

Passarela de *ultra-high performance concrete* (UHPC) para pedestres

DIEGO SCHNEIDER - ROBERTO CHRIST – Unisinos; JÉSSICA PACHECO – PhD Engenharia

Em 2023, por iniciativa do então Presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, ferrenho defensor da sustentabilidade e inovação das estruturas de concreto, a equipe do ITT Performance desenvolveu o projeto da primeira passarela em Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) do Brasil. Esta passarela foi apresentada no 64º Congresso Brasileiro do Concreto, realizado em Florianópolis cuja bandeira foi “Concretizando a inovação e a sustentabilidade”.

Em agosto de 2024, por grande empenho do Presidente atual, Eng. Julio Timerman, Paulo Helene e Jéssica Pacheco, com apoio da socióloga Cássia Felet, a passarela foi gentilmente transferida pela Cassol, para a cidade de São Paulo e instalada em uma comunidade carente, onde será amplamente utilizada (Foto 1). A passarela foi construída pela empresa Cassol Pré-Fabricados, com grande empenho do Eng. Felipe Cassol. O projeto estrutural foi elaborado pelo Prof. Diego Schneider, da Unisinos. O traço do UHPC foi desenvolvido pelo coordenador do ITT Performance (UNISINOS), Prof. Dr. Roberto Christ, que utilizou seu método de dosagem, objeto de sua tese de doutorado, para desenvolver o UHPC dessa passarela emblemática.

1. DESCRIÇÃO

A passarela é classificada como um elemento estrutural pré-fabricado e constituída integralmente por *Ultra-high Performance Concrete* (UHPC), sendo concebida para a passagem de pedestres. A geometria utilizada para o projeto estrutural foi de um arco com apoios deslocáveis na horizontal. Normalmente, os arcos são estruturas que funcionam predominantemente à compressão, mas, para isso, os apoios não podem ter deslocamento horizontal. Devido à inexistência de apoios fixos no local, a passarela foi concebida com apoios móveis, fazendo com que existam esforços de flexão.



Foto 1: Passarela instalada sobre o córrego no bairro do Jardim Marilu, em São Paulo

Contudo, devido à estrutura ser pré-fabricada, foi necessário criar uma espécie de “embalagem” para garantir o transporte seguro das peças. Isso é necessário para acomodar as peças de forma segura e evitar possíveis falhas devido à sua esbeltez. Algumas armaduras foram adicionadas a fim de evitar fissuras, principalmente nas letras, e para poder fixar os dispositivos de conexão do guarda-corpo com a passarela.

2. DADOS DA ESTRUTURA

A passarela é caracterizada pelas seguintes características técnicas:

- ▶ comprimento: 860 cm;
- ▶ largura: 200 cm;
- ▶ dimensões das vigas laterais: 31 x 10 cm;
- ▶ espessura da laje: 10 cm;
- ▶ espessura do guarda-corpo: 5 cm;
- ▶ volume total de UHPC: 2,5 m³;
- ▶ resistência característica à compressão do UHPC = 120 MPa
- ▶ resistência característica à tração do UHPC = 20 MPa
- ▶ módulo de elasticidade do concreto = 40 GPa
- ▶ modelo estrutural: estrutura em arco, com apoios móveis (horizontal).

3. CARGAS

As cargas admitidas no projeto estrutural foram as seguintes:

- ▶ Carga permanente (g): 960 kgf cada guarda corpo e 5.145 kgf a laje com as vigas;
- ▶ Carga acidental (q): 200 kgf/m².

4. CÁLCULO ESTRUTURAL

Neste item serão apresentados os cálculos dos esforços e dimensionamentos dos elementos estruturais. Para a análise estrutural, foram utilizadas as prescrições da prática recomendada do IBRACON/ABECE Estruturas de Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) e o software de elementos finitos SCIA Engineer® v.21.

4.1 Modelo estrutural

O modelo estrutural da laje é constituído por elementos de placa com apoio verticais fixos, um apoio horizontal fixo e outro deslizante na horizontal.

4.2 Esforços

Os esforços internos utilizados para as

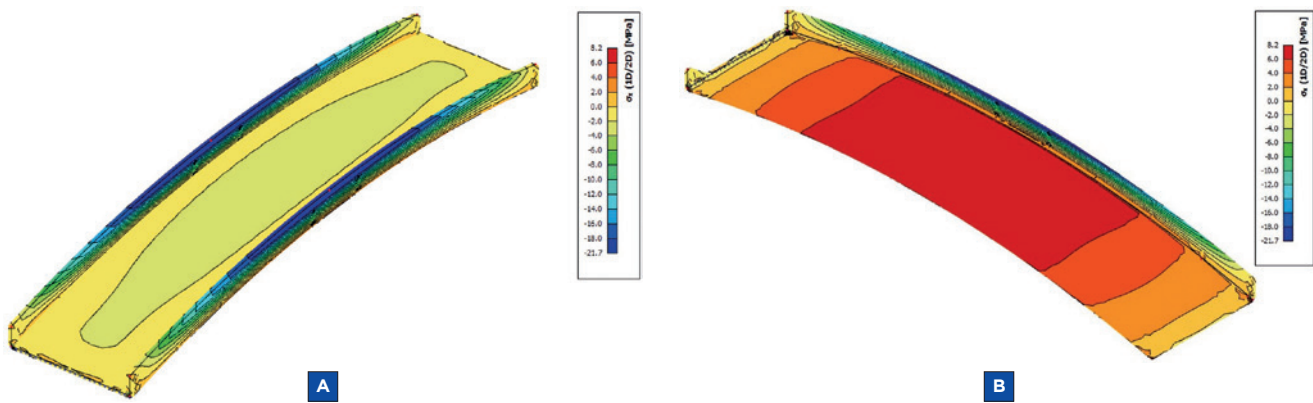


FIGURA 1
TENSÕES NA DIREÇÃO X DA FACE SUPERIOR (A) E NA FACE INFERIOR (B)

verificações são apresentados na Figura 1, bem como as tensões de tração (vermelho) e compressão (azul) máximas na face superior (a) e na face inferior (b) da base da passarela.

4.3 Dimensionamento

Para o dimensionamento da passarela, comparou-se a tensão solicitante de cálculo com a tensão resistente de cálculo. A tensão solicitante foi extraída diretamente do cálculo conforme apresentadas na Figura 1.

A tensão resistente de cálculo foi obtida conforme abaixo:

$$f_{ctk} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 20 * 0,7 = 14 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 14 / (1,4 * 1,2) = 8,33 \text{ MPa}$$

5. TRAÇO DO UHPC

O desenvolvimento do traço foi obtido por meio do método de dosagem UNISINOS, desenvolvido por Christ (2019), para obter as proporções ideais entre os constituintes. O Índice de Desvio do Empacotamento da mistura (IDE) encontrado com o empacotamento dos materiais foi de 199. Na Figura 2, é apresentada a curva da

mistura e a curva do empacotamento perfeito, segundo Funk e Dinger (1980).

Os insumos utilizados para confecção do UHPC são nacionais. Os materiais utilizados foram: Cimento CP V-ARI, Cimento sulfoaluminato, sílica ativa, cinza volante, areia de quartzo com granulometria específica e lavada utilizada em fundição, aditivo superplastificante e fibra de aço reta com fator de forma de 32,5. O consumo de materiais por m³ é apresentado na Tabela 1.

6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC

O projeto estrutural da passarela utilizou como premissa valores característicos das propriedades mecânicas, sendo elas de resistência à compressão de 120 MPa, resistência à tração de 20 MPa e módulo de elasticidade de 40 GPa.

Um estudo preliminar foi realizado para obter as propriedades mecânicas do traço desenvolvido para confecção da passarela. Este estudo foi realizado no itt Performance/UNISINOS, utilizando os materiais fornecidos pela empresa de pré-fabricado Cassol. As propriedades mecânicas obti-

das no traço desenvolvido estão apresentadas na Tabela 2.

7. CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE DO UHPC

Os critérios de durabilidade foram adotados com base no local da instalação da passarela, a cidade de Florianópolis:

- ▶ Classe de Agressividade Ambiental: III;
- ▶ Classificação geral do tipo de ambiente: Urbano/Industrial ou Marinho;

O UHPC apresenta uma elevada durabilidade, a classe de agressividade ambiental onde a passarela será instalada requer cuidados, principalmente com relação ao ataque de cloretos. O traço desenvolvido para execução da passarela, apresenta elevada durabilidade, as características, bem como os seus valores característicos, são apresentados na Tabela 3.

Devido a essas propriedades, o UHPC apresenta elevada durabilidade. Para efeito de vida útil de projeto (VUP), com base nessas propriedades de durabilidade, considerando o ambiente onde a passarela ficará e algumas simplificações, teremos uma VUP de 300 anos. Para chegar nesta VUP, foi utilizado o modelo de previsão proposto

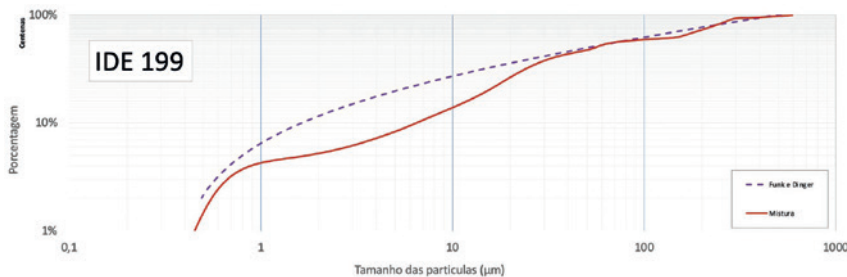


FIGURA 2
CURVA DE EMPACOTAMENTO DA MISTURA E DO EMPACOTAMENTO PERFEITO COM O IDE DA MISTURA

TABELA 1
QUANTITATIVOS DOS CONSTITUINTES DO TRAÇO

Materiais	kg/m ³
Cimento CP V-ARI	554
Cimento sulfoaluminato	62
Sílica ativa	185
Cinza volante	267
Areia quartzo 60/70	985
Água	203
Superplastificante PEC	50
Fibra metálica 0,4/13	196

TABELA 2

PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS NO ESTUDO EXPERIMENTAL

Propriedades	7 dias	28 dias	91 dias
Resistência à compressão (MPa)	55	103	138
Resistência à tração (MPa)	11	23	26
Módulo de elasticidade (GPa)	21	38	45

por Clear e Hey em 1973. Não há ainda um modelo consensado e específico para determinar a VUP de um UHPC.

8. SUSTENTABILIDADE

Esta parte da especificação técnica referente à sustentabilidade foi desenvolvida pela Prof^a Edna Possan da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, uma das referências na área.

O UHPC é um concreto com propriedades mecânicas e durabilidade elevadas. Possui diversas aplicações, possibilitando a desmaterialização (redução de consumo de material) e a descarbonização (redução da pegada de CO₂ por m²/m³) de construção. Na Tabela 4, tem-se as emissões de CO₂ associadas à produção de uma tonelada de material.

Além da avaliação da emissão de CO₂ equivalente do traço, é importante analisarmos o indicador de produção e de eficiência do traço. Para a estrutura desenvolvida com relação ao volume de concreto utilizado e área construída,

foram encontrados os valores da Tabela 5.

Considerando que o concreto produzido possui resistência à compressão aos 91 dias de 130 MPa, o Índice de Ligante - IL, que representa o consumo de cimento para produzir 1,0 MPa de resistência à compressão é de 3,4 kgC.m³/MPa. O Índice de Carbono - IC - quilogramas de CO₂ para produzir 1 MPa é 7,0 kgCO₂.m³/MPa.

Para uma vida útil de projeto da estrutura de 300 anos, a quantidade de material para produzir 1 m² de estrutura é de apenas 0,07 m³. A pegada de carbono por m² de área construída é de 66,0 kg.CO₂/m².

9. CONCLUSÃO

A passarela em Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) é um marco de inovação na engenharia estrutural brasileira, comprovando a viabilidade técnica e a sustentabilidade de materiais avançados. Sua concepção alia ciência e prática para oferecer soluções mais eficientes e duráveis à construção civil, destacando-se como um exemplo de integração entre inovação

TABELA 3

CARACTERÍSTICAS REFERENTE A DURABILIDADE DO TRAÇO UTILIZADOS

Propriedades	Valores
Massa específica	2360 kg/m ³
Absorção de água	0,040 kg/m ² /h ^{0,5}
Coefficiente de carbonatação	0,10 mm a ^{0,5}
Absorção à água	2%
Permeabilidade rápida ao cloreto	1*10 ⁻¹² m ² /s
Permeabilidade ao oxigênio (Kapp)	4*10 ⁻¹⁹ m ²

tecnológica e responsabilidade ambiental.

Com uma vida útil de projeto de 300 anos, a estrutura reafirma o enorme potencial do UHPC para criar obras duráveis e eficientes. Além disso, este projeto estabelece um novo padrão no uso de materiais de alta performance, evidenciando como a descarbonização e a desmaterialização podem revolucionar o setor, promovendo sustentabilidade e elevando os padrões de qualidade na construção civil.

10. RESPONSABILIDADES

O projeto estrutural bem como as especificações do projeto são de autoria dos projetistas Eng. Civil Ms. Diego Schneider e Eng. Civil Alexandre Tem Cate Matté. As especificações dos constituintes e o desenvolvimento do traço do UHPC foram elaboradas pelo Eng. Civil Dr. Roberto Christ. A execução da estrutura ficou a cargo dos engenheiros da empresa de pré-fabricado Cassol. 🌱

TABELA 4EMISSIONES DE CO₂-EQ PARA PRODUÇÃO DE 1 M³ DE MATERIAL

Material ¹	kg/m ³	kg.CO ₂ eq/kg	Fonte	Total (kg/m ³)
Cimento CP V ARI ²	554	0,7488	(WBCSD, 2019)	414,83
Cimento sulfoaluminato	62	0,962	(EDP RECIPRO40, 2021)	59,64
Sílica ativa ³	185	0,014	(RCP, NSF, 2025), (NORCHEM, 2027)	2,59
Cinza volante ³	267	0,00185	(RCP, NSF, 2025), (EPD Eminent A/S, 2020)	0,49
Areia quartzo 60/70	985	0,01251	(SIDAC, 2023)	12,32
Água ⁴	203	0	—	0,0
Superplastificante	50	1,53	(EPD EFCA, 2021)	76,5
PEC	—	—	—	—
Fibra metálica 13/0,4	200	2,023	(EDP 251/201, 2021)	404,60

¹ ESCOPO DO BERÇO AO PORTÃO. NÃO CONSIDERADO EMISSÕES DE TRANSPORTE DOS MATERIAIS ATÉ O LOCAL DE APLICAÇÃO;

² EMISSÃO DO CLÍNGUER DE 0,832 kg.CO₂/t, CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018) CONSIDEROU-SE QUE O CIMENTO CP V TEM 10% DE SUBSTITUIÇÃO (GIPSITA E FILLER);

³ AS REGRAS DE CATEGORIA DE PRODUTO (PCR) RECONHECEM CINZAS VOLANTES, SÍLICA ATIVA E ESCÓRIA COMO MATERIAIS RECUPERADOS E, PORTANTO, OS IMPACTOS AMBIENTAIS ATRIBUÍDOS A ESSES MATERIAIS SÃO LIMITADOS AO TRATAMENTO E TRANSPORTE NECESSÁRIOS PARA USO COMO INSUMO DE MATERIAL DE CONCRETO;

⁴ NÃO COMPUTADA POR FALTA DE DADOS NACIONAL E INTERNACIONAIS SOBRE A PEGADA DE CARBONO.

TABELA 5

INDICADORES DE PRODUÇÃO E DE EFICIÊNCIA

Indicadores de produção	
f _c aos 91 dias (MPa)	138,0
Área total construída – tabuleiro e guarda corpo (m ²)	36,8
Volume de concreto total (m ³)	2,5
Indicadores de eficiência	
Consumo de material (m ³ /m ²)	0,07
Rendimento (m ² /m ³)	14,72
IL (kgC.m ³ /MPa)	3,4
IC (kgCO ₂ .m ³ /MPa)	7,0
Pegada de carbono por m ² de área construída (kgCO ₂ /m ²)	66,0