenho superior aos materiais disponíveis atualmente no mercado e que tenha um ciclo de produção e descarte mais sustentável e inteligente, agregando valor ao produto vendido ao cliente. No Brasil, existem poucos estudos publicados sobre CUAD e sua aplicação como material alternativo, tornando este tema de interesse para a pesquisa nacional. Além disso, existe grande curiosidade acerca deste material, já que produzir um concreto com resistências superiores a 150 MPa exige um controle de qualidade muito rigoroso.

Durante a pesquisa, aspectos importantes foram notados, principalmente em relação à viabilidade da implantação e manutenção de um empreendimento executado com CUAD, pois, apesar do seu custo inicial ser maior, a diminuição no volume de uso de concreto e a resistência superior do material (o qual exige muito menos manutenção do que outras soluções construtivas ao longo de sua vida útil) pode viabilizar sua escolha como solução construtiva.

5 DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO

A história do desenvolvimento do concreto tem pelo menos 20 séculos, até chegar a ser o produto industrializado mais consumido no mundo atual. Tamanha popularidade deve-se, principalmente, à disponibilidade de matéria-prima em praticamente todos os continentes, além de sua versatilidade, durabilidade e bom desempenho como material construtivo e competitividade econômica, frente à outros materiais de construção.

Este capítulo é dedicado a apresentar um breve histórico do desenvolvimento do concreto, desde seus primórdios aos dias atuais.

5.1 Início do desenvolvimento do concreto

O Homem sempre fez uso dos materiais disponíveis na natureza para satisfazer suas necessidades de sobrevivência e abrigo. Cohen (1988 apud ISAIA, 2011) aponta que um desses primeiros materiais foi a argila, utilizada para construir utensílios domésticos e abrigos mais resistentes. Segundo Malinowski e Garfinkel (1991 apud ISAIA, 2011), em seguida passou-se a utilizar cal e gesso para revestimento de pisos e paredes, como pôde ser verificado em antigas cidades do Oriente Médio (ISAIA, 2011).

Os gregos já dominavam o processo empírico de produção de cal hidráulica e de concreto já no século V a.C. Kouï e Ftikos (1998 apud ISAIA, 2011) analisaram uma cisterna de concreto construída em Kamiros, ilha de Rodes, Grécia, construída por volta dessa época, e descobriram que o traço granulométrico utilizado se aproxima muito da curva granulométrica ideal de Füller. Este concreto é constituído de seixo rolado, calcário médio e fino, terra vulcânica e cal e possui uma resistência característica de 13,5 MPa, um resultado notável para um material feito há mais de 2500 anos. Ainda assim, as grandes construções gregas eram, predominantemente, feitas com pedras. Foram os romanos que aperfeiçoaram o uso do concreto e passaram a aplicá-lo em pilares, vigas, abóbadas e cúpulas de grandes dimensões. Vitrúvio (1 a.C.), em seu livro *De Architectura*, mostra que a composição do concreto romano consistia de argila caulinítica calcinada ou pedras vulcânicas calcinadas e areia vulcânica reativa, de origem natural (ISAIA, 2011).

O desenvolvimento da tecnologia do concreto passou por um grande hiato durante a Idade Média, o qual só retorna na época do Renascimento (século XIV), marcando o início da Idade Moderna. É importante notar que foi nesse período que Galileo Galilei começou a dar as bases para o que viria a se tornar a engenharia de vigas, além de outras figuras importantíssimas para a ciência dos materiais, como Robert Hooke e sua teoria da elasticidade dos corpos, Isaac Newton

e a inauguração da física clássica e, assim como Leibni, contribuíram para o desenvolvimento cálculo integral e diferencial, formando a base teórica para o entendimento das leis fundamentais que regem as estruturas (ISAIA, 2011).

Logo após a Revolução Industrial, diversos tipos de cimento foram patenteados, porém o que obteve mais sucesso foi o cimento Portland, patenteado em 1824 pelo inglês Joseph Aspdin. Este material só foi chegar ao Brasil em 1855, trazido pelo comendador Antônio Proost Rodovalho (ISAIA, 2011).

O cimento Portland consiste basicamente da mistura de clínquer moído e gesso. Clínquer é um material obtido a partir da mistura e moagem de pedras calcárias, margas e britas de rochas, as quais são colocadas em fornos rotativos e submetidas a temperaturas superiores a 1400° C. O cimento ainda pode receber alguns aditivos, que podem agregar algumas características como resistência a sulfatos, baixo calor de hidratação, entre outras.

No século XIX houve um grande salto no desenvolvimento da tecnologia do concreto, resultando no tão popular concreto armado. Lambot, um agricultor francês, começou a utilizar cimento com telas de ferro para fazer tanques e em 1855, apresentou um barco construído com essa técnica em Paris, patenteando o método. Monier, um jardineiro francês, observou o barco e passou a construir vasos com a mesma técnica, a qual evoluiu e começou a produzir painéis de fachada, o que patenteou em 1867. Em 1875, Monier construiu a primeira ponte de concreto armado do mundo, no castelo de Chazelet, França Figura 1. Com 18,80 m de comprimento e 4,25 m de largura, a ponte é a realização do conhecimento empírico e intuitivo de Monier ao empregar aço e concreto para sua construção.

Figura 1 – Ponte de concreto armado sobre o fosso do castelo de Chazelet, França. Construída por Joseph Monier em 1875.



Fonte: Bosch (2001).

Monier vendeu suas patentes de concreto armado em 1884 para duas empresas alemãs, que posteriormente foram vendidas para o engenheiro alemão Gustav Wayss em 1886, da empresa Wayss & Freytag. Wayss passou a investir em pesquisa e um de seus funcionários,

Mörsch, foi quem aprimorou e estabeleceu bases científicas para o concreto armado, escrevendo o livro intitulado “Der Betoneisenbau: Seine theorie und Anwendung” (Construções de Concreto e Aço: Sua teoria e aplicação).

O primeiro edifício em concreto armado feito no Brasil foi construída pela Wayss & Freytag em 1907, na rua São Bento, em São Paulo - SP. Possuía apenas três pavimentos, mas já era um marco para a época.

Os primeiros estudos acerca de concreto pretendido começaram na década de 20, possibilitando a construção de estruturas mais esbeltas, leves e capazes de vencer vãos maiores do que o concreto armado é capaz de suportar.

A popularidade do concreto deve-se, principalmente, às seguintes características:

- Disponibilidade de matéria prima: 89% da crosta terrestre é formada por 90% dos materiais que compõem o concreto;
- Versatilidade na modelagem: em seu estado fresco é um material plástico, se adequando a qualquer forma desejada;
- Sólido: depois da cura, se torna um material, praticamente homogêneo, solidarizado entre si;
- Durável: tomadas as devidas precauções, o concreto é capaz de resistir aos efeitos do tempo e do ambiente;
- Custo: por conta da disponibilidade de matéria prima e bom desempenho, é um material extremamente competitivo na cadeia de materiais de construção civil;
- Sustentabilidade: quando bem executadas, as estruturas de concreto são muito duráveis, é um material facilmente encontrado e de produção regional, utiliza rejeitos industriais como adição e seu entulho é totalmente reciclável.

Apesar disso, o concreto ainda possui algumas desvantagens, como baixa resistência à tração, elevado peso próprio, acentuada variação volumétrica e dificuldade na moldagem de peças de grande volume, devido ao calor gerado na hidratação. Cada um destes problemas tem uma solução específica, a ser determinada pelo projetista.

5.2 Tecnologias de construções de concreto

O concreto, quando não associado a nenhum outro material, é denominado concreto simples. O concreto simples é incapaz de suportar seu próprio peso, já que o material possui uma capacidade de resistência à tração muita baixa (cerca de 10% de sua resistência a compressão), de modo que, para se construir edificações, é necessário associá-lo a outras materiais, sendo o método mais comum e difundido, a associações do concreto com o aço. As seguintes seções apresentam mais detalhes desta associação e da industrialização do método.

5.2.1 Concreto armado

Concreto armado é um material de construção civil que consiste na combinação do concreto simples com uma armadura de aço. O concreto resiste aos esforços de compressão aos quais a estrutura será solicitada e fornece ao aço um ambiente alcalino que o protege dos efeitos corrosivos do ambiente, dado uma espessura mínima de cobrimento de concreto sobre a armadura. Por sua vez, o aço (após a fissuração inicial do concreto) resiste aos esforços de tração aos quais a estrutura é solicitada, o que ocorre devido à aderência de uma material ao outro. Outro fator determinante para a escolha destes dois materiais são os seus respectivos valores do coeficiente de dilatação térmica, próximos entre si, o que garante que as deformações térmicas sofridas pelo aço são praticamente iguais à do concreto.

A armadura de aço contida nos elementos estruturais de concreto armado é chamada de armadura passiva, pois ele só começa a ser solicitada quando algum carregamento é adicionado à estrutura. O concreto, por sua vez, incapaz de suportar os esforços de tração, fissura e, por conta da aderência da interface concreto-aço, os esforços são transmitidos à armadura, a qual passa a resistir aos esforços de tração.

5.2.2 Concreto protendido

Concreto protendido é um material de construção civil que consiste na combinação de concreto simples com cabos de aço protendido, isto é, pré ou pós tensionado. Estes cabos comprimem o concreto, o qual não fissura na iminência de um carregamento que gere esforços de tração, já que os cabos protendidos recebem estes carregamentos de maneira ativa, diferentemente do concreto armado, onde a armadura age de maneira passiva. Desse modo, a protensão diminui ou anula as solicitações de tração no concreto e ainda melhora a resistência ao cisalhamento e à torção da peça estrutural.

5.2.3 Concreto pré-moldado

O concreto pré-moldado é uma peça estrutural ou decorativo produzida de maneira industrializada, os quais, posteriormente, são transportados para montagem final. O seu processo de produção visa diminuir o tempo de construção e mobilização de trabalhadores no canteiro de obras.

5.3 Concretos especiais

O século XX foi marcado pela busca da otimização dos processos de produção e de projeto de estrutura de concreto, mas ao que tudo indica, o século XXI será marcado pela busca otimização do concreto em si, afim de torná-lo um material ainda mais barato, versátil e capaz

de competir ainda mais com o aço na construção civil. Nesta seção, apresenta-se as últimas tecnologias disponíveis para o uso de concreto na construção civil:

- a) **Concreto de alto desempenho (CAD):** trata-se de uma classe de concreto com resistências superiores ao concreto convencional, de 40 MPa a 100 MPa;
- b) **Concreto de ultra alto desempenho (CUAD):** trata-se de uma nova classe de concretos especiais. Este trabalho expõe este material em detalhes no Capítulo 6;
- c) **Concreto com aditivos especiais:** aditivos são materiais que, adicionados ao concreto, são capazes de mudar seu comportamento físico e/ou químico, de acordo com a necessidade da construção. Abaixo, lista-se alguns exemplos de aditivos disponíveis no mercado e suas características:
 - **Acelerador de pega:** para uma moldagem rápida e consequente breve desforma;
 - **Adição de minerais pozolânicos:** este aditivo é obtido em regiões de atividade vulcânica ou feito artificialmente em fornos industriais. Dos aditivos desta categoria, o principal é a cinza volante, utilizada para retardar a hidratação do concreto e diminuir sua reação álcali-agregado, retardando o ganho inicial de resistência mecânica e diminuindo a quantidade de calor liberado durante a hidratação. Com isso, a incidência de fissuras em peças volumosas de concreto é inibida;
 - **Aditivos diminuidores ou compensadores de retração:** esses aditivos visam resolver o mesmo problema: retração do concreto e empenamento das placas de piso;
 - **Aditivos tensoativos:** ajuda a incorporar ar no concreto, diminuindo a tensão superficial que a água causa. Assim reduz a segregação e exsudação, mas diminuindo a resistência mecânica;
 - **Plastificantes/redutores de água:** aumenta a trabalhabilidade do concreto sem a necessidade de se adicionar mais água. A adição desse material é de 0,2 a 0,7% da massa de cimento, e pode representar cerca de 20% na redução de água na pasta;
 - **Rebarbas metálicas e carbono:** visa transformar o concreto em um material condutor de eletricidade, utilizando a própria peça estrutural para aquecer o ambiente ou derreter gelo e neve em áreas externas;
 - **Retardador de pega:** assim como o nome já diz, aumenta o tempo disponível para se trabalhar com o concreto. Muito utilizado durante concretagens demoradas e locais de clima quente. Pode retardar o início da pega em até 8 horas;
- d) **Concreto com fibras:** a adição de fibras ao concreto tem como finalidade redistribuir de maneira mais uniforme os esforços a qual a peça estrutural é solicitada, predominantemente na seção de tração, pois aumenta seu módulo de elasticidade sem diminuir sua resistência mecânica. Sua aplicação é mais comum em rodovias, pisos

industriais e pistas de aeroportos. As fibras podem ser de aço, polipropileno, vidro, carbono, poliéster e nylon, entre outras;

- e) **Concreto leve estrutural:** o concreto leve estrutural substitui o agregado comum por agregados leves (pedra pomes, escória vulcânica, argila expandida e escória expandida), fazendo com que sua massa específica seja 20% menor que a do concreto convencional. Por conta de empregar o uso de agregados porosos, estruturas feitas com concreto leve estrutural sofrem de deformações mais acentuadas, já que seu módulo de elasticidade varia de 50% a 80% do concreto convencional. O agregado leve também tende a se acumular na superfície durante a concretagem, além de absorver água, fator que deve ser levado em consideração na hora de se determinar o traço do concreto. O acúmulo do agregado na superfície pode ser controlado com os agregados miúdos;
- f) **Concreto arquitetônico e decorativo:** o concreto sem fim estrutural ou também conhecido como arquitetônico, tem mesmo desempenho de um concreto convencional. Pigmentos inertes podem ser adicionados para dar coloração ao concreto;
- g) **Concreto para blindagem de radiação:** utiliza-se agregados pesados, como hematita, de acordo com a intensidade da radiação a qual estará exposto;
- h) **Concreto fotocalítico:** com a incorporação de dióxidos de titânio ou silício em sua composição ou em sua superfície, é possível transformar gases nocivos, como óxido de nitrogênio em nitratos essenciais para o desenvolvimento das plantas, através da fotocálise;
- i) **Concreto autocicatrizante:** incorpora-se bactérias capazes metabolizar os componentes necessários para fechar pequenas fissuras no concreto. As bactérias ficam inertes e só entram em ação em contato com água. Para isso, são adicionados retentores de água no concreto, os quais se rompem no aparecimento de uma fissura;
- j) **Concreto translúcido:** utiliza como aditivo fibras óticas poliméricas. Tem bastante potencial para iluminar ambientes e provocar a diminuição do consumo de energia elétrica.

6 CONCRETO DE ULTRA ALTO DE- SEMPENHO (CUAD)

O concreto de ultra alto desempenho agrega o que existe de mais moderno nos setores de pesquisa e desenvolvimento de concreto. Pode-se dizer que CUAD é uma classe de concretos com resistência e durabilidade superiores ao CAD (concreto de alto desempenho), o qual já é utilizado de maneira mais corriqueira em grandes obras.

Apresenta-se um breve histórico do desenvolvimento do CUAD, as principais linhas de pesquisa em estudo, características e obtenção do material, aspectos ambientais e de custo-benefício, além de sua aplicação no Brasil e no mundo.

6.1 Breve histórico do concreto de ultra alto desempenho

Sempre buscou-se o desenvolvimento de um concreto cada vez mais resistente e mais fácil de se trabalhar. Inicialmente, essas duas características se rivalizam, pois, a relação água/aglomerante influencia tanto a trabalhabilidade do concreto como sua resistência. Uma maior quantidade de água melhora a trabalhabilidade do concreto, mas aumenta sua porosidade e diminui sua resistência e durabilidade. Por outro lado, se a quantidade de água for muito pequena, o concreto terá uma baixa trabalhabilidade, dificultando o trabalho dos operários.

Füller (1907 apud CARNEIRO; CINCOTTO, 1999) demonstrou empiricamente que, dada uma porcentagem de cimento em determinado volume de concreto, havia uma distribuição ótima de tamanhos do grão de agregado a qual aumentava a sua resistência mecânica e atingia uma melhor trabalhabilidade, concluindo que a distribuição granulométrica dos agregados influencia diretamente na compacidade do concreto, que por sua vez, influencia em sua resistência mecânica (quanto maior a compacidade, maior a resistência mecânica).

Na década de 1930, Eugène Freyssinet demonstrou que, a aplicação de pressão no concreto fresco ainda na forma, aumentava sua resistência mecânica. O processo expulsa o ar preso no concreto durante a mistura e expulsa o excesso de água, diminuindo a relação água/aglomerante. Nos anos 60, apenas com a aplicação deste princípio (com elevada pressão) e cura térmica, foram alcançados valores de resistência de 650 MPa (CHEYREZI; RICHARD, 1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 8).

Segundo Resplendino (2011, p. 5), as primeiras pesquisas sobre a tecnologia do CUAD começaram nos anos 70, com o pesquisador Bache, na Dinamarca. Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento do CRC (*Compact Reinforced Composite*, em português, CCR - Compósito Compacto Reforçado). Na Europa o CRC é muito utilizado na composição de pré-fabricados,

porém eles são reforçados por armaduras convencionais, calculadas de modo que não se leva em consideração a participação mecânica das fibras (RESPLENDINO, 2011, p. 6). Segundo Aïtcin (2000), nos anos 1972-1973, Brunanauer desenvolveu um compósito capaz de resistir uma solicitação de compressão de até 200 MPa, o qual foi patenteado sob o nome de DSP (*Densified with Small Particles* ou DPP - Densificado de Partículas Pequenas), baseado no conceito de compactação da matriz granulométrica. Posteriormente, Birchall et al. desenvolveram um concreto de ultra alto desempenho a partir de uma abordagem diferenciada, denominado de MDF (*Macro Defect Free* ou LMD - Livre de Macros Defeitos) (AÏTCIN, 2000). O MDF incorpora o conceito de pasta polimérica, garantindo uma resistência a tração na flexão de 150 MPa ou mais, especialmente quando se utiliza cimento aluminoso. Desse modo, as principais linhas de pesquisa da atualidade se dividem em dois ramos: uma pesquisa a utilização de materiais finíssimos na composição do concreto e a outra, a utilização de pastas poliméricas na composição do concreto (VANDERLEI, 2004, p. 8) e duas abordagens de pesquisa: uma baseada em uma análise empírica, a partir da construção de modelos em escala e estudo de comportamento e carregamento da estrutura, como a utilizada pela *Association Française de Genie Civil* (AFGC) e outra que deriva os efeitos macroscópicos de fenômenos em escala microscópica e nanoscópica, conhecido como micromecânica. Trata-se de um processo altamente analítico, demandando muito mais tempo para que se possa entender, mas que, quando forma as suas bases, permite uma fácil modificação para incluir efeitos mecânicos provenientes da temperatura (termomicromecânica), porosidade (poromicromecânica) e química (quimiomicromecânica) (DAVILA, 2007).

Diversos compósitos de base cimentícia possuem alta resistência e superior durabilidade, os quais pode-se dizer que se enquadram na categoria de concreto de ultra alto desempenho (CUAD). Além das variedades citadas acima, por Russel e Graybeal (2013) e outras de desenvolvimento mais recente, tem-se:

- FRHPC - fiber-reinforced high-performance concrete (CADRF - concreto de alto desempenho reforçado com fibras);
- HPFRCC - high-performance fiber reinforced cement composite (CCADRF - compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras);
- MSFRC - multi-scale fiber-reinforced concrete (CMSRF - concreto multiescalável reforçado com fibras);
- RPC - reactive powder concrete (CPR - concreto de pós reativos);
- SFCBC - steel fibrous cement-based composite (CCFA - compósito cimentício fibroso de aço)
- UHPFRCC - ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite (CCU-ADRF - compósito cimentício de ultra alto desempenho reforçado com fibras);
- UHPFRC - ultra-high performance fiber-reinforced concrete (CUADRF - concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras);

- UHSC - ultra-high strength concrete (CUAR - concreto de ultra alta resistência);
- Compósito cimentício de ultra alta resistência;
- Compósito cimentício de ultra resistência reforçado com fibras.
- UHPGC - ultra-high performance glass concrete (CVUAD - concreto de vidro de ultra alto desempenho) (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016);
- GUHPC - geopolymmer composite ultra high performance concrete (CGCUAD - compósito geopolimérico de concreto de ultra alto desempenho)(GONG; LUTZE; PEGG, 2012).

Historicamente, pode-se observar uma relação muito próxima entre a tecnologia existente e os materiais disponíveis para construção e a arquitetura das construções. Ainda que o CUAD seja chamado de “concreto”, trata-se de um material completamente novo, exigindo um novo olhar sobre como ele deve ser utilizado nas construções. Não faz nenhum sentido utilizar um material com desempenho tão elevado do mesmo modo que utilizamos o concreto convencional. Outro ponto a se notar é que a popularidade de um material é diretamente afetada pelo seu custo. Assim como a produção de aço foi revolucionada pela Bessemer and Open Hearth Steel na década de 1850, produzindo aço em grande escala a preços acessíveis, fazendo com que as pessoas passassem a utilizá-lo nas construções, o CUAD também precisa passar por um processo similar, de modo que essa tecnologia possa ser trazida a aplicações populares (TANG, 2004, p. 9).

Neste trabalho, utiliza-se a definição genérica concreto de ultra alto desempenho (CUAD), salvo quando houver necessidade de especificar uma variedade.

6.2 Definição e características do CUAD

O CUAD é um compósito de matriz cimentícia, composto de aglomerante, agregado miúdo, fibras (metálicas, naturais ou sintéticas) que, ao contrário do concreto convencional, é capaz de suportar grandes cargas de compressão (normalmente de 150 MPa a 250 MPa, mas podendo chegar a 800 MPa em condições especiais) e possui comportamento dúctil, devido às fibras adicionadas ao compósito. Caracteriza-se também pela alta quantidade de aglomerante, baixa relação água/aglomerante (o que garante um material de alta densidade) baixa porosidade, microestrutura extremamente cerrada e cura térmica a elevadas temperaturas, em atmosfera saturada de vapor (AFGC, 2013). Desse modo, este material possui uma elevada durabilidade, possui baixa permeabilidade para cloridos (composto químico extremamente corrosivo para concreto), grande resistência a congelamento-descongelamento e grande resistência a ataques de ácidos e sulfatos (RESPLENDINO, 2011, p. 7-11). É importante notar que a cura térmica também melhora as propriedades do concreto convencional, pois sua aplicação acelera as reações de hidratação do cimento. A exposição precoce do concreto com altas temperaturas reduz o

período de latência e define a estrutura da pasta de cimento mais cedo, a qual enrijece mais rápido e tem um tempo de início de pega mais curto (NEVILLE, 1997 apud PALMA et al., 2013, p. 4). Camarini (1995 apud PALMA et al., 2013, p. 4) afirma que a cura térmica é considerada a cura mais eficiente, principalmente quando se trata de concreto pré-moldado, ao proporcionar o melhor aproveitamento dos equipamentos necessários para a moldagem do concreto.

Segundo Camarini (1995 apud PALMA et al., 2013, p. 4), a cura térmica em atmosfera saturada de vapor é feita de duas maneiras:

- com pressão de aproximadamente 1 MPa e temperaturas entre 150°C e 205°C (cura em autoclave);
- à pressão atmosférica, com temperaturas menores que 100°C.

Como o CUAD exige um rígido controle de qualidade para atingir altas resistências, é recomendável que sua produção seja industrializada, assim como já se faz na indústria de concreto pré-moldado com o concreto convencional ou o concreto de alto desempenho.

Segundo o CBI Betonginstitutet (2016), pode-se dizer, resumidamente, que o CUAD é composto de:

- cimento;
- fíler (quartzo, pó de cinza, escória);
- areia;
- água;
- superplastificante;
- fibras (metálicas ou poliméricas).

E caracteriza-se por:

- baixa relação água/aglomerante;
- alta dosagem de superplastificante;
- auto adensamento;
- microestrutura densa;
- cura térmica.

É importante notar que o cimento não é o único aglomerante que pode ser utilizado para fazer o CUAD. Pesquisas recentes mostram que alternativas como geopolímeros e pó de vidro podem substituí-lo na mistura dos materiais, os quais podem ser até mais sustentáveis e baratos que o cimento (GOLDONI, 2014) (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

Tipicamente, o CUAD resiste a solicitações de compressão de 200 MPa e à ruptura dúctil de 10 a 15 MPa. Ainda é capaz de suportar deformação e carregamentos de flexão e tensão

mesmo após a fissuração inicial do concreto, devido à dissipação de energia do material ser maior devido à sua microestrutura densa (GUNES et al., 2012, p. 1). Sua razão de massa para resistência é de aproximadamente 15 kg/MNm, em contraste com a razão de 40 a 120 kg/MNm do concreto convencional (STENGEL; SCHIEßL, 2008, p. 461). Tuan (2011 apud GU; YE; SUN, 2015) comparou a composição e as propriedades do concreto convencional, CAD e CUAD. Os detalhes são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparaçāo da composiçāo do concreto convencional, CAD e CUAD

	Concreto convencional	CAD	CUAD
Cimento (kg/m ³)	<400	400	600-1000
Agregado graúdo (kg/m ³)	≈ 1000	900	-
Areia (kg/m ³)	≈ 700	600	1000-1200
Fumo de sílica (kg/m ³)	-	40	50-300
Armadura/fibras (kg/m ³)	Projetado	Projetado	40-250
Superplastificante (kg/m ³)	-	5	10-70
Água (kg/m ³)	> 200	100-150	110-260
Tamanho máximo do agregado (mm)	19,0-25,5	9,5-12,5	0,15-0,6
Relação água/cimento (a/c)	0,40-0,70	0,24-0,38	0,14-0,27

Fonte: Tuan (2011 apud GU; YE; SUN, 2015, p. 589).

6.2.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do CUAD varia de acordo com o traço utilizado, característica dos agregados e o regime de cura, ficando entre 40 a 70 GPa. Seu módulo de elasticidade é maior que o apresentado pelo concreto convencional e pelo CAD, devido à sua microestruturas densa e adição de fibras (GU; YE; SUN, 2015, p. 591).

6.2.2 Retração

O CUAD apresenta três tipos de retração: química, autógena e de secagem, afetadas principalmente pela relação água/aglomerante. Das três, o tipo de retração mais predominante, assim como observado no concreto de alto desempenho (CAD) (NEVILLE; BROOKS, 2010, p. 408), é a autógena, por conta da baixa relação água/aglomerante, existindo um alto risco de micro-fissuração na idade jovem do concreto caso ele se encontre restrinido. De modo a compensar a retração autógena, é possível utilizar um aditivo expansivo ou um aditivo de redução da retração, cuidadosamente dosados para a mistura. Outra solução é aplicar cura interna, descrita pelo ACI (*American Concrete Institute*, em português, Instituto Americano de Concreto) como “fornecimento água através de uma mistura de cimento recém-colocada

usando reservatórios, através de agregados leves ligeiramente pré-molhados, que descartam facilmente a água conforme necessário para a hidratação ou para substituir a umidade perdida por evaporação ou auto-dessecação”. Como não é possível utilizar agregados leves no CUAD, pesquisadores investigam a possibilidade de se utilizar polímeros superabsorventes como agentes de cura interna (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.2.3 Deformação

O coeficiente de deformação do CUAD varia de 0,3 a 0,85, e a deformação específica de 5 a 47 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$, sendo que a deformação do concreto pode ser expressada por um coeficiente de deformação (tensão de deformação/tensão inicial) ou deformação específica (tensão de deformação/força aplicada). Para efeito de comparação, a deformação específica do concreto convencional varia de 35 a 140 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.2.4 Propriedades térmicas

As recomendações da AFGC (2013) possuem uma tabela com o coeficiente de dilatação térmica para diferentes misturas de CUAD. Caso a mistura não esteja disponível na tabela, o valor geral a ser utilizado deve ser de 11 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.2.5 Resistência ao fogo

Apesar do CUAD não ser um material inflamável, assim como todo concreto, sua microestrutura cerrada o torna mais suscetível ao lascamento (*spalling*) explosivo durante o aquecimento. Este fenômeno ocorre por conta de pressão nos poros devido a esforços térmicos e desidratação dos hidratos. Fibras de prolipropileno é uma das soluções adotadas para evitar este comportamento (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.2.6 Comportamento na fadiga

Como o CUAD é um material recente, existem poucos estudos sobre seu comportamento na fadiga, os quais mostram que ele possui uma excelente resistência à fadiga, ao contrário do que ocorre com outros materiais de alta resistência (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.2.7 Resistência à impacto

A resistência à impacto do CUAD é muito superior à do concreto convencional ou mesmo do concreto com fibras, por conta do forte vínculo entre as fibras e a matriz cimentícia, de modo que o CUAD é um ótimo material para aplicações militares e construção de estruturas que precisem resistir a explosões ou penetrações (GU; YE; SUN, 2015, p. 592).

6.3 CUAD do tipo CPR (concreto de pós reativos)

Existe muitas variedades de CUAD disponíveis no mercado, mas segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 1312-1313), o CPR (concreto de pós reativos) é o CUAD que possui a maior dedicação dos centros de pesquisa. É sobre essa variedade de CUAD que este trabalho se concentra, já que essa é a variedade disponível no Brasil, comercializada pela LafageHolcim sob o nome de Ductal®.

Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 1313) afirma que a “ideia básica desse novo tipo de concreto foi eliminar os inconvenientes dos agregados graúdos [...] como as possíveis oclusões ou vazios internos, eliminação da zona de transição e aumento da superfície do esqueleto granular”. O seguinte excerto explica melhor suas características:

Pelo efeito da maior superfície específica, a distribuição das cargas incidentes sobre os grãos é mais homogênea, diminuindo a concentração de tensões em eventual falha da microestrutura, assim, aumentando a resistência última do material. Sabe-se que, quanto menor a dimensão dos grãos, maior é a superfície específica, maior a reatividade química e ligações secundárias pelas forças de van der Waals (ligações de superfície) e mais elevada é a homogeneidade do material. Dessa forma, os grãos de agregados finos não ficam em contato um com os outros, evitando as tensões de contato e possíveis falhas nesses locais (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011, p. 1312).

Aïtcin (2000) resume o conceito do CPR em três princípios básicos:

- Aumento da homogeneidade do material pela eliminação das partículas grossas, limitação da areia para prevenir que entrem em contato entre si na pasta endurecida, melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada e eliminação da zona de transição nas interfaces pasta/agregados;
- Aumento da compacidade pela otimização das dimensões dos grãos dos pós da mistura e, quando possível, pela compressão exercida durante o endurecimento;
- Refinamento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento de calor.

Vanderlei e Giongo (2011) definem os princípios para obtenção do CPR da seguinte forma:

- eliminação dos agregados graúdos para aumentar a homegeinidade;
- compressão do material durante o preparo (antes e durante a concretagem, diminuindo a incorporação de ar, removendo o excesso de água e compensando a retração química) e/ou otimização da distribuição granulométrica dos agregados miúdos de modo a aumentar a densidade do material;
- cura térmica para fortalecer a microestrutura;
- uso de fibras ou tubos metálicos preenchidos com CPR para aumentar a ductilidade;

Do ponto de vista da granulometria dos agregados que compõem o CPR (diâmetro máximo de 0,2 mm), ele deveria ser considerado uma argamassa, mas convencionou-se chamá-lo

de concreto devido ao desempenho exibido pelo material (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011, p. 1313).

Vanderlei e Giongo (2011) demonstram que a indústria brasileira já produz os materiais necessários para obtenção do CPR. Assim como Tutikian, Isaia e Helene (2011), recomendam o uso de cimento CPV ARI. A dosagem de CPR proposta por Vanderlei e Giongo (2011) é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Dosagem para concretos de pós reativos.

Material	Relação (em massa)	Consumo kg/m ³
Cimento	1	874
Areia	1,101	962
Pó de quartzo	0,235	205
Sílica ativa	0,246	214
Superplasticificante (3%)	0,030	26
Água (a/c = 0,18)	0,180	157

Fonte: Vanderlei e Giongo (2011, p. 119).

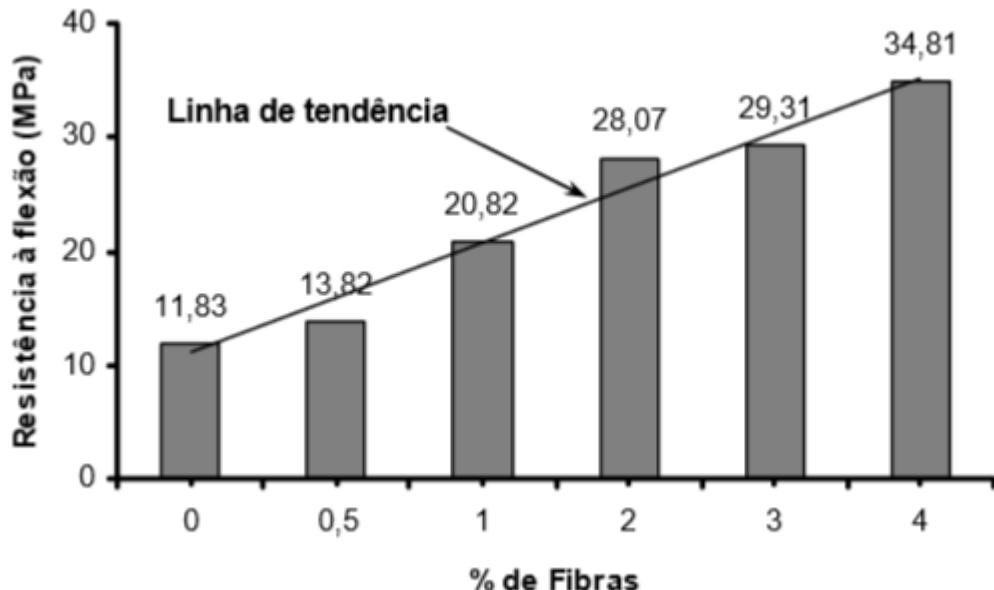
Nota: Recomenda-se o uso de água de amassamento de baixa temperatura, pré cura térmica de 2 dias e cura térmica de 24 horas a uma temperatura de 80°C.

É importante notar que a dosagem Vanderlei e Giongo (2011) é condizente com a realidade brasileira, portanto difere da utilizada por outros estudos internacionais, em virtude da diferença geográfica.

A adição de fibras é o fator determinante na resistência à tração na flexão do CPR, que passam a influenciar este fator em uma taxa a partir de 1% (VANDERLEI; GIONGO, 2011, p. 138). A Figura 2 mostra a influência da taxa de fibras na resistência à tração na flexão do CPR observada nos corpos de prova moldados pelos autores. Este fenômeno ocorre pois as fibras distribuem melhor os esforços na matriz do concreto, porém, como sua distribuição não pode ser controlada, normalmente é preciso lançar mãos de outros métodos para garantir a resistência do concreto a esforços de tração na flexão.

Ainda não existe uma consolidação de como deve ser feito o estudo de dosagem do CPR. Vanderlei (2004, p. 42) e Christ (2014, p. 32) informam que métodos matemáticos de empacotamento de partículas têm bastante êxito nessa tarefa.

Figura 2 – Influência da taxa de fibras na resistência à tração na flexão do CPR.



Fonte: Vanderlei e Giongo (2011, p. 138)

6.4 Sustentabilidade e custo-benefício

Devido a demandas sociais e ambientais, a indústria da construção passou a incluir sustentabilidade no cálculo de custo-benefício de um empreendimento. Segundo Racky (2004, p. 797, tradução e grifo nosso)

O custo-benefício sempre foi a maior exigência dos engenheiros civis nos processos de projeto, planejamento e construção. A partir da década de 1990, o princípio da sustentabilidade foi incluído, de modo a atender às demandas sociais, fazendo com que o custo-benefício deixasse de se preocupar apenas com fatores puramente de otimização econômica e passasse a integrar fatores sociais e ecológicos. **Custo-benefício e sustentabilidade não são mutuamente excludentes**. Pelo contrário, custo-benefício é um componente integral do conceito de sustentabilidade.

Racky (2004) demonstra que o consumo energético (fabricação, transporte, etc.) do ciclo produtivo do CUAD, se comparado de maneira bruta, é maior que o do concreto convencional, culminando na liberação de gases poluentes e potenciais danos ambientais. Mas isso não leva em consideração que o CUAD abre novas possibilidades de projeto ao viabilizar a construção de estruturas mais leves esbeltas, além de aumentar o espaço útil destas construções. Levando isso em consideração, tem-se resultados animadores, onde ocorre uma economia energética entre 58% e 74%. É importante salientar as limitações do estudo, que faz essa comparação em relação a pilares de concreto convencional e pilares feitos com CUAD.

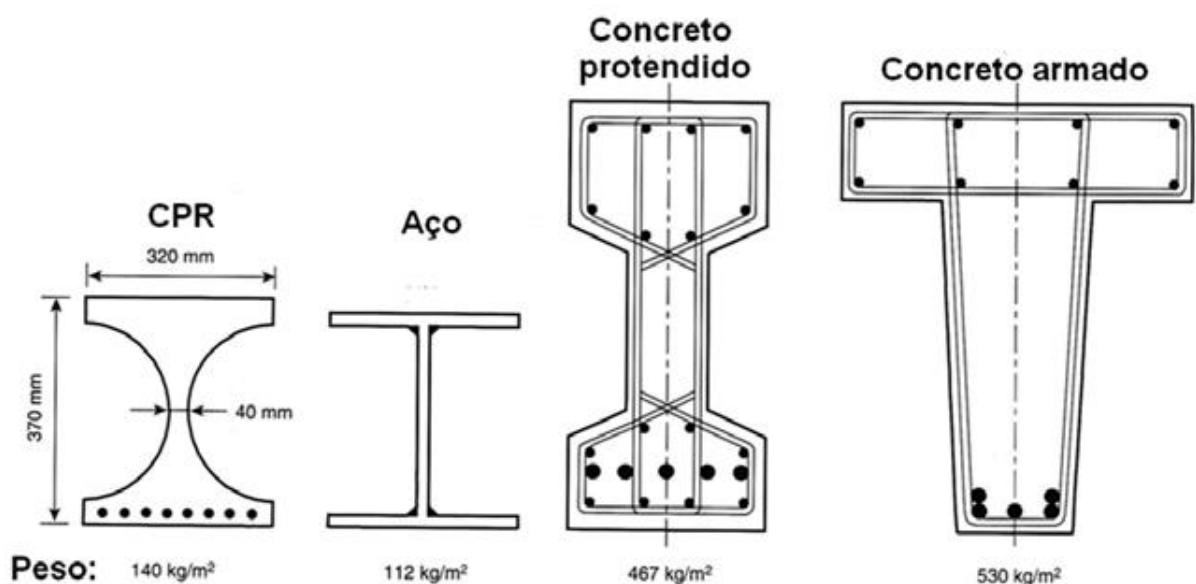
Racky (2004, p. 801) ainda aponta outros benefícios:

- diminuição do uso de concreto;
- quantidades menores armadura;
- menor área de formas.

O que, consequentemente, leva à uma otimização do tempo de construção, ou seja, diminuição do custo e dos prazos de entrega da obra.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) afirma que estruturas feitas com o CUAD do tipo CPR são capazes de atingir dimensões e valores de resistência semelhantes ao do aço, porém com menor custo, maior esbeltez e durabilidade. A Figura 3 mostra as quatro seções com a mesma capacidade portante, onde é possível ver que as dimensões e o peso específico da estrutura feita com CPR é bem próximo do aço.

Figura 3 – Comparação entre seções de diferentes materiais com a mesma capacidade portante.



Fonte: Walraven (2000 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011, p. 1320)

Racky (2004, p. 803) ainda aponta uma economia a longo prazo, que inclui a manutenção, reparo e demolição da construção, já que o custo do ciclo de vida do empreendimento não se encerra na construção, mas continua por toda sua vida útil.

E não só construções novas se beneficiam do desempenho do CUAD: Piotrowski e Schmidt (2012) demonstram que, apesar do investimento inicial ser maior ao se optar por uma solução em CUAD, seu uso para recuperar estruturalmente uma ponte causa uma economia em custos de manutenção em comparação com a mesma solução em concreto convencional.

6.5 CUAD no mundo

Muitas construções já foram feitas com CUAD em diversos países. O Canadá, pioneiro na utilização do material ainda em 1997, possui mais de 26 construções, entre pontes, passarelas e viadutos (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013). A Tabela 3 lista algumas construções feitas em CUAD ao redor do mundo.

Tabela 3 – Exemplos de aplicações de CUAD ao redor do mundo.

Estruturas/aplicações	Local	Ano	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)
Passarela Sherbrooke	Sherbrooke, Canadá	1997	200	40
Silo de clínquer Joppa	Illinois, EUA	2001	220	50
Passarela Seonyu	Seul, Coréia do Sul	2002	180	32
Passarela Sakata Mirai	Sakata, Japão	2002	238	40
Pedágio no Millau Viaduct	Rodovia A75, França	2002	165	30
Ponte da angra Sheperds	Sydney, Austrália	2005	180	-
Painéis resistentes a explosão	Melbourne, Australia	2005	160	30
Passarela Papatoetoe	Auckland, Nova Zelândia	2006	160	30
Ponte Glenmore/Legsby	Calgary, Canadá	2007	-	-
Ponte Gaertnerplatz	Kassel, Alemanha	2007	150	35
Ponte Jakway Park	Iowa, EUA	2008	150	-
Fundações de turbina eólica	Dinamarca	2008	210	24
Lajes do Aeroporto de Haneda	Tóquio, Japão	2010	210	45
Ponte Whiteman Creek	Brantford, Canadá	2011	140	30
Canos de esgoto	Alemanha	2012	151	-
Colunas do tipo "spun"	Alemanha	2012	179	-
Passarela de treliças de CUAD	Espanha	2012	150	-

Fonte: Abbas, Nehdi e Saleem (2016, p. 273.).

Segundo Russel e Graybeal (2013), a Alemanha iniciou, em 2005, um programa com 34 projetos de pesquisa divididos entre 20 instituições, de modo a desenvolver a base necessária para os estudos técnicos sobre CUAD e torná-lo “um produto confiável, disponível rotineiramente, economicamente acessível e regularmente aplicado”.

Desde a publicação das recomendações para usar CUAD em estruturas na França (AFGC, 2013), em 2002 (revisada em 2013), muitas pontes já foram executadas. O Japão (JSCE, 2006)

também publicou um conjunto similar de recomendações em 2006 (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013).

A Coréia do Sul está pesquisando o uso de CUAD em pontes estaiadas, mostrando que esse material ganha cada vez mais atenção internacional (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013).

Resplendino (2011) lista os principais concretos de ultra alto desempenho disponíveis no mercado:

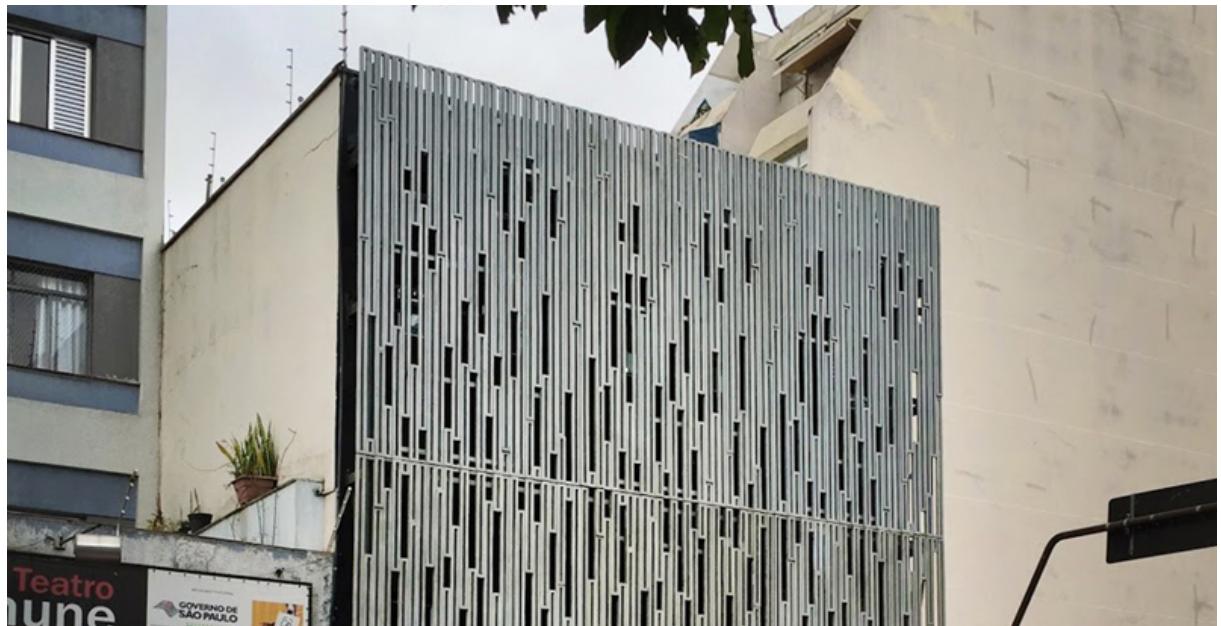
- Ductal®, marca comercial do CPR, comercializado pela Lafarge (França);
- BSI/CERACEM®, desenvolvido pelo grupo EIFFAGE SIKA (França);
- BCV®, desenvolvido pelo grupo Vicat (França);
- CEMTECmultiscale®, desenvolvido pela LCPC (França);
- Materiais laboratoriais desenvolvidos pela EDF (*Électricité de France*, companhia elétrica francesa), do CERIB (*Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton*, em português: Centro de Estudos e Pesquisas da Indústria do Concreto) (França);
- CRC, sob a marca comercial Densit®, desenvolvido pela Aalborg Portland Cement (Dinamarca);

Ainda existe o COR-TUF® (DURST et al., 2010), desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center* (em português, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Engenharia do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), o qual ainda procura parceiros comerciais para licenciar e comercializar o COR-TUF®. Outro CUAD que pode ser encontrado no mercado é o DURA® (LEI, 2010), produzido por uma empresa de mesmo nome, na Malásia.

6.6 CUAD no Brasil

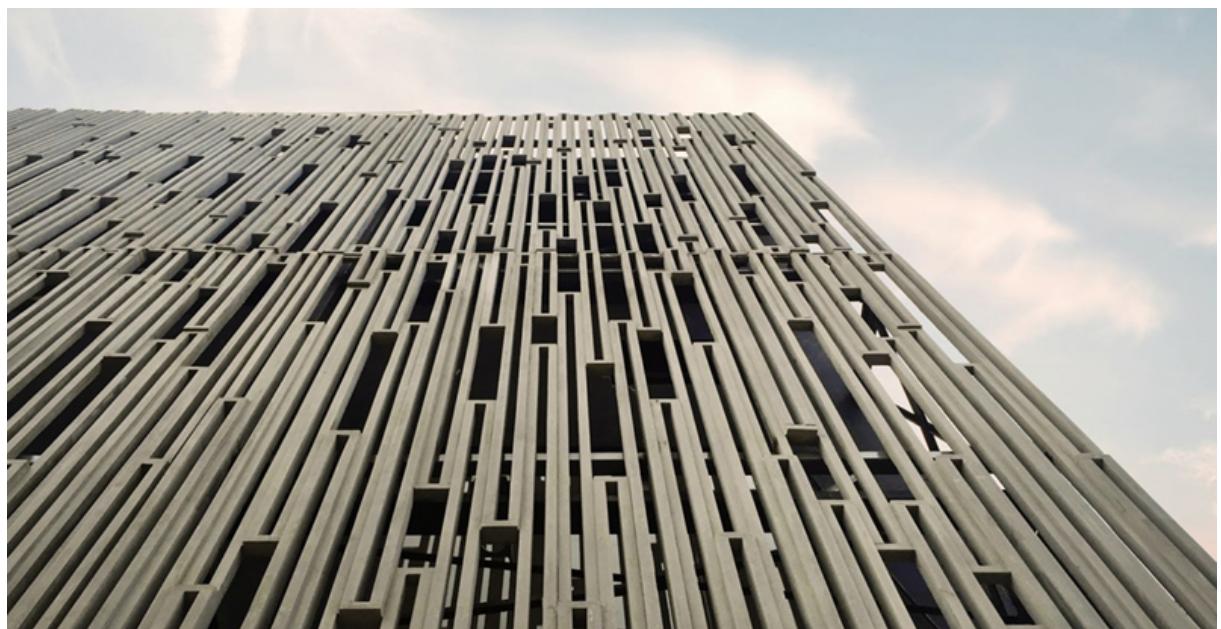
No Brasil, já é possível encontrar o Ductal® na fachada de dois edifícios na cidade de São Paulo: no edifício do Escritório de Representação do Ministério das Relações Exteriores (Figura 4 e Figura 5) e na fachada da Japan House (Figura 6 e Figura 7).

Figura 4 – Fachada executada com o CUAD Edifício do Escritório de Representação do Ministério das Relações Exteriores, na Rua da Consolação, São Paulo – SP.



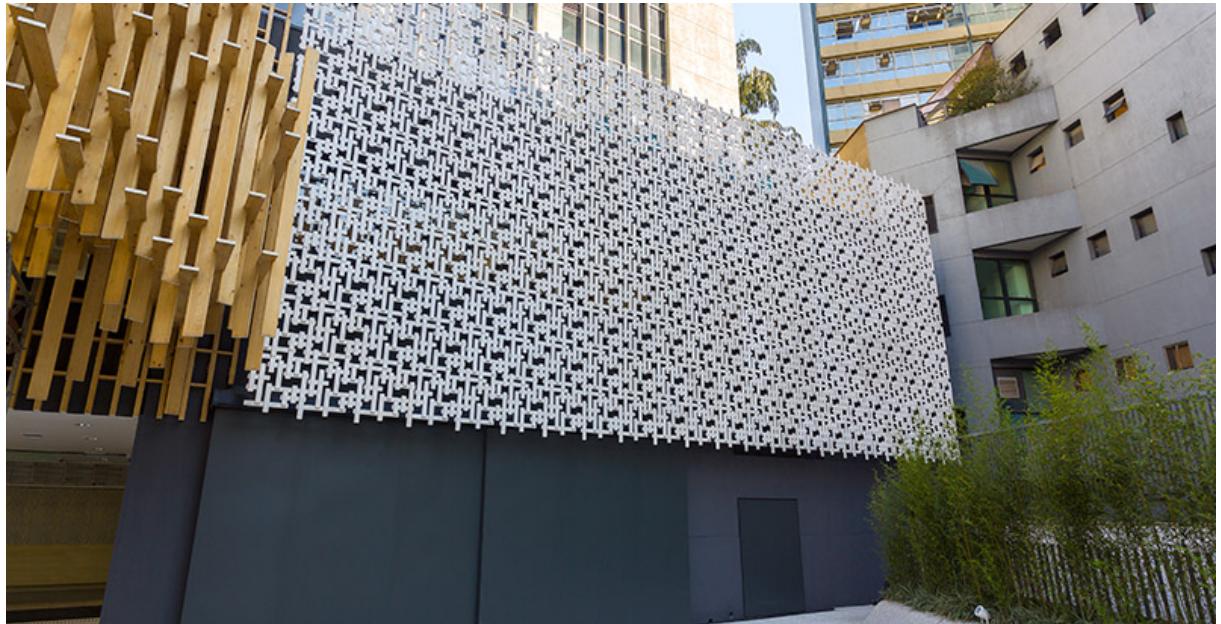
Fonte: Stone pré-fabricados arquitetônicos Ltda. (2017).

Figura 5 – Detalhe da fachada do mesmo edifício da Figura 4.



Fonte: Stone pré-fabricados arquitetônicos Ltda. (2017).

Figura 6 – Fachada executada com CUAD. Japan House, na Avenida Paulista, São Paulo - SP.



Fonte: Stone pré-fabricados arquitetônicos Ltda. (2017).

Figura 7 – Detalhe da mesma fachada da Figura 6



Fonte: Stone pré-fabricados arquitetônicos Ltda. (2017).

7 PROJETOS EM CUAD

Para elaborar projetos com concreto de ultra alto desempenho, é imprescindível ter em mente que as características inerentes do material possibilitam a exploração de novos métodos e geometrias de construção que otimizem e justifiquem seu uso em detrimento dos métodos tradicionais de construção. Apesar disso, com exceção da passarela de Sherbrooke (subseção 7.2.1), nenhuma das estruturas feitas com CUAD possuem um projeto topológico drasticamente diferente do utilizado em estruturas de concreto convencional (FLINT; GRÜNEWAL; COENDERS, 2011, p. 603).

A computação já inspira arquitetos e engenheiros a desenvolverem soluções de arquitetura e engenharia inovadoras, e o CUAD permite a aplicação desses projetos com muito mais facilidade que o aço, possuindo um desempenho muito próximo, mas com uma grande vantagem: a indústria do aço é muito refinada, e seu processo de produção consome muito mais energia e emite muito mais gases poluentes que a indústria do concreto. Outra vantagem que o CUAD leva sobre o aço é a durabilidade, já que sem um tratamento especial e manutenção cuidadosa, o aço se deteriora rapidamente. Por último, oferece um grande desempenho para estruturas comparativamente leves, não sendo um material exótico como fibra de carbono, por exemplo (DAVILA, 2007, p. 11).

Atualmente, o CUAD encontra-se em uma fase experimental de adoção, pois ainda não existe um manual que apresente ao engenheiro de estruturas que critérios e elementos são necessários para projeto, além de exemplos claros de implementação. As informações ainda encontram-se espalhadas e os projetos existentes ainda exigem uma análise cuidadosa, caso a caso, o que muita vezes faz com que o responsável pelo projeto adote soluções mais conservadoras, sub-utilizando a capacidade do material. Ainda é preciso um grande trabalho de pesquisa e divulgação do CUAD para que isso seja produzido para o grande público (DAVILA, 2007, p. 13).

Mesmo que o CUAD permita a construção de estruturas mais leves e esbeltas, é preciso ter cuidado com a geometria escolhida, além do cuidado com a deformação da peça, já que o seu módulo de elasticidade é apenas duas vezes maior que o do concreto convencional.

As próximas seções mostram os cuidados necessários para trabalhar com o CUAD e alguns exemplos de obras executadas em CUAD, das primeiras às mais recentes.

7.1 Métodos construtivos para CUAD

Para se atingir as altas resistências desejadas no CUAD, é imprescindível um rigoroso controle tecnológico dos materiais utilizados na fabricação do CUAD. A adição de fibras

em grandes volumes de concreto é por si só problemática, pois não é possível controlar sua distribuição na mistura e sua correta dispersão é altamente desejável para que elas trabalhem a favor da resistência do concreto, e não se acumulem em apenas um local.

A mistura dos materiais pode ser feita de diversas formas, desde que se observe com cuidado a distribuição das fibras. O próximo passo, crucial para que as resistências desejadas sejam atingidas é a cura do concreto, que deve ser feita em ambiente saturado de vapor e, preferencialmente, sob pressão (cura em autoclave), pois isso irá melhorar ainda mais a resistência do CUAD.

Este processo só pode ser controlado corretamente em um ambiente industrializado, de modo que não se recomenda a utilização de CUAD moldado *in loco*, por conta da dificuldade do controle tecnológico do concreto em um ambiente aberto.

7.2 Aplicações

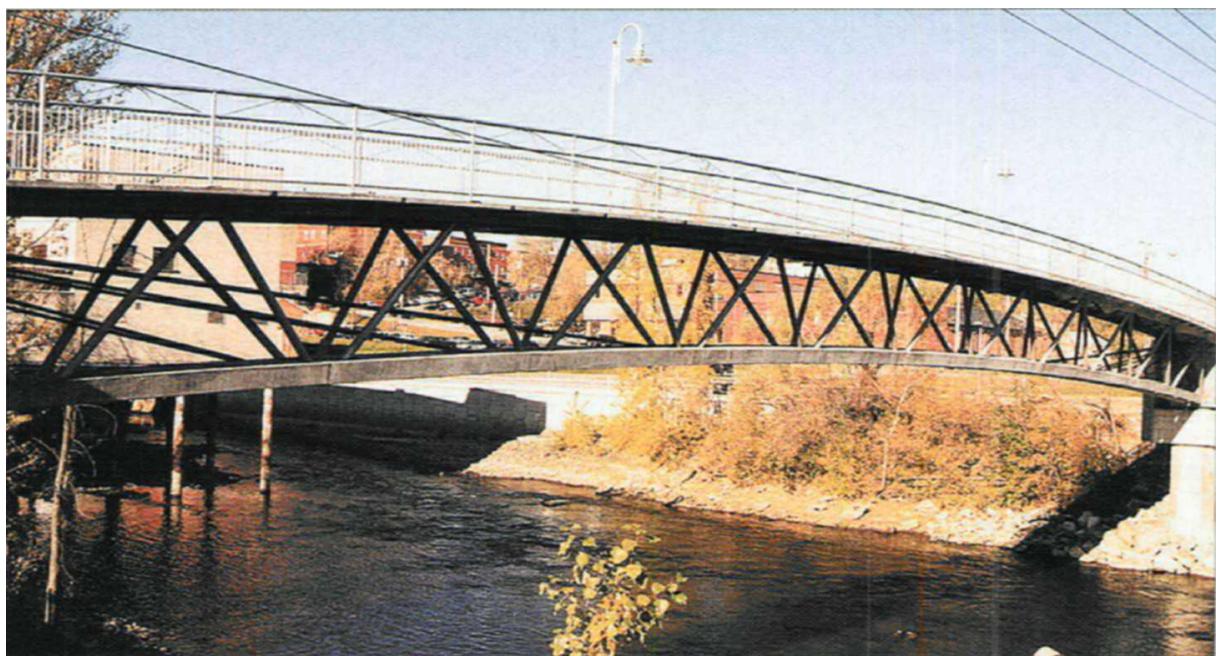
7.2.1 Passarela de Sherbrooke, Canadá

A passarela de Sherbrooke (Figura 8), construída sobre o rio Magog, na cidade de Quebec, Canadá, foi a primeira estrutura construída inteiramente com concreto de pós reativos (CPR), uma variedade de concreto de ultra alto desempenho (CUAD), sem a utilização de barras de aço. Sua superestrutura consiste de treliças de CPR com uma resistência característica de 200 MPa confinadas em tubos de aço inoxidável sobre um vão de 60 metros (AÏTCIN et al., 1998, p. 140).

As partículas utilizadas no CPR utilizado para construir a passarela foram limitadas a 0,8 mm. Sua mistura consiste em cimento Portland, fumo de sílica, pó de quartzo, areia, superplastificante, água e fibras de aço com resistência de 2600 MPa, 0,2 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento. A mistura foi confinada em tubos de aço inoxidável de 150 mm de diâmetro e espessura de 2 mm. Este confinamento serve para transformar a ruptura frágil apresentada pelo CUAD em uma ruptura pseudo-dúctil, além de melhorar ainda mais suas propriedades mecânicas, incluindo a capacidade de suportar uma solicitação de compressão de 350 MPa Aïtcin et al. (1998, p. 141). A Tabela 4 mostra o traço de CPR utilizado na passarela de Sherbrooke. Já a Figura 9 mostra as curvas de tensão-deformação compressivas para diferentes tipos de concretos testados na época da construção da ponte. No gráfico, é possível observar um considerável aumento na resistência à compressão de um mesmo CPR em três condições distintas (livre, confinado e confinado e comprimido). A curva de tensão-deformação do CAD aparece apenas para se fazer um comparativo.

Para o projeto da passarela, foram feitas as seguintes considerações: resistência à compressão de 180 MPa, resistência à tração direta de 7 MPa, resistência à flexão de 40 MPa e módulo de elasticidade de 50 GPa. Através de um processo rigoroso de produção introduzido

Figura 8 – Passarela de Sherbrooke, Quebec, Canadá. Construída em CPR (concreto de pós reativos) sem o uso de barras de aço.



Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 140).

Tabela 4 – Dosagem do CPR
usado na passarela
de Sherbrooke.

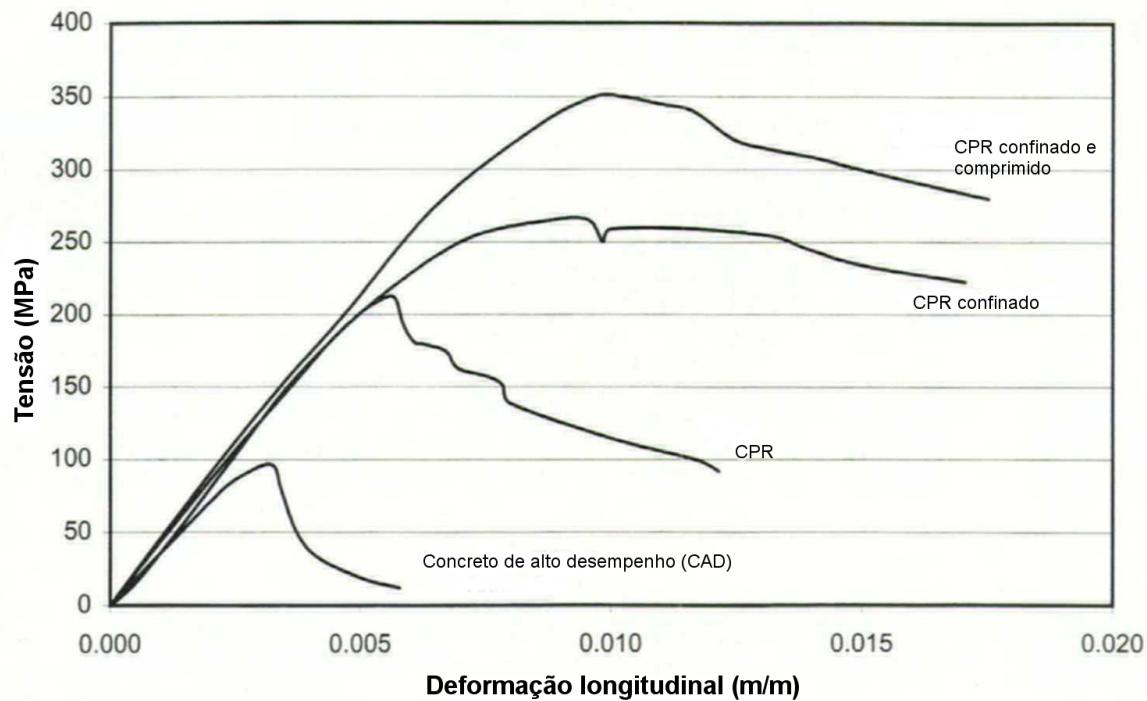
Material	Quantidade
Cimento	705 kg/m ³
Fumo de sílica	230 kg/m ³
Pó de quartzo	210 kg/m ³
Areia	1010 kg/m ³
Superplasticificante	37,5 l/m ³
Fibras de aço	190 kg/m ³
Água (a/c = 0,21)	195 l/m ³

Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 141).

na fábrica de pré-moldados onde a passarela foi moldada, compressão do CPR ainda fresco e cura térmica a vapor, a uma temperatura de 90 ° C, o material foi capaz de atingir uma resistência média de 200 MPa, aferida em corpos de prova recolhidos em diferentes lotes de produção de CPR (AÏTCIN et al., 1998, p. 141).

A passarela possui um tabuleiro de 30 mm de espessura, protendido transversalmente e longitudinalmente e não possui reforço passivo de aço. Por motivos de segurança, o potencial

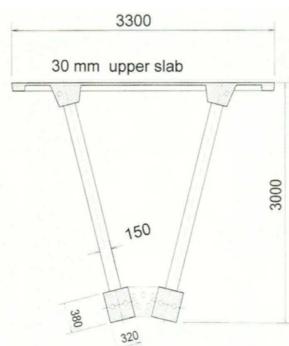
Figura 9 – Curvas de tensão-deformação compressivas para diferentes concretos.



Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 141).

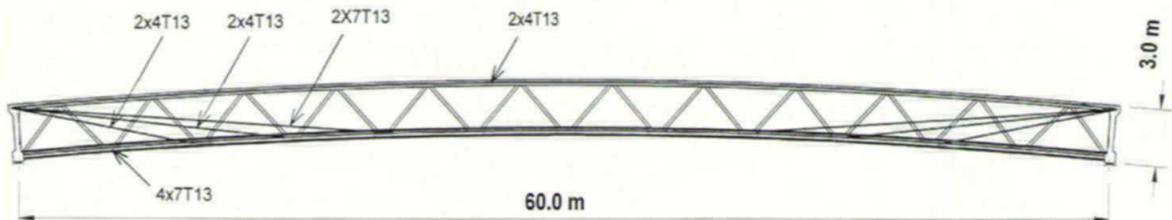
do material não foi explorado completamente, já que esta foi a primeira experiência de uso do material em uma obra aberta ao público (AÏTCIN et al., 1998, p. 141). A seção transversal e longitudinal pode ser vista na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente. A Figura 12 mostra um segmento pré-moldado finalizado da ponte, ainda na fábrica.

Figura 10 – Corte transversal da passarela de Sherbrooke.



Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 141).

Figura 11 – Elevação da passarela de Sherbrooke mostrando a protensão longitudinal.



Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 142).

Figura 12 – Segmento pré-moldado finalizado da passarela.



Fonte: Aïtcin et al. (1998, p. 142).

7.2.2 Passarela sobre a ravina de Ovejas, Espanha

A passarela sobre a ravina de Ovejas, província de Alicante, Espanha é uma passarela de 45 metros (Figura 13 e Figura 14), protendida, feita com treliças do tipo Warren de CUAD (Figura 15 e Figura 16). Foi a primeira passarela feita completamente com treliças de CUAD. A espessura do tabuleiro é de apenas 3 cm e a resistência do concreto é de 150 MPa. A Figura 17 e

a Figura 18 mostram a configuração da passarela com mais detalhes.

Figura 13 – Passarela sobre a ravina de Ovejas, Província de Alicante, Espanha.



Fonte: Research and Development Concretes (2014)

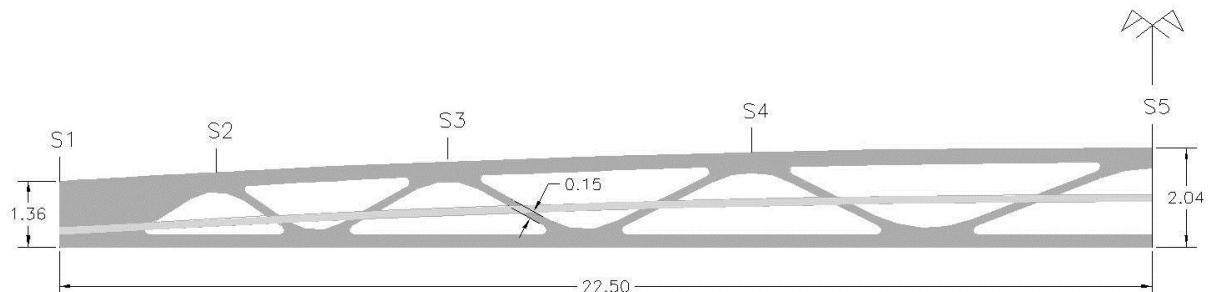
A passarela foi moldada na fábrica e transportada por inteiro para sua locação final. O estudo do carregamento da estrutura foi feito com o software SAP2000, considerando as ações especificadas na Tabela 5. O traço de concreto utilizado é mostrado na Tabela 6.

Figura 14 – Representação gráfica da passarela de Ovejas.



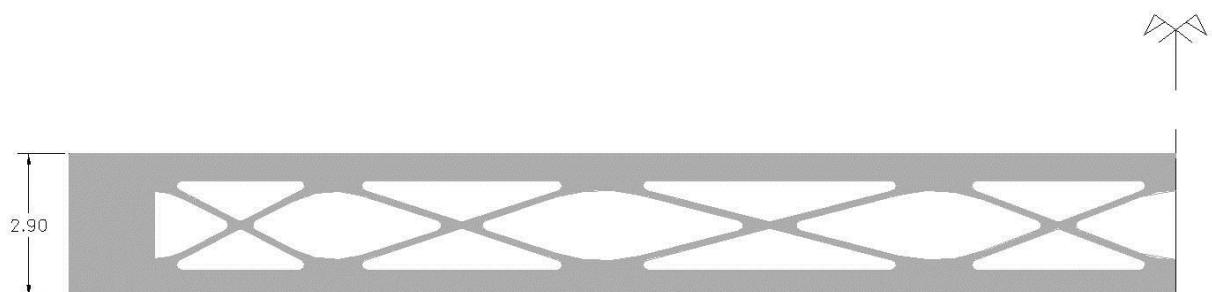
Fonte: López et al. (2012)

Figura 15 – Vista longitudinal da passarela.



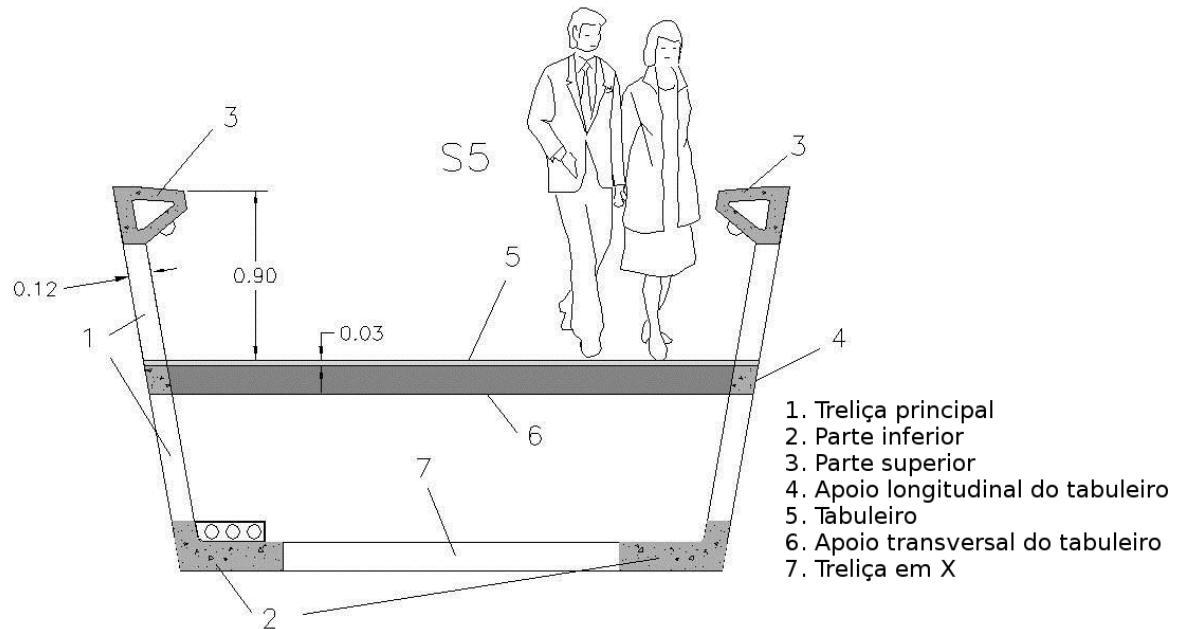
Fonte: López et al. (2012)

Figura 16 – Treliças abaixo do tabuleiro.



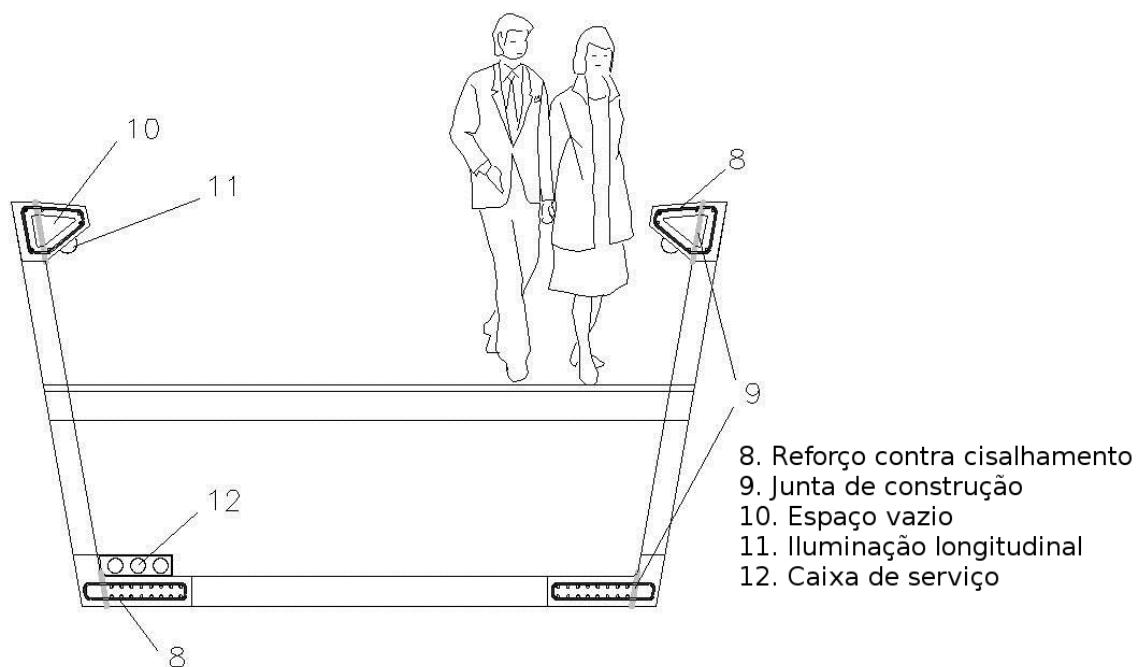
Fonte: López et al. (2012)

Figura 17 – Corte transversal da passarela com detalhamento.



Fonte: López et al. (2012)

Figura 18 – Corte transversal da passarela com detalhamento.



Fonte: López et al. (2012)

Tabela 5 – Ações consideradas no projeto da passarela.

Propriedade	Valor
Peso próprio	4,3 kN/m ²
Carregamento dinâmico característico	5,0 kN/m ²
Carregamento dinâmico frequente	2,0 kN/m ²
Deformação vertical sob carregamento frequente	3,6 cm
Velocidade básica do vento	18 m/s
Temperatura mais alta	34,2°C
Temperatura mais baixa	11,5°C
Aceleração sísmica máxima horizontal/vertical	3,44/2,41 m/s ²

Fonte: López et al. (2012, p. 899).

Tabela 6 – Traço do CUAD utilizado.

Material	Quantidade (kg/m ³)
Cimento (a/c = 0,213)	1000
Fumo de sílica	150
Areia 0,5 mm	702
Areia 1,8 mm	380
Água	213
Superplasticificante ¹	9,06
Fibras OL13/0.16 ²	78,1
Fibres RC80/40 BP ²	78,1

Fonte: López et al. (2012, p. 899).

Nota: ¹⁾ Fração sólida de superplasticificante;

Nota: ²⁾ 1% em volume de cada fibra de Bekaert.

7.2.3 Ponte Jakway Park

Buchanan, no estado de Iowa, EUA é um município predominantemente rural. Keierleber (2017) mostra que as pontes da cidade são muito antigas (muitas construídas entre 1870-1914) e já não são capazes de atender a demanda de veículos atuais. A Figura 19 e a Figura 20 retratam acidentes ocorridos no município devido a esta deficiência.

Como parte de um programa de pesquisa e financiamento através de um programa de construção de pontes inovadoras do governo dos EUA, o município decidiu trocar a velha ponte Jakway Park por uma ponte de CUAD seção π , desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e pelo Laboratório Turner-Fairbank da Administração Federal de Rodovias (FHWA) (KEIERLEBER; BIERWAGEN; WIPF, 2010).

Figura 19 – Acidente em ponte de madeira em Buchanan.



Fonte: Keierleber (2017)

7.2.3.1 Tabuleiro integral de seção π

O desenvolvimento da seção π começou a ser desenvolvido em 2003 no MIT. O projeto foi otimizado para aproveitar a superior resistência do CUAD para tensão, cisalhamento e compressão, usando a mínima área possível no corte transversal. A primeira geração da seção π (Figura 21) falhou nos testes de carregamento, levando os pesquisadores a iterar o projeto

Figura 20 – Acidente em Buchanan.



Fonte: Keierleber (2017)

(ROUSE et al., 2011, p. 4). Entre os problemas encontrados, essa geração oferecia um tabuleiro de baixa rigidez, um preocupante comportamento de fissuração com cargas de serviço e problemas na distribuição da carga lateral entre as vigas adjacentes (GRAYBEAL, 2009 apud ROUSE et al., 2011, p. 1).

A segunda geração da seção π (Figura 22) resolveu os problemas da primeira, sem mudar drasticamente seu desenho, até por questões de economia e reaproveitamento das formas. Com o auxílio do Centro de Engenharia de Pontes (BEC¹) da Universidade do Estado de Iowa (ISU²), foi criado um modelo de elementos finitos em 3D no programa ANSYS (Figura 23). Diversos modelos foram analisados para atender às mudanças necessárias e chegar ao desenho final da nova seção π .

Na parte inferior das vigas foi instalado um diafragma metálico, adicionando algum grau de restrição rotacional global no fim das vigas (ROUSE et al., 2011, p. 7). Cada seção tem uma área de 0,555 m² e um peso próprio de 13,63 kN/m (ROUSE et al., 2011, p. 8).

Para o dimensionamento das seções que foram utilizadas na construção, limitou-se a resistência a compressão a 148 MPa, por conta do método utilizado para misturar o concreto, o qual foi feito diretamente dentro do caminhão betoneira. Houve o temor que as fibras não se espalhassem da maneira correta, por isso ocorreu essa limitação (ROUSE et al., 2011, p. 8). A Tabela 7 lista os dados levados em consideração para o projeto da ponte.

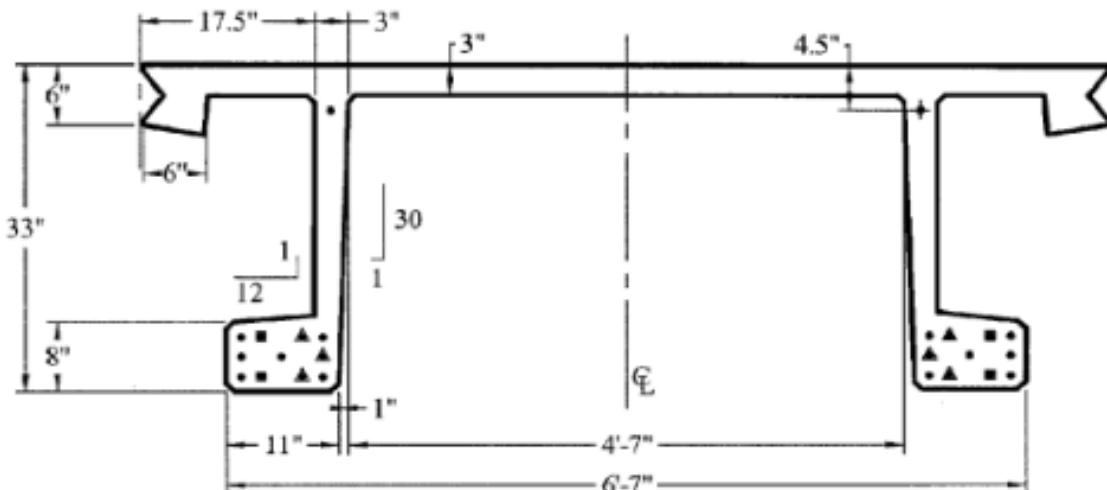
¹ Bridge Engineering Center

² Iowa State University

Tabela 7 – Valores de projeto das propriedades materiais do CUAD.

Propriedade	Valor (MPa)
Módulo de elasticidade à liberação	39,990
Módulo de elasticidade final	53,780
Resistência de compressão nominal à liberação	86
Resistência de compressão nominal final	148
Resistência nominal à tração final	8,3
Perda de protensão permitida no escoamento	51,7 (60% de 86,16 MPa)
Perda de protensão permitida no serviço	89 (60% de 148,33 MPa)
Tensão de tração permitida no serviço	5,8 (70% de 8,30 MPa)

Fonte: Rouse et al. (2011, p. 10).

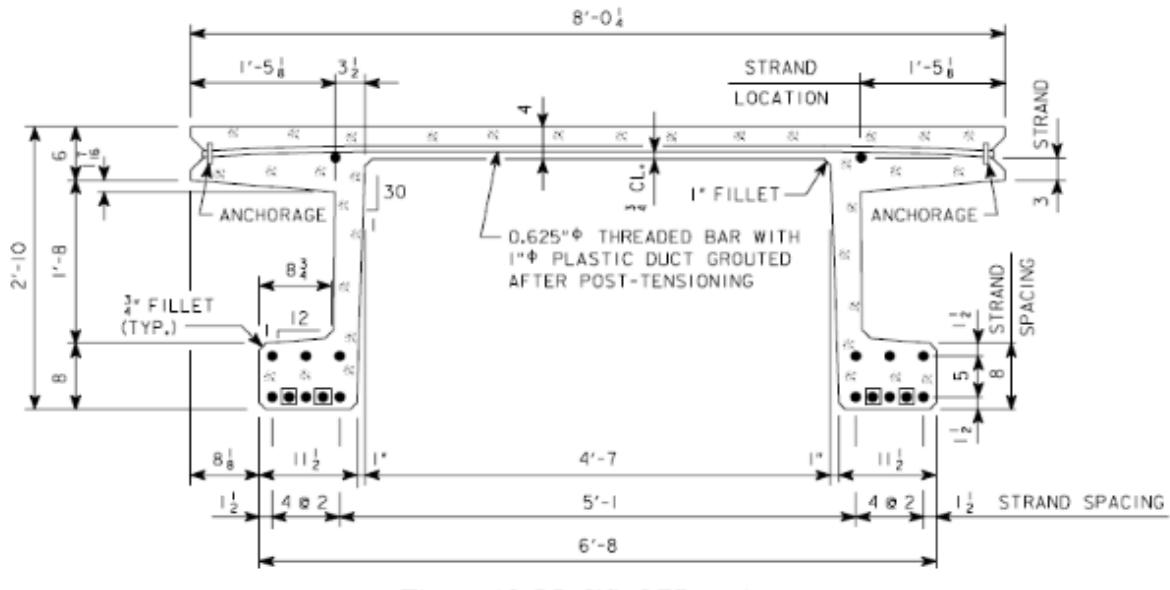
Figura 21 – Primeira geração da seção π .

Fonte: Keierleber et al. (2007, p. 5)

7.2.3.2 Construção

A fornecedora do CUAD utilizado na obra (Lafarge) vende a mistura pronta do concreto. Para fazer o concreto, foi utilizado um caminhão betoneira, misturando o material cimentício, gelo e superplastificantes. Após a homegeinização do concreto, foram adicionadas as fibras de aço com uma peneira, afim de evitar seu agrupamento. Seguiu-se a transferência do CUAD para as formas Figura 24 e cura térmica a vapor a 90 °C por 48 horas (Figura 25) (ROUSE et al., 2011, p. 17).

Em seguida, as peças foram transportadas para o local da construção. As seções adjacentes foram conectadas com barras de 25 mm, posicionadas a cada 45,7 cm e grauteadas

Figura 22 – Segunda geração da seção π .

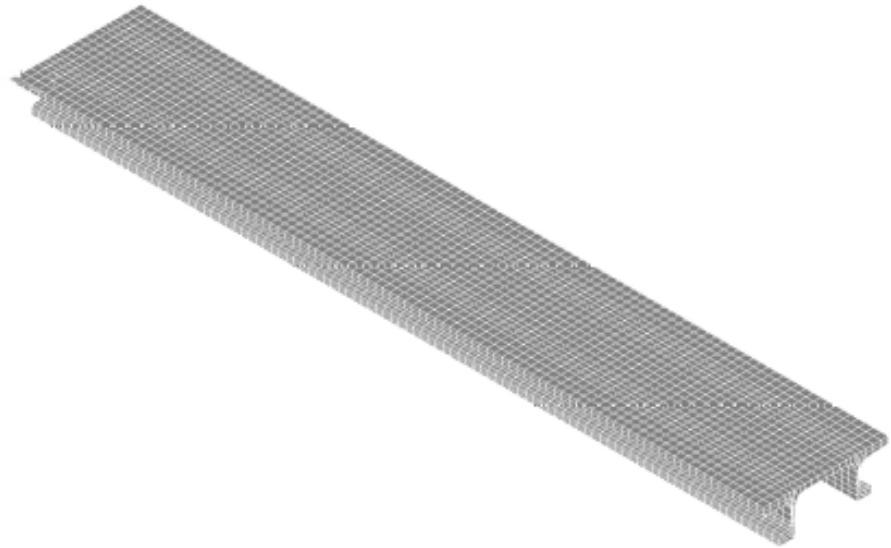
Fonte: Keierleber et al. (2007, p. 10)

(Figura 26, Figura 27 e Figura 28). Para a protensão, foram utilizados 22 cabos de 15 mm de diâmetro (Figura 29). Desses, 18 foram colocados no bulbo na base das vigas, e tensionados a uma força de 3407 kN. Os outros 4 foram colocados no tabuleiro e tensionados a 756 kN. Difragmas metálicos foram instalados na parte inferior das vigas (Figura 30 e Figura 31).

Barras de 15 mm foram posicionadas na parte de baixo do tabuleiro, como reforço de flexão transversal. A instalação foi feita com o auxílio de gruas (Figura 32).

A ponte Jakway Park (Figura 33) foi construída num intervalo de 52 dias, sendo inaugurada no dia 26 de novembro de 2008.

Figura 23 – Modelo da seção π no ANSYS.



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 6)

Figura 24 – Moldagem da seção π .



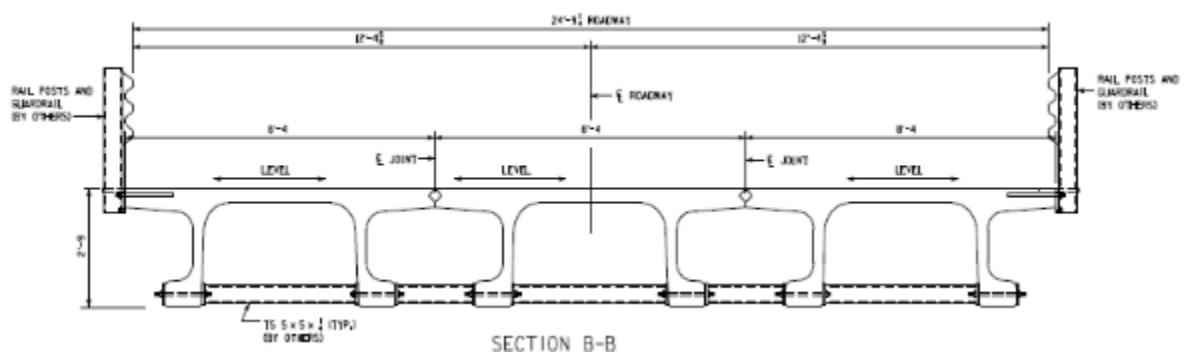
Fonte: Rouse et al. (2011, p. 17)

Figura 25 – Cura térmica a vapor.



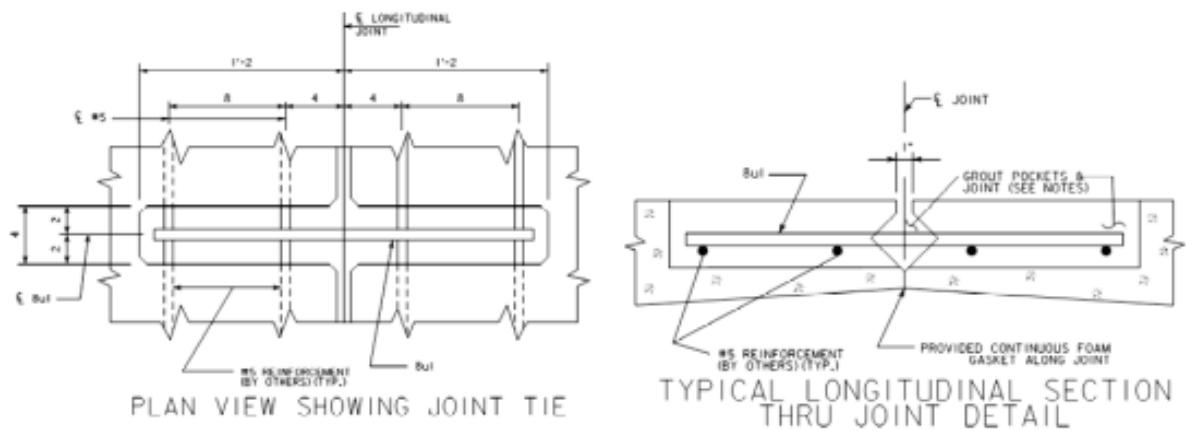
Fonte: Rouse et al. (2011, p. 18)

Figura 26 – Vista em corte.



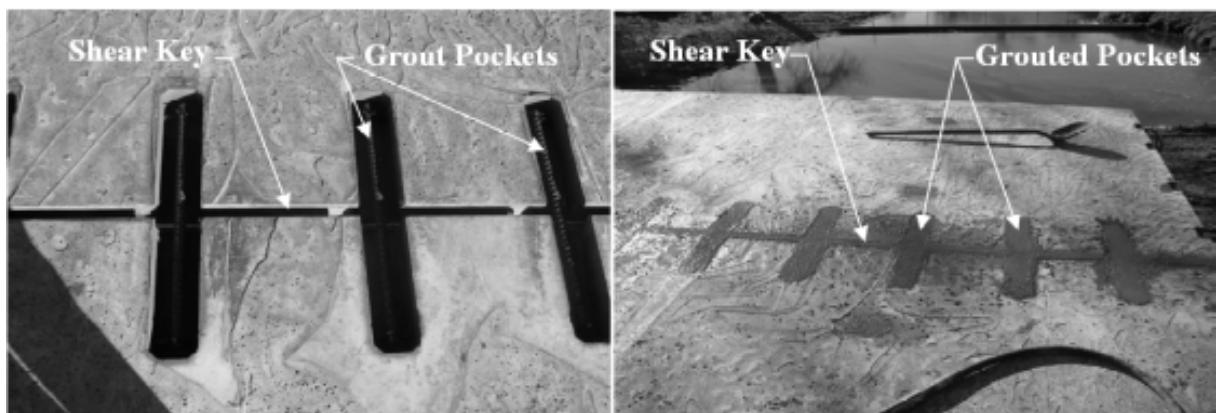
Fonte: Keierbeler (2008 apud ROUSE et al., 2011, p. 16)

Figura 27 – Detalhamento das juntas longitudinais da seção π .



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 15)

Figura 28 – Grauteamento das juntas longitudinais.



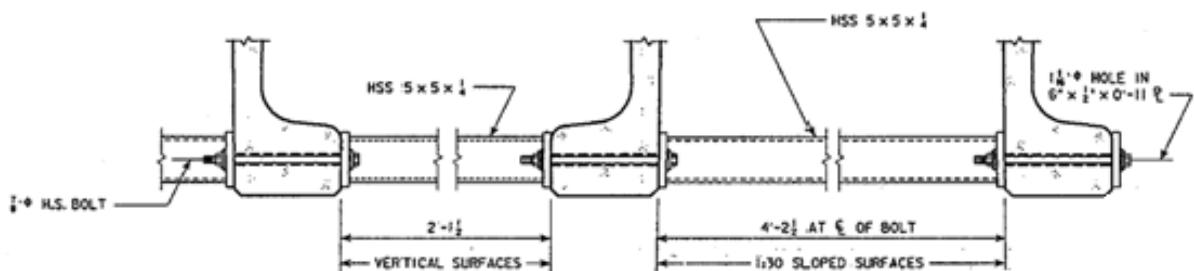
Fonte: Rouse et al. (2011, p. 15)

Figura 29 – Detalhe da protensão.



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 16)

Figura 30 – Detalhamento do diafragma.



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 14)

Figura 31 – Diafragma instalado entre as vigas de uma mesma seção e entre as vigas de seções adjacentes.



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 14)

Figura 32 – Instalação dos elementos estruturais.



Fonte: Rouse et al. (2011, p. 18)

Figura 33 – Ponte Jakway Park. Apenas o trecho do vão central é feito de CUAD.



Fonte: Keierleber (2017)

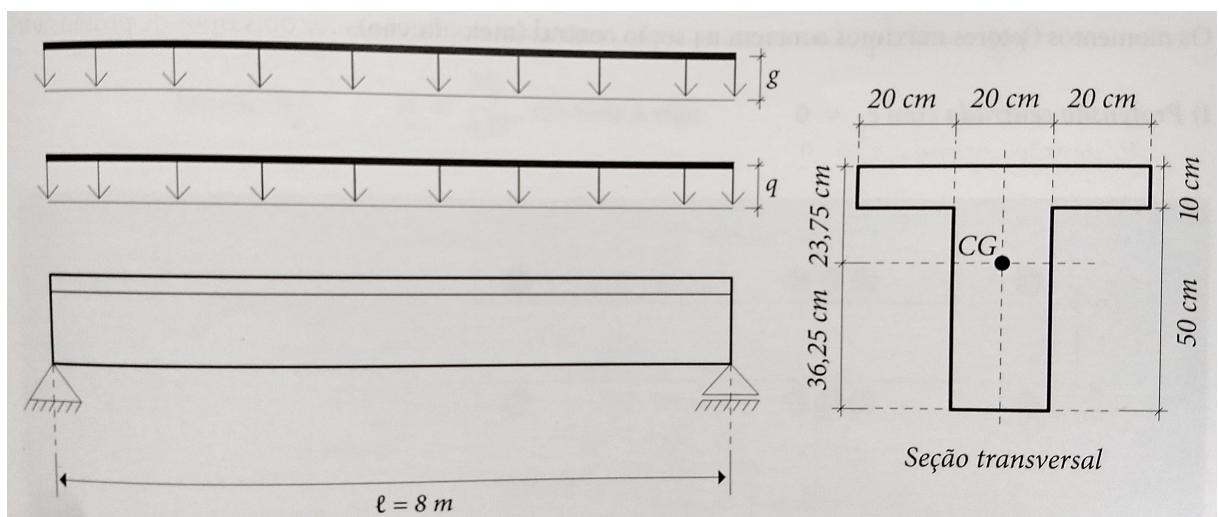
8 ESBELTEZ DE UMA VIGA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO

Diante das vantagens apresentadas pelo CUAD como solução construtiva, será feita uma análise comparativa acerca da força de protensão necessária para se aplicar em uma viga, a resistência característica do concreto e a área da seção transversal da viga. O objetivo será analisar a economia de material e o vão que poderá ser vencido. Não serão feitas verificações de estado limite último, estado limite de serviço e fissuração. A viga utilizada neste trabalho se baseia no exemplo publicado por Cholfe e Bonilha (2015, p. 37).

8.1 Características

Neste trabalho, será analisada uma viga de seção T com as características mostradas na Figura 34.

Figura 34 – Detalhes da viga de seção utilizada no estudo de caso.



Fonte: Cholfe e Bonilha (2015, p. 37).

O valor da força de protensão será dimensionado considerando o cabo reto e a excentricidade da protensão (e_p) igual a zero.

8.2 Condições de cálculo

O cálculo das características geométricas da seção, esforços solicitantes e tensões normais foram feitas com o programa de código aberto Scilab. O algoritmo utilizado pode ser visto no Apêndice A. As condições limites utilizadas são:

- a) Não serão permitidas tensões de tração;
- b) Compressão máxima no concreto: $0,6 \cdot f_{ck}$.

A viga estará submetida às seguintes ações:

- a) Ação permanente (g): 15 kN/m;
- b) Ação variável (q): 12 kN/m.

O cálculo das características geométricas da seção da viga é efetuado pelo programa a partir da entrada de sua altura e largura. É importante notar que o programa desenvolvido para este estudo de caso pode efetuar os cálculos utilizando seções retangulares ou seções T (no caso das seções retangulares, basta que a largura e a espessura da mesa da viga sejam iguais a zero). São calculados apenas os esforços solicitantes característicos (momentos máximos e normal de protensão). O momento máximo permanente ($M_{g,max}$) e variável ($M_{q,max}$) é calculado conforme a Equação 8.1.

$$M_{max} = c \cdot \frac{l^2}{8} \quad (8.1)$$

Onde:

- c = ação - permanente ou variável (kN/m);
- l = vão teórico (m).

A tensão permanente ($\sigma_{c,g,sup}$) e variável ($\sigma_{c,q,sup}$) na borda superior da viga é calculada conforme a Equação 8.2 e a tensão permanente ($\sigma_{c,g,inf}$) e variável ($\sigma_{c,q,inf}$) na borda inferior da viga é calculada conforme a Equação 8.3.

$$\sigma_{c,sup} = \frac{M_{max}}{W_{sup}} \quad (8.2)$$

Onde:

- M_{max} = momento máximo (kNm);
- W_{sup} = módulo de resistência à compressão superior.

$$\sigma_{c,inf} = \frac{M_{max}}{W_{inf}} \quad (8.3)$$

Onde:

- M_{\max} = momento máximo kNm;
- W_{\inf} = módulo de resistência à compressão inferior.

Por convenção, as tensões na borda superior são **negativas** e as tensões na borda inferior são **positivas**.

A força normal de protensão é calculada conforme a Equação 8.4.

$$N_p = -\sigma_{c,g,\inf} - \sigma_{c,q,\inf} \quad (8.4)$$

Onde:

- $\sigma_{c,g,\inf}$ = tensão permanente na borda inferior;
- $\sigma_{c,q,\inf}$ = tensão variável na borda inferior.

$$\sigma_{c,min,sup} = N_p + \sigma_{c,g,sup} + \sigma_{c,q,sup} \quad (8.5)$$

Onde:

- N_p = normal de protensão;
- $\sigma_{c,g,sup}$ = tensão permanente na borda superior;
- $\sigma_{c,q,sup}$ = tensão variável na borda superior.

Após calcular estes parâmetros, o programa faz duas verificações antes de prosseguir com a execução: avalia se a tensão na fibra superior e a força normal de protensão são menores que a compressão máxima permitida ($0,6 \cdot f_{ck}$). A tensão na fibra superior é calculada conforme a Equação 8.5.

A partir deste ponto, o programa passa a fazer iterações, aumentando o valor do vão teórico de 0,5 m em 0,5 m, até que a protensão aplicada na viga seja pelo menos igual ou maior que 90% da compressão máxima permitida. Na segunda parte do estudo de caso, a partir de um vão teórico fixo e uma seção transversal inicial, são feitas algumas iterações, em que, no começo de cada iteração, a seção transversal da viga é aumentada em 5%. O resultado é mostrado quando atinge-se uma seção transversal em que a viga atende aos critérios estabelecidos (tensão na fibra superior e força normal de protensão menores que a compressão máxima permitida).

8.3 Aplicação

Com os parâmetros de entrada no algoritmo já definidos, foi gerada a Tabela 8, onde pode se observar o crescimento do vão teórico que a viga pode vencer ao se aumentar o f_{ck} do concreto e a força de protensão aplicada, ainda atendendo as condições limite definidas e sem

alterar a sua seção transversal. O gráfico da Figura 35 mostra a relação entre o aumento do f_{ck} e o vão que uma mesma viga pode vencer.

É importante notar que a rigidez de uma viga feita com CUAD tende a ser maior que a de uma viga feita com concreto convencional, devido ao seu módulo de elasticidade maior: 50 GPa (valor preliminar que pode ser considerado sem testes, conforme as recomendações da AFGC), mas que pode chegar a 70 GPa, por conta das fibras adicionadas, contra um módulo de elasticidade de 56 GPa na condição mais favorável (agregados de basalto e diabásio) para concretos com de até $f_{ck} = 90$ MPa. Ainda assim, uma peça estrutural muito esbelta sobre um vão muito grande pode gerar deformações e fissuras excessivas. As recomendações da AFGC (2013) contém as instruções necessárias para fazer estas verificações no CUAD.

Figura 35 – Relação do aumento do vão teórico (l) a ser vencido em relação ao aumento do f_{ck}

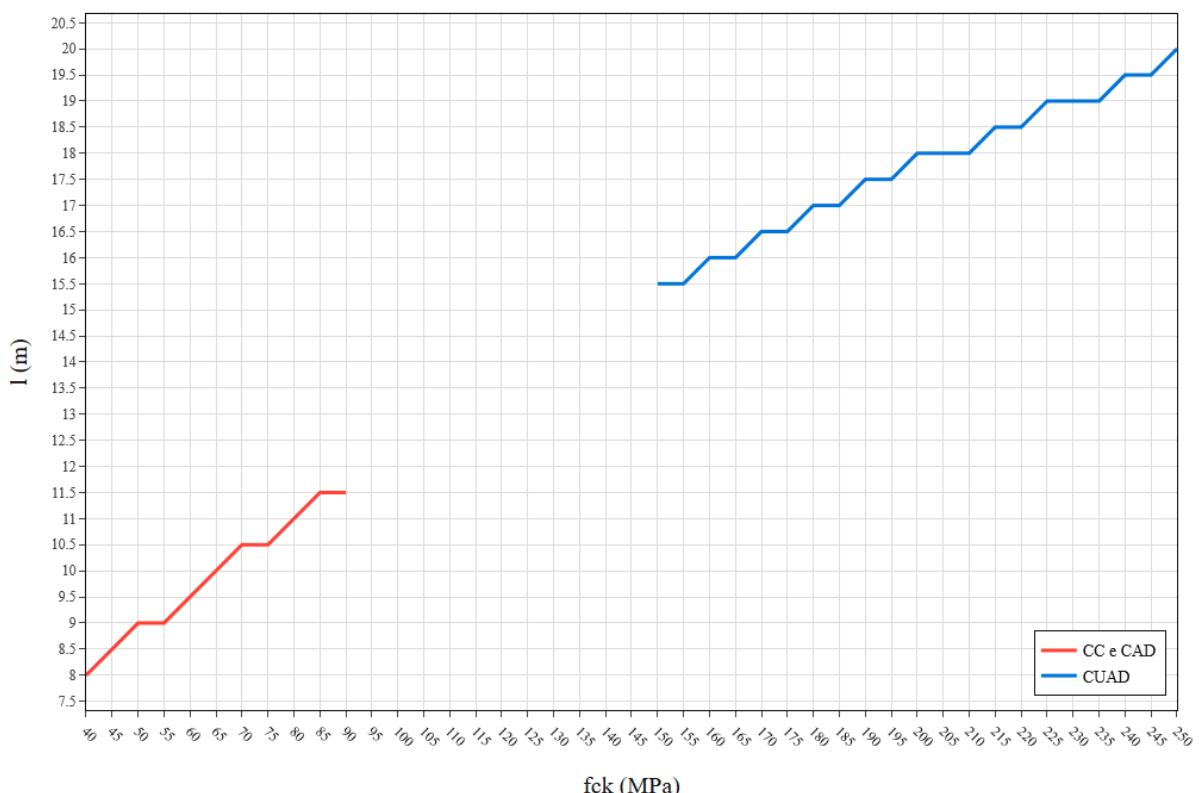


Tabela 8 – Aumento do fck relacionado ao aumento do vão que a mesma viga pode vencer

fck do concreto (MPa)	Protensão máxima (MPa)	Protensão necessária $\sigma_{c,min}$ (MPa)	Aproveitamento da protensão máxima (%)	Vão teórico (m)
40,00	24,00	23,53	98,03	8,00
45,00	27,00	26,56	98,37	8,50
50,00	30,00	29,78	99,26	9,00
55,00	33,00	29,78	90,24	9,00
60,00	36,00	33,18	92,16	9,50
65,00	39,00	36,76	94,26	10,00
70,00	42,00	40,53	96,50	10,50
75,00	45,00	40,53	90,07	10,50
80,00	48,00	44,48	92,67	11,00
85,00	51,00	48,62	95,33	11,50
90,00	54,00	48,62	90,03	11,50
150,00	90,00	88,32	98,14	15,50
155,00	93,00	88,32	94,97	15,50
160,00	96,00	94,11	98,03	16,00
165,00	99,00	94,11	95,06	16,00
170,00	102,00	100,09	98,12	16,50
175,00	105,00	100,09	95,32	16,50
180,00	108,00	106,24	98,37	17,00
185,00	111,00	106,24	95,71	17,00
190,00	114,00	112,59	98,76	17,50
195,00	117,00	112,59	96,23	17,50
200,00	120,00	119,11	99,26	18,00
205,00	123,00	119,11	96,84	18,00
210,00	126,00	119,11	94,53	18,00
215,00	129,00	125,82	97,53	18,50
220,00	132,00	125,82	95,32	18,50
225,00	135,00	132,71	98,31	19,00
230,00	138,00	132,71	96,17	19,00
235,00	141,00	132,71	94,12	19,00
240,00	144,00	139,79	97,08	19,50
245,00	147,00	139,79	95,09	19,50
250,00	150,00	147,05	98,03	20,00

Em seguida, comparou-se o quanto a seção da viga T feita com concreto de fck igual a 40 MPa até 90 MPa precisaria aumentar para vencer o mesmo vão de uma viga com as mesmas características feitas com um CUAD de fck igual a 150 MPa. Pode-se observar um considerável aumento na área da seção transversal, em comparação com os 0,16 m² da viga de CUAD. A partir dos resultados mostrados na Tabela 9, é possível concluir que as seções de vigas feitas em CUAD são, aproximadamente, 50% menores que as feitas de concreto convencional (CC) e concreto de alto desempenho (CAD).

Tabela 9 – Aumento da área da seção transversal

fck (MPa)	Área da seção (m ²)	Taxa de aumento (%)
40	0,453	64,64
45	0,453	64,64
50	0,360	55,56
55	0,338	52,59
60	0,338	52,59
65	0,338	52,59
70	0,338	52,59
75	0,315	49,21
80	0,315	49,21
85	0,263	39,05
90	0,263	39,05
Média		51,91

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O processo de pesquisa que resultou na realização deste trabalho permitiu as seguintes análises:

- Demonstrou-se a possibilidade da realização de empreendimentos e obras de arte no Brasil em CUAD, a partir dos fundamentos teóricos encontrados na literatura científica nacional e internacional, apesar de ainda não existir uma normatização de seu uso;
- Foi possível conhecer as características físicas do CUAD, a partir das quais é possível construir modelos computacionais que permitem a análise de estruturas feitas com o material;
- Compreender os benefícios do CUAD como solução construtiva em relação ao concreto convencional, CAD e aço, principalmente nas questões de manutenção da obra (menos manutenção ao longo da vida útil), sustentabilidade ambiental (menor impacto ambiental em seu ciclo de vida produtivo), tempo de execução (que é menor, por conta de seu processo de produção industrializado) e custos (que, apesar de ser maior no início, pode ser compensado ao longo da vida útil da construção, em sua manutenção e durabilidade);
- Foi possível conhecer, na revisão bibliográfica, as principais linhas de pesquisa que regem o desenvolvimento do CUAD nos principais centros de pesquisa do mundo, as marcas comerciais já disponíveis no mercado e outras variedades que estão sendo estudados e ainda não são vendidas;
- Foi possível conhecer as técnicas utilizadas na execução de estruturas em CUAD, principalmente na questão da distribuição das fibras no concreto e um método utilizado durante a mistura do CUAD utilizado para construir a ponte Jakway Park;
- Foi possível fazer um programa que possa auxiliar na análise da viabilidade da aplicação de CUAD em vigas protendidas, auxiliando o engenheiro a entender, com rapidez, a viabilidade da aplicação do material na obra;
- No estudo de caso, foi demonstrado que o uso de CUAD na construção de vigas protendidas pode diminuir a sua seção transversal em aproximadamente 50%;
- No estudo de caso, comprovou-se a capacidade do CUAD de permitir a realização de empreendimentos com formas muito esbeltas, dada a sua elevada capacidade de resistência e sua qualidade inerente, fato que também se deve à sua produção industrializada.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar-se esta pesquisa sobre concreto de ultra alto desempenho, o desenvolvimento do algoritmo para analisar a viabilidade de aplicação do CUAD em vigas de retangular e seção T, é possível afirmar que atingiu-se os objetivos aos quais este estudo se propôs, a saber: uma pesquisa inédita sobre o CUAD como material, seu processo de execução, as considerações efetuadas na modelagem computacional, verificação da capacidade técnica da indústria nacional de produzir os insumos necessários para a fabricação de CUAD no Brasil e desenvolver um método simples para que o projetista possa considerar a aplicação de CUAD nas vigas do seu empreendimento.

Com base em critérios de análise e projeto, é possível concluir que o CUAD é uma solução viável em vários tipos de situações, desde arquitetônicas a estruturais, vide as diversas construções já realizadas pelo mundo, trazendo a possibilidade de se construir estruturas mais esbeltas, resistentes e duráveis. Para que suas propriedades sejam utilizadas ao máximo, é preciso quantificar todos as informações associadas ao projeto, para que se possa chegar a uma solução viável técnica e economicamente. O CUAD proporciona uma maior vida útil da construção a um custo menor de manutenção, o que pode viabilizar o seu uso em diversos empreendimentos, apesar do seu maior custo inicial em relação a outras soluções construtivas.

Também é possível concluir que ainda existe um grande espaço para se desenvolver soluções inovadoras, tanto em geometria como em topologia das peças estruturais utilizadas na construção civil com CUAD, por conta das características de resistência e durabilidade inerentes do material. Ainda, por conta de seu processo industrializado de fabricação, também pode-se concluir que isso trará uma melhora de qualidade na indústria da construção do país.

11 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O algoritmo apresentado neste trabalho (Apêndice A) faz uma verificação muito simples para analisar a viabilidade da aplicação de CUAD em vigas de seção retangular e seção T. Sugere-se a expansão do método utilizado neste trabalho, afim de se considerar verificações como fissuração da peça, estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS), além de se considerar outras peças estruturais (lajes e pilares). Como já foi demonstrado no estudo de caso, o algoritmo provou-se uma maneira útil e prática para a tarefa a qual se destina.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. *International Journal Of Concrete Structures And Materials*, Springer Nature, v. 10, n. 3, p. 271–295, jun 2016.
- AÏTCIN. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: Editora Pini, 2000.
- AÏTCIN, P. C. et al. The sherbrooke reactive powder concrete footbridge. *Structural Engineering International*, v. 8, n. 2, p. 140–144, 1998.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. *Bétons fibrés à ultra-hautes performances: Recommandations provisoires*. França, 2013.
- BOSCH, J.-L. e. a. *Joseph Monier et la naissance du ciment arme*. Paris: Editions du Linteau, 2001.
- CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. *Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas*. São Paulo: EPUSP, 1999. ISBN 01039830.
- CBI Betonginstitutet. *Ultra high performance concrete (UHPC) – development, application, sustainability*. 2016. Disponível em: <<http://www.cbi.se/download.do?ug=Administrator&f=CBIdagen2016+Urs+Mueller+UHPC.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2017.
- CHOLFE, L.; BONILHA, L. *Concreto pretendido: teoria e prática*. São Paulo: Editora Pini, 2015.
- CHRIST, R. *Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental*. 55 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.
- DAVILA, R. S. *Recommendations for the design of UHPC structures*. 125 p. Dissertação (Mestrado) — Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2007.
- Bartley P. Durst, Billy D. Neeley, Edward F. O’Neil e Toney K. CumminsCharles. *Blast-resistant concrete also suitable for limiting penetration of ballistic fragments*. 2010. US7744690 B2.
- FLINT, M.; GRÜNEWAL, S.; COENDERS, J. Designing and building with UHPFRC: State of the art and development. In: _____. [S.l.]: ISTE LTD, 2011. cap. Ant Colony Optimization for Ultra High Performance Concrete Structures, p. 602–617. ISBN 1848212712.
- GOLDONI, A. G. *Resistência à flexão e compressão em geopolímero com incorporação de nanotubos de carbono*. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- Weiliang Gong, Werner Lutze e Ian Pegg. *Geopolymer composite for ultra-high performance concrete*. 2012. US20120152153 A1.
- GU, C.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. *Science China Technological Sciences*, v. 58, n. 4, p. 587–599, abr. 2015.

- GUNES, O. et al. Use of UHPC in bridge structures: Material modeling and design. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, p. 1–12, 2012.
- ISAIA, G. C. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 1–55.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Recommendations for design and construction of ultra high-strength fiber reinforced concrete structures (draft), JSCE Guidelines for Concrete No. 9*. Japão, 2006.
- KEIERLEBER, B. *UHPC Research*. 2017. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <douglas.ademoura [at] gmail.com> em: 27 abr. 2017.
- KEIERLEBER, B.; BIERWAGEN, D.; WIPF, T. Fhwa, iowa optimize pi girder. *Aspire - The Concrete Bridge Magazine*, v. 4, n. 1, p. 24–27, Dezembro 2010. ISSN 1935-2093.
- KEIERLEBER, B. et al. Design of buchanan county, iowa, bridge using ultra high performance concrete and pi girders. In: MID-CONTINENT TRANSPORTATION RESEARCH SYMPOSIUM. *Proceedings*. Ames, Iowa, EUA, 2007. v. 2007, p. 1–11.
- Voo Yen Lei. *Ultra high performance cementitious composite*. 2010. MY-141706-A.
- LÓPEZ, J. A. et al. Structural design and preliminary calculations of a uhpfrc truss footbridge. In: HIPERMAT 2012. *Proceedings*. . . Alemanha: Kassel University Press, 2012. p. 897–904.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. São Paulo: Bookman, 2010. ISBN 9788582600719.
- PALMA, M. C. et al. Cura úmida x cura térmica aplicadas a blocos de concreto - análise da resistência à compressão. In: IX ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA. *Anais*. . . Sao Pedro: ENTECA 2013, 2013.
- PICCHI, F. A. O desperdício impera na construção civil: Somente com a adoção de sistemas de controle de qualidade as empresas poderão recuperar o atraso em relação a outros setores. *O Estado de São Paulo*, São Paulo, maio 1993. Caderno de Imóveis.
- PIOTROWSKI, S.; SCHMIDT, M. Life cycle cost analysis of a uhpc-bridge on example of two bridge refurbishment designs. In: HIPERMAT 2012. *Proceedings*. . . Alemanha: Kassel University Press, 2012. p. 957–964.
- RACKY, P. Cost-effectiveness and sustainability of UHPC. In: HIPERMAT 2008. *Proceedings*. . . Alemanha: Kassel University Press, 2004. p. 797–805.
- Research and Development Concretes. *Project and technical assistance for the Oveja's ravine footbridge (Alicante)*. 2014. Disponível em: <<https://rdconcretes.wordpress.com/project-and-technical-assistance-for-the-ovejas-ravine-footbridge-alicante/>>. Acesso em: 1 ago. 2017.
- RESPLENDINO, J. Designing and building with UHPFRC: State of the art and development. In: _____. [S.l.]: ISTE LTD, 2011. cap. Introduction: What is a UHPFRC?, p. 3–14. ISBN 1848212712.
- ROUSE, J. M. et al. *Design, Construction, and Field Testing of an Ultra High Performance Concrete Pi-Girder Bridge*. Ames, Iowa, EUA, 2011.

- RUSSEL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. *Ultra - High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. Mclean, Virginia, EUA, 2013.
- SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier BV, v. 125, p. 600–612, oct 2016.
- STENGEL, T.; SCHIEßL, P. Sustainable construction with UHPC – from life cycle inventory data collection to environmental impact assessment. In: HIPERMAT 2008. *Proceedings...* Alemanha: Kassel University Press, 2008. p. 461–468.
- Stone pré-fabricados arquitetônicos Ltda. *Ductal*. 2017. Disponível em: <<http://stone.ind.br/ductal.shtml>>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- TANG, M. High performance concrete – past, present and future. In: HIPERMAT 2004. *Proceedings...* Kassel: Kassel University Press, 2004. p. 3–9.
- TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1283–1325.
- VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- VANDERLEI, R. D.; GONGO, J. S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. In: *Caderno de Engenharia de Estruturas*. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2011. v. 8, p. 115–148.

Apêndices

APÊNDICE A – ALGORITMO UTILIZADO NO ESTUDO DE CASO

Este algoritmo foi utilizado no Scilab 6.0.0 (<http://scilab.org>) e está disponível sob a licença GNU GPL V2.

```

1  /*
2   * Author: Douglas Araujo de Moura (douglas.moura [at]
3   *         constrinew.com.br)
4   * Author URI: https://engenhariadolivre.com/
5   * License: GNU General Public License v2 or later
6   * License URI: http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html
7   * Repository: https://github.com/DouglasdeMoura/TCC
8   * Last modified: 2017-11-14
9   */
10
11 function x = resultados(b, h, bf, hf, g, q, l, fck)
12     compressao_maxima = 0.6 * fck * 1000
13
14     [Ac, I, Wsup, Winf] = caractGeometricas(b, h, bf, hf)
15     [Mgmax, Mqmax, sigma_cg_inf, sigma_cg_sup, sigma_cq_inf,
16      sigma_cq_sup, Npd] = esforcosSolicitantes(g, q, l, Wsup, Winf)
17
18     Np = ( - sigma_cg_inf - sigma_cq_inf ) * Ac
19
20     sigma_c_min = Npd + sigma_cg_sup + sigma_cq_sup
21
22     if abs(sigma_c_min) < abs(compressao_maxima) then
23         v1 = 1
24     else
25         v1 = 0
26         //warning("A tensão na fibra superior (" +
27             string(sigma_c_min/1000) + " | MPa) é maior que a máxima
28             permitida (" + string(compressao_maxima/1000) + " |
29             MPa).")
30     end
31
32     if abs(Npd) < abs(compressao_maxima) then
33         v2 = 1
34     else
35         v2 = 0
36         //warning("A tensão na fibra inferior (" +
37             string(Npd/1000) + " | MPa) é maior que a máxima
38             permitida (" + string(compressao_maxima/1000) + " |
39             MPa).")
40     end
41
42     if v1 == 1 then
43         v1 = 0
44     else
45         v1 = 1
46     end
47
48     if v2 == 1 then
49         v2 = 0
50     else
51         v2 = 1
52     end
53
54     if v1 == 1 then
55         v1 = 0
56     else
57         v1 = 1
58     end
59
60     if v2 == 1 then
61         v2 = 0
62     else
63         v2 = 1
64     end
65
66     if v1 == 1 then
67         v1 = 0
68     else
69         v1 = 1
70     end
71
72     if v2 == 1 then
73         v2 = 0
74     else
75         v2 = 1
76     end
77
78     if v1 == 1 then
79         v1 = 0
80     else
81         v1 = 1
82     end
83
84     if v2 == 1 then
85         v2 = 0
86     else
87         v2 = 1
88     end
89
90     if v1 == 1 then
91         v1 = 0
92     else
93         v1 = 1
94     end
95
96     if v2 == 1 then
97         v2 = 0
98     else
99         v2 = 1
100    end
101
102    if v1 == 1 then
103        v1 = 0
104    else
105        v1 = 1
106    end
107
108    if v2 == 1 then
109        v2 = 0
110    else
111        v2 = 1
112    end
113
114    if v1 == 1 then
115        v1 = 0
116    else
117        v1 = 1
118    end
119
120    if v2 == 1 then
121        v2 = 0
122    else
123        v2 = 1
124    end
125
126    if v1 == 1 then
127        v1 = 0
128    else
129        v1 = 1
130    end
131
132    if v2 == 1 then
133        v2 = 0
134    else
135        v2 = 1
136    end
137
138    if v1 == 1 then
139        v1 = 0
140    else
141        v1 = 1
142    end
143
144    if v2 == 1 then
145        v2 = 0
146    else
147        v2 = 1
148    end
149
150    if v1 == 1 then
151        v1 = 0
152    else
153        v1 = 1
154    end
155
156    if v2 == 1 then
157        v2 = 0
158    else
159        v2 = 1
160    end
161
162    if v1 == 1 then
163        v1 = 0
164    else
165        v1 = 1
166    end
167
168    if v2 == 1 then
169        v2 = 0
170    else
171        v2 = 1
172    end
173
174    if v1 == 1 then
175        v1 = 0
176    else
177        v1 = 1
178    end
179
180    if v2 == 1 then
181        v2 = 0
182    else
183        v2 = 1
184    end
185
186    if v1 == 1 then
187        v1 = 0
188    else
189        v1 = 1
190    end
191
192    if v2 == 1 then
193        v2 = 0
194    else
195        v2 = 1
196    end
197
198    if v1 == 1 then
199        v1 = 0
200    else
201        v1 = 1
202    end
203
204    if v2 == 1 then
205        v2 = 0
206    else
207        v2 = 1
208    end
209
210    if v1 == 1 then
211        v1 = 0
212    else
213        v1 = 1
214    end
215
216    if v2 == 1 then
217        v2 = 0
218    else
219        v2 = 1
220    end
221
222    if v1 == 1 then
223        v1 = 0
224    else
225        v1 = 1
226    end
227
228    if v2 == 1 then
229        v2 = 0
230    else
231        v2 = 1
232    end
233
234    if v1 == 1 then
235        v1 = 0
236    else
237        v1 = 1
238    end
239
240    if v2 == 1 then
241        v2 = 0
242    else
243        v2 = 1
244    end
245
246    if v1 == 1 then
247        v1 = 0
248    else
249        v1 = 1
250    end
251
252    if v2 == 1 then
253        v2 = 0
254    else
255        v2 = 1
256    end
257
258    if v1 == 1 then
259        v1 = 0
260    else
261        v1 = 1
262    end
263
264    if v2 == 1 then
265        v2 = 0
266    else
267        v2 = 1
268    end
269
270    if v1 == 1 then
271        v1 = 0
272    else
273        v1 = 1
274    end
275
276    if v2 == 1 then
277        v2 = 0
278    else
279        v2 = 1
280    end
281
282    if v1 == 1 then
283        v1 = 0
284    else
285        v1 = 1
286    end
287
288    if v2 == 1 then
289        v2 = 0
290    else
291        v2 = 1
292    end
293
294    if v1 == 1 then
295        v1 = 0
296    else
297        v1 = 1
298    end
299
300    if v2 == 1 then
301        v2 = 0
302    else
303        v2 = 1
304    end
305
306    if v1 == 1 then
307        v1 = 0
308    else
309        v1 = 1
310    end
311
312    if v2 == 1 then
313        v2 = 0
314    else
315        v2 = 1
316    end
317
318    if v1 == 1 then
319        v1 = 0
320    else
321        v1 = 1
322    end
323
324    if v2 == 1 then
325        v2 = 0
326    else
327        v2 = 1
328    end
329
330    if v1 == 1 then
331        v1 = 0
332    else
333        v1 = 1
334    end
335
336    if v2 == 1 then
337        v2 = 0
338    else
339        v2 = 1
340    end
341
342    if v1 == 1 then
343        v1 = 0
344    else
345        v1 = 1
346    end
347
348    if v2 == 1 then
349        v2 = 0
350    else
351        v2 = 1
352    end
353
354    if v1 == 1 then
355        v1 = 0
356    else
357        v1 = 1
358    end
359
360    if v2 == 1 then
361        v2 = 0
362    else
363        v2 = 1
364    end
365
366    if v1 == 1 then
367        v1 = 0
368    else
369        v1 = 1
370    end
371
372    if v2 == 1 then
373        v2 = 0
374    else
375        v2 = 1
376    end
377
378    if v1 == 1 then
379        v1 = 0
380    else
381        v1 = 1
382    end
383
384    if v2 == 1 then
385        v2 = 0
386    else
387        v2 = 1
388    end
389
390    if v1 == 1 then
391        v1 = 0
392    else
393        v1 = 1
394    end
395
396    if v2 == 1 then
397        v2 = 0
398    else
399        v2 = 1
400    end
401
402    if v1 == 1 then
403        v1 = 0
404    else
405        v1 = 1
406    end
407
408    if v2 == 1 then
409        v2 = 0
410    else
411        v2 = 1
412    end
413
414    if v1 == 1 then
415        v1 = 0
416    else
417        v1 = 1
418    end
419
420    if v2 == 1 then
421        v2 = 0
422    else
423        v2 = 1
424    end
425
426    if v1 == 1 then
427        v1 = 0
428    else
429        v1 = 1
430    end
431
432    if v2 == 1 then
433        v2 = 0
434    else
435        v2 = 1
436    end
437
438    if v1 == 1 then
439        v1 = 0
440    else
441        v1 = 1
442    end
443
444    if v2 == 1 then
445        v2 = 0
446    else
447        v2 = 1
448    end
449
450    if v1 == 1 then
451        v1 = 0
452    else
453        v1 = 1
454    end
455
456    if v2 == 1 then
457        v2 = 0
458    else
459        v2 = 1
460    end
461
462    if v1 == 1 then
463        v1 = 0
464    else
465        v1 = 1
466    end
467
468    if v2 == 1 then
469        v2 = 0
470    else
471        v2 = 1
472    end
473
474    if v1 == 1 then
475        v1 = 0
476    else
477        v1 = 1
478    end
479
480    if v2 == 1 then
481        v2 = 0
482    else
483        v2 = 1
484    end
485
486    if v1 == 1 then
487        v1 = 0
488    else
489        v1 = 1
490    end
491
492    if v2 == 1 then
493        v2 = 0
494    else
495        v2 = 1
496    end
497
498    if v1 == 1 then
499        v1 = 0
500    else
501        v1 = 1
502    end
503
504    if v2 == 1 then
505        v2 = 0
506    else
507        v2 = 1
508    end
509
510    if v1 == 1 then
511        v1 = 0
512    else
513        v1 = 1
514    end
515
516    if v2 == 1 then
517        v2 = 0
518    else
519        v2 = 1
520    end
521
522    if v1 == 1 then
523        v1 = 0
524    else
525        v1 = 1
526    end
527
528    if v2 == 1 then
529        v2 = 0
530    else
531        v2 = 1
532    end
533
534    if v1 == 1 then
535        v1 = 0
536    else
537        v1 = 1
538    end
539
540    if v2 == 1 then
541        v2 = 0
542    else
543        v2 = 1
544    end
545
546    if v1 == 1 then
547        v1 = 0
548    else
549        v1 = 1
550    end
551
552    if v2 == 1 then
553        v2 = 0
554    else
555        v2 = 1
556    end
557
558    if v1 == 1 then
559        v1 = 0
560    else
561        v1 = 1
562    end
563
564    if v2 == 1 then
565        v2 = 0
566    else
567        v2 = 1
568    end
569
570    if v1 == 1 then
571        v1 = 0
572    else
573        v1 = 1
574    end
575
576    if v2 == 1 then
577        v2 = 0
578    else
579        v2 = 1
580    end
581
582    if v1 == 1 then
583        v1 = 0
584    else
585        v1 = 1
586    end
587
588    if v2 == 1 then
589        v2 = 0
590    else
591        v2 = 1
592    end
593
594    if v1 == 1 then
595        v1 = 0
596    else
597        v1 = 1
598    end
599
600    if v2 == 1 then
601        v2 = 0
602    else
603        v2 = 1
604    end
605
606    if v1 == 1 then
607        v1 = 0
608    else
609        v1 = 1
610    end
611
612    if v2 == 1 then
613        v2 = 0
614    else
615        v2 = 1
616    end
617
618    if v1 == 1 then
619        v1 = 0
620    else
621        v1 = 1
622    end
623
624    if v2 == 1 then
625        v2 = 0
626    else
627        v2 = 1
628    end
629
630    if v1 == 1 then
631        v1 = 0
632    else
633        v1 = 1
634    end
635
636    if v2 == 1 then
637        v2 = 0
638    else
639        v2 = 1
640    end
641
642    if v1 == 1 then
643        v1 = 0
644    else
645        v1 = 1
646    end
647
648    if v2 == 1 then
649        v2 = 0
650    else
651        v2 = 1
652    end
653
654    if v1 == 1 then
655        v1 = 0
656    else
657        v1 = 1
658    end
659
660    if v2 == 1 then
661        v2 = 0
662    else
663        v2 = 1
664    end
665
666    if v1 == 1 then
667        v1 = 0
668    else
669        v1 = 1
670    end
671
672    if v2 == 1 then
673        v2 = 0
674    else
675        v2 = 1
676    end
677
678    if v1 == 1 then
679        v1 = 0
680    else
681        v1 = 1
682    end
683
684    if v2 == 1 then
685        v2 = 0
686    else
687        v2 = 1
688    end
689
690    if v1 == 1 then
691        v1 = 0
692    else
693        v1 = 1
694    end
695
696    if v2 == 1 then
697        v2 = 0
698    else
699        v2 = 1
700    end
701
702    if v1 == 1 then
703        v1 = 0
704    else
705        v1 = 1
706    end
707
708    if v2 == 1 then
709        v2 = 0
710    else
711        v2 = 1
712    end
713
714    if v1 == 1 then
715        v1 = 0
716    else
717        v1 = 1
718    end
719
720    if v2 == 1 then
721        v2 = 0
722    else
723        v2 = 1
724    end
725
726    if v1 == 1 then
727        v1 = 0
728    else
729        v1 = 1
730    end
731
732    if v2 == 1 then
733        v2 = 0
734    else
735        v2 = 1
736    end
737
738    if v1 == 1 then
739        v1 = 0
740    else
741        v1 = 1
742    end
743
744    if v2 == 1 then
745        v2 = 0
746    else
747        v2 = 1
748    end
749
750    if v1 == 1 then
751        v1 = 0
752    else
753        v1 = 1
754    end
755
756    if v2 == 1 then
757        v2 = 0
758    else
759        v2 = 1
760    end
761
762    if v1 == 1 then
763        v1 = 0
764    else
765        v1 = 1
766    end
767
768    if v2 == 1 then
769        v2 = 0
770    else
771        v2 = 1
772    end
773
774    if v1 == 1 then
775        v1 = 0
776    else
777        v1 = 1
778    end
779
780    if v2 == 1 then
781        v2 = 0
782    else
783        v2 = 1
784    end
785
786    if v1 == 1 then
787        v1 = 0
788    else
789        v1 = 1
790    end
791
792    if v2 == 1 then
793        v2 = 0
794    else
795        v2 = 1
796    end
797
798    if v1 == 1 then
799        v1 = 0
800    else
801        v1 = 1
802    end
803
804    if v2 == 1 then
805        v2 = 0
806    else
807        v2 = 1
808    end
809
810    if v1 == 1 then
811        v1 = 0
812    else
813        v1 = 1
814    end
815
816    if v2 == 1 then
817        v2 = 0
818    else
819        v2 = 1
820    end
821
822    if v1 == 1 then
823        v1 = 0
824    else
825        v1 = 1
826    end
827
828    if v2 == 1 then
829        v2 = 0
830    else
831        v2 = 1
832    end
833
834    if v1 == 1 then
835        v1 = 0
836    else
837        v1 = 1
838    end
839
840    if v2 == 1 then
841        v2 = 0
842    else
843        v2 = 1
844    end
845
846    if v1 == 1 then
847        v1 = 0
848    else
849        v1 = 1
850    end
851
852    if v2 == 1 then
853        v2 = 0
854    else
855        v2 = 1
856    end
857
858    if v1 == 1 then
859        v1 = 0
860    else
861        v1 = 1
862    end
863
864    if v2 == 1 then
865        v2 = 0
866    else
867        v2 = 1
868    end
869
870    if v1 == 1 then
871        v1 = 0
872    else
873        v1 = 1
874    end
875
876    if v2 == 1 then
877        v2 = 0
878    else
879        v2 = 1
880    end
881
882    if v1 == 1 then
883        v1 = 0
884    else
885        v1 = 1
886    end
887
888    if v2 == 1 then
889        v2 = 0
890    else
891        v2 = 1
892    end
893
894    if v1 == 1 then
895        v1 = 0
896    else
897        v1 = 1
898    end
899
900    if v2 == 1 then
901        v2 = 0
902    else
903        v2 = 1
904    end
905
906    if v1 == 1 then
907        v1 = 0
908    else
909        v1 = 1
910    end
911
912    if v2 == 1 then
913        v2 = 0
914    else
915        v2 = 1
916    end
917
918    if v1 == 1 then
919        v1 = 0
920    else
921        v1 = 1
922    end
923
924    if v2 == 1 then
925        v2 = 0
926    else
927        v2 = 1
928    end
929
930    if v1 == 1 then
931        v1 = 0
932    else
933        v1 = 1
934    end
935
936    if v2 == 1 then
937        v2 = 0
938    else
939        v2 = 1
940    end
941
942    if v1 == 1 then
943        v1 = 0
944    else
945        v1 = 1
946    end
947
948    if v2 == 1 then
949        v2 = 0
950    else
951        v2 = 1
952    end
953
954    if v1 == 1 then
955        v1 = 0
956    else
957        v1 = 1
958    end
959
960    if v2 == 1 then
961        v2 = 0
962    else
963        v2 = 1
964    end
965
966    if v1 == 1 then
967        v1 = 0
968    else
969        v1 = 1
970    end
971
972    if v2 == 1 then
973        v2 = 0
974    else
975        v2 = 1
976    end
977
978    if v1 == 1 then
979        v1 = 0
980    else
981        v1 = 1
982    end
983
984    if v2 == 1 then
985        v2 = 0
986    else
987        v2 = 1
988    end
989
990    if v1 == 1 then
991        v1 = 0
992    else
993        v1 = 1
994    end
995
996    if v2 == 1 then
997        v2 = 0
998    else
999        v2 = 1
1000    end
1001
1002    if v1 == 1 then
1003        v1 = 0
1004    else
1005        v1 = 1
1006    end
1007
1008    if v2 == 1 then
1009        v2 = 0
1010    else
1011        v2 = 1
1012    end
1013
1014    if v1 == 1 then
1015        v1 = 0
1016    else
1017        v1 = 1
1018    end
1019
1020    if v2 == 1 then
1021        v2 = 0
1022    else
1023        v2 = 1
1024    end
1025
1026    if v1 == 1 then
1027        v1 = 0
1028    else
1029        v1 = 1
1030    end
1031
1032    if v2 == 1 then
1033        v2 = 0
1034    else
1035        v2 = 1
1036    end
1037
1038    if v1 == 1 then
1039        v1 = 0
1040    else
1041        v1 = 1
1042    end
1043
1044    if v2 == 1 then
1045        v2 = 0
1046    else
1047        v2 = 1
1048    end
1049
1050    if v1 == 1 then
1051        v1 = 0
1052    else
1053        v1 = 1
1054    end
1055
1056    if v2 == 1 then
1057        v2 = 0
1058    else
1059        v2 = 1
1060    end
1061
1062    if v1 == 1 then
1063        v1 = 0
1064    else
1065        v1 = 1
1066    end
1067
1068    if v2 == 1 then
1069        v2 = 0
1070    else
1071        v2 = 1
1072    end
1073
1074    if v1 == 1 then
1075        v1 = 0
1076    else
1077        v1 = 1
1078    end
1079
1080    if v2 == 1 then
1081        v2 = 0
1082    else
1083        v2 = 1
1084    end
1085
1086    if v1 == 1 then
1087        v1 = 0
1088    else
1089        v1 = 1
1090    end
1091
1092    if v2 == 1 then
1093        v2 = 0
1094    else
1095        v2 = 1
1096    end
1097
1098    if v1 == 1 then
1099        v1 = 0
1100    else
1101        v1 = 1
1102    end
1103
1104    if v2 == 1 then
1105        v2 = 0
1106    else
1107        v2 = 1
1108    end
1109
1110    if v1 == 1 then
1111        v1 = 0
1112    else
1113        v1 = 1
1114    end
1115
1116    if v2 == 1 then
1117        v2 = 0
1118    else
1119        v2 = 1
1120    end
1121
1122    if v1 == 1 then
1123        v1 = 0
1124    else
1125        v1 = 1
1126    end
1127
1128    if v2 == 1 then
1129        v2 = 0
1130    else
1131        v2 = 1
1132    end
1133
1134    if v1 == 1 then
1135        v1 = 0
1136    else
1137        v1 = 1
1138    end
1139
1140    if v2 == 1 then
1141        v2 = 0
1142    else
1143        v2 = 1
1144    end
1145
1146    if v1 == 1 then
1147        v1 = 0
1148    else
1149        v1 = 1
1150    end
1151
1152    if v2 == 1 then
1153        v2 = 0
1154    else
1155        v2 = 1
1156    end
1157
1158    if v1 == 1 then
1159        v1 = 0
1160    else
1161        v1 = 1
1162    end
1163
1164    if v2 == 1 then
1165        v2 = 0
1166    else
1167        v2 = 1
1168    end
1169
1170    if v1 == 1 then
1171        v1 = 0
1172    else
1173        v1 = 1
1174    end
1175
1176    if v2 == 1 then
1177        v2 = 0
1178    else
1179        v2 = 1
1180    end
1181
1182    if v1 == 1 then
1183        v1 = 0
1184    else
1185        v1 = 1
1186    end
1187
1188    if v2 == 1 then
1189        v2 = 0
1190    else
1191        v2 = 1
1192    end
1193
1194    if v1 == 1 then
1195        v1 = 0
1196    else
1197        v1 = 1
1198    end
1199
1200    if v2 == 1 then
1201        v2 = 0
1202    else
1203        v2 = 1
1204    end
1205
1206    if v1 == 1 then
1207        v1 = 0
1208    else
1209        v1 = 1
1210    end
1211
1212    if v2 == 1 then
1213        v2 = 0
1214    else
1215        v2 = 1
1216    end
1217
1218    if v1 == 1 then
1219        v1 = 0
1220    else
1221        v1 = 1
1222    end
1223
1224    if v2 == 1 then
1225        v2 = 0
1226    else
1227        v2 = 1
1228    end
1229
1230    if v1 == 1 then
1231        v1 = 0
1232    else
1233        v1 = 1
1234    end
1235
1236    if v2 == 1 then
1237        v2 = 0
1238    else
1239        v2 = 1
1240    end
1241
1242    if v1 == 1 then
1243        v1 = 0
1244    else
1245        v1 = 1
1246    end
1247
1248    if v2 == 1 then
1249        v2 = 0
1250    else
1251        v2 = 1
1252    end
1253
1254    if v1 == 1 then
1255        v1 = 0
1256    else
1257        v1 = 1
1258    end
1259
1260    if v2 == 1 then
1261        v2 = 0
1262    else
1263        v2 = 1
1264    end
1265
1266    if v1 == 1 then
1267        v1 = 0
1268    else
1269        v1 = 1
1270    end
1271
1272    if v2 == 1 then
1273        v2 = 0
1274    else
1275        v2 = 1
1276    end
1277
1278    if v1 == 1 then
1279        v1 = 0
1280    else
1281        v1 = 1
1282    end
1283
1284    if v2 == 1 then
1285        v2 = 0
1286    else
1287        v2 = 1
1288    end
1289
1290    if v1 == 1 then
1291        v1 = 0
1292    else
1293        v1 = 1
1294    end
1295
1296    if v2 == 1 then
1297        v2 = 0
1298    else
1299        v2 = 1
1300    end
1301
1302    if v1 == 1 then
1303        v1 = 0
1304    else
1305        v1 = 1
1306    end
1307
1308    if v2 == 1 then
1309        v2 = 0
1310    else
1311        v2 = 1
1312    end
1313
1314    if v1 == 
```

```

29     else
30         v2 = 0
31         //warning("A compressão na seção dos apoios (" +
32             string(Npd/1000) + " | MPa) é maior que a máxima
33             permitida (" + string(compressao_maxima/1000) + " |
34             MPa).")
35     end
36
37     // 1. Normal de protensão (MPa)
38     // 2. fck do concreto (MPa)
39     // 3. Compressão máxima permitida (MPa)
40     // 4. Compressão mínima no concreto (MPa)
41     // 5. Taxa de aproveitamento da compressão no concreto (%)
42     // 6. Vão teórico (m)
43     // 7. Status da primeira validação (boolean)
44     // 8. Status da segunda validação (boolean)
45     // 9. Área da seção transversal
46     // 10. Inércia da seção
47     // 11. W_sup
48     // 12. W_inf
49
50     x = [(Npd/1000) fck (abs(compressao_maxima)/1000)
51           ((abs(sigma_c_min))/1000) ((abs(sigma_c_min) /
52             abs(compressao_maxima)) * 100) l v1 v2 Ac I Wsup Winf]
53
54 endfunction
55
56 function [Ac, I, Wsup, Winf] = caractGeometricas(b, h, bf, hf)
57     if bf == 0 & hf == 0 then
58         // Seção retangular
59         Ac = b * h
60         I = (b * (h^3)) / 12
61         y = h / 2
62         Wsup = I / y
63         Winf = I / y
64     else
65         // Seção T
66         h = (h - hf)
67         A1 = bf * hf
68         A2 = b * h
69         Ac = A1 + A2
70         Msx = (A1 * (h + (hf / 2))) + (A2 * (h / 2))
71         yg = Msx / Ac

```

```

66      I_xg1 = ((bf * (hf^3)) / 12) + (bf * hf * (((h + (hf / 2)) -
67          yg)^2))
68      I_xg2 = ((b * (h^3)) / 12) + (b * h * ((yg - (h / 2))^2))
69      I     = I_xg1 + I_xg2
70      ysup = (h + hf) - yg
71      yinf = yg
72      Wsup = I / ysup
73      Winf = I / yinf
74  end
75 endfunction
76
76 function [Mgmax, Mqmax, sigma_cg_inf, sigma_cg_sup, sigma_cq_inf,
77           sigma_cq_sup, Npd] = esforcosSolicitantes(g, q, l, Wsup, Winf)
78     j = (l^2 / 8)
79     Mgmax = g * j
80     Mqmax = q * j
81
81     sigma_cg_inf = + Mgmax / Winf
82     sigma_cg_sup = - Mgmax / Wsup
83     sigma_cq_inf = + Mqmax / Winf
84     sigma_cq_sup = - Mqmax / Wsup
85     Npd = ( - sigma_cg_inf - sigma_cq_inf )
86 endfunction
87
88 function g = grafico(x, y, x_label, y_label, cor)
89   xgrid
90   plot(x, y, cor)
91   xlabel(x_label, "fontname", "times_bold", "fontsize", 3)
92   ylabel(y_label, "fontname", "times_bold", "fontsize", 3)
93 endfunction
94
95 function [tabela, fck2, prot_max, prot_nec, aprov, vao] = estudol(b,
96   h, bf, hf, g, q, l, fck, fck_lim, aproveitamento_minimo)
97   tabela    = []
98   fck2     = []
99   prot_max = []
100  prot_nec = []
101  aprov    = []
102  vao      = []
103
103  i = 1
104

```

```
105     while fck <= fck_lim
106         r = resultados(b, h, bf, hf, g, q, l, fck)
107
108         aproveitamento = r(5)
109
110         while aproveitamento_minimo > aproveitamento
111             l = l + 0.5
112             r = resultados(b, h, bf, hf, g, q, l, fck)
113             aproveitamento = r(5)
114         end
115
116         tabela = [tabela; r]
117         fck2 = [fck2; r(2)]
118         prot_max = [prot_max; r(3)]
119         prot_nec = [prot_nec; r(4)]
120         aprov = [aprov; r(5)]
121         vao = [vao; r(6)]
122
123         fck = fck + 5
124     end
125 endfunction
126
127 function x = estudo2(b, h, bf, hf, g, q, l_desejado, fck)
128     r = resultados(b, h, bf, hf, g, q, l_desejado, fck)
129
130     validacao_1 = r(7)
131     validacao_2 = r(8)
132
133     while validacao_1 == 0 | validacao_2 == 0
134         h = h * 1.05
135         b = b * 1.05
136
137         if bf > 0 then
138             bf = bf * 1.05
139             hf = hf * 1.05
140         end
141
142         r = resultados(b, h, bf, hf, g, q, l_desejado, fck)
143
144         validacao_1 = r(7)
145         validacao_2 = r(8)
146     end
```

```
147
148     x = [b h bf hf]
149 endfunction
150
151 //fpyk = 1710
152 //Ap = 9.57 * (10^(-3))
153 //Npd = Ap * ( fpyk / 1.15 ) * 1000 // = 14210.6
154
155 // === Primeira parte do estudo de caso ===
156
157 // Características da viga T
158 b = 0.2
159 h = 0.6
160 bf = 0.6
161 hf = 0.1
162 g = 15
163 q = 12
164
165 // 40 =< fck =< 90
166 l = 8
167 fck = 40
168 fck_lim = 90
169 aproveitamento_minimo = 90
170
171 disp("40=<_fck=<_90")
172 [tabela, fck2, prot_max, prot_nec, aprov, vao] = estudo1(b, h, bf,
173   hf, g, q, l, fck, fck_lim)
174 disp(tabela)
175
176 // 150 =< fck =< 800
177 fck = 150
178 fck_lim = 250
179 aproveitamento_minimo = 94
180 //grafico(fck2, vao, "x", "y", 'r')
181
182 disp("150=<_fck=<_250")
183 [tabela, fck2, prot_max, prot_nec, aprov, vao] = estudo1(b, h, bf,
184   hf, g, q, l, fck, fck_lim)
185 disp(tabela)
186
187 grafico(fck2, vao, "fck_(MPa)", "l_(m)", 'b')
188 legend(['CC_e_CAD'; 'CUAD'], ["in_lower_right"]);
```

```
187
188 // === Segunda parte do estudo de caso ===
189 l_desejado = 15.5
190 fck = 40
191 fck_lim = 90
192 est2 = []
193
194 while fck_lim >= fck
195
196     r = estudo2(b, h, bf, hf, g, q, l_desejado, fck)
197     est2 = [est2; r]
198
199     fck = fck + 5
200 end
201
202 disp(est2)
```

Anexos

ANEXO A – TROCA DE E-MAILS COM O ENGENHEIRO BRIAN KEIERBELER

Gmail - UHPC Research

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ui=2&ik=db9...>



Douglas Araujo de Moura <maildodouglas@gmail.com>

UHPC Research

7 mensagens

Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>
Para: engineer@co.buchanan.ia.us

27 de abril de 2017 14:31

Hello Brian!

My name is Douglas and I am a Civil Engineering student from Brazil. Currently I'm researching the use of UHPC in bridges and I'm quite interested in the Jakway Park Bridge. Such a work of art! I would like to know if is possible to share some information on how the calculations were made (I believe it's quite different from reinforced and pre-stressed concrete right?). I would appreciate any help. Thanks for your time!

Best Regards,

Douglas Moura
+55 11 997-980-029

Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>
Para: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>

30 de abril de 2017 16:33

The project was completed years ago and the files archived. I will send a powerpoint that is more current.

Sent from my U.S. Cellular® Smartphone
[Texto das mensagens anteriores oculto]

Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>
Para: Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>

1 de maio de 2017 14:35

Thank you very much!

Att,

Douglas Moura
(11) 997-980-029
[Texto das mensagens anteriores oculto]

Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>
Para: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>

1 de maio de 2017 15:11

Could you open the link?

Sent from my U.S. Cellular® Smartphone

----- Original message -----
From: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>
Date: 5/1/17 12:36 PM (GMT-06:00)
To: Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>

Gmail - UHPC Research

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ui=2&ik=db9...>

[Texto das mensagens anteriores oculto]

Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>
Para: Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>

1 de maio de 2017 15:21

Yes, just downloaded the presentation.

Att,

Douglas Moura
(11) 997-980-029

[Texto das mensagens anteriores oculto]

Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>
Para: Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>

7 de maio de 2017 14:52

Brian, just one more question: what does "mild steel shear reinforcing" stands for? I couldn't find a translation equivalent in Portuguese (I believe it's a very English-like term).

Att,

Douglas Moura
(11) 997-980-029

[Texto das mensagens anteriores oculto]

Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>
Para: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>

7 de maio de 2017 20:40

Reinforcing bars usually 50 000 or. 90000 psi tensile strength. UHPaC has steel fibers.

Sent from my U.S. Cellular® Smartphone

----- Original message -----

From: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>

[Texto das mensagens anteriores oculto]

Gmail - Jakway and KUHPC Hawkeye Bridge.

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ui=2&ik=db9...>



Douglas Araujo de Moura <maildodouglas@gmail.com>

Jakway and KUHPC Hawkeye Bridge.

1 mensagem

Brian Keierleber <bkeierleber@co.buchanan.ia.us>

30 de abril de 2017 16:35

Para: Douglas Araujo de Moura <douglas.ademoura@gmail.com>

<https://www.dropbox.com/s/jxfliddaz1os0jow/ACEC%20ULTRA%20HIGH%20PERFORMANCE%20CONCRETE.pptx?dl=0>

Sent from my U.S. Cellular® Smartphone