

Boulevard Matarazzo: logística da execução das estruturas de concreto favorecendo a sustentabilidade

MAURICIO LINN BIANCHI – DIRETOR DE ENGENHARIA

JOSÉ RODRIGO TAVARES – GERENTE DE CONTRATOS

ERCIO THOMAZ – CONSULTORIA DE CONCRETO

BOULEVARD MATARAZZO

RESUMO

CONCRETOS CONVENCIONAIS, ADENSADOS COM VIBRADORES DE AGULHA, DEMANDAM PERÍODOS DE TEMPO RELATIVAMENTE ELEVADOS PARA A MOLDAGEM DA ESTRUTURA, COM CONSIDERÁVEL TEMPO DE DESCARGA E DE UTILIZAÇÃO DE CAMINHÕES-BETONEIRA (BTs) E EQUIPAMENTOS DE BOMBAMENTO. O EMPREGO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA) PODE REPERCUTIR EM SENSÍVEL DIMINUIÇÃO NO TEMPO DE DESCARGA DAS BTs E DE UTILIZAÇÃO DAS BOMBAS, ENCOLHENDO O TEMPO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES E, CONSEQUENTEMENTE, REDUZINDO A EMISSÃO DE CO₂. NO PRESENTE ARTIGO ILUSTRA-SE

UM EMPREENDIMENTO CONSTITUÍDO POR DIVERSAS EDIFICAÇÕES (BOULEVARD MATARAZZO), ONDE SE PRIORIZOU O EMPREGO DE CAA EM FUNÇÃO DE DIVERSOS FATORES, INCLUINDO O DESEMPENHO AMBIENTAL. PARA O PRESENTE ARTIGO FORAM TOMADAS COMO AMOSTRAS FICHAS DE CONCRETAGENS REALIZADAS AO LONGO DE DOIS MESES, ONDE SE REGISTRAVAM HORÁRIOS DE CHEGADA, INÍCIO E FIM DE DESCARGA DAS BTs. COM BASE EM ESTIMATIVAS DE EMISSÃO, CONSTATA-SE QUE OS CAAs COLABORAM SIGNIFICATIVAMENTE PARA REDUZIR AS PEGADAS DE CARBONO GERADAS NAS OPERAÇÕES DE CONCRETAGEM.

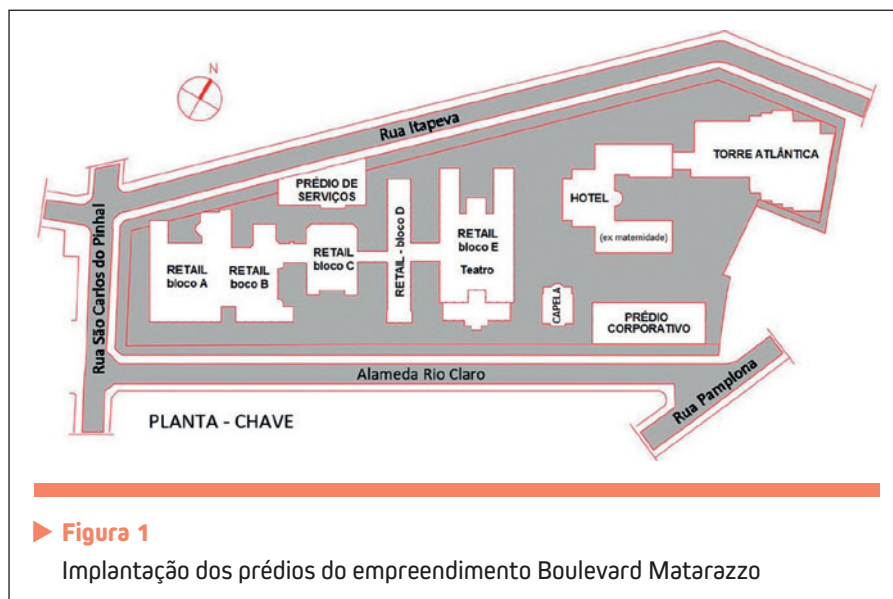
Palavras-chave: concreto autoadensável, concretagem, pegada de carbono.

I. ASPECTOS GERAIS DA OBRA

O empreendimento Boulevard Matarazzo localiza-se no coração da cidade de São Paulo, ocupando terreno com cerca de um alqueire delimitado pela Rua São Carlos do Pinhal, Rua Itapeva e Alameda Rio Claro, a um quarteirão da Avenida Paulista. Compreende obras de restauro e retrofit da Capela Santa Luzia, do antigo Hospital Humberto Primo (Hospital Matarazzo) e da Maternidade Filomena Matarazzo, construções com pouco mais ou pouco menos de um século e que, até o início das obras em 2014, estavam desativadas há mais de vinte anos, sofrendo os

consequentes efeitos deletérios do tempo e do clima.

A antiga maternidade abrigará agora um hotel de porte internacional



e no trecho do antigo hospital será implantada uma área de hospedaria, restaurantes e shopping center ("Retail"), além de um teatro com capacidade para 530 pessoas abaixo do nível do solo. Sob a capela Santa Luzia, haverá um cinema com capacidade para 108 pessoas, e abaixo dele mais quatro subsolos para estacionamento de veículos.

Além da recuperação e restauro das obras mencionadas, todas com grau máximo de tombamento pelo CONDEPHAAT e COMPRESP, o empreendimento incluiu novas construções, ou seja, um prédio de 25 pavimentos e sete subsolos (Torre Atlântica – ocupação mista, hotel e apartamentos residenciais), um prédio de quatro pavimentos e cinco subsolos (Torre Ayahuasca – prédio corporativo), um túnel ligando os subsolos dos dois prédios anteriores, e ainda um outro prédio de três pavimentos e três subsolos com lojas e equipamentos técnicos destinados a servir todo o complexo (central de ar condicionado, central de água fria etc). A implantação esquemática dos prédios é mostrada na Figura 1.

No planejamento geral da obra, atenção especial foi dada às características das estruturas de concreto, considerando o ciclo de vida/durabilidade pretendida (VUP potencial de 100 anos), processo construtivo com a mínima geração possível de ruídos (empreendimento cercado por prédios de apartamentos, clínicas médicas, universidade e outras), pegada de carbono, logística do suprimento de concreto (empreendimento inserido em área sujeita à Lei do Silêncio, com tráfego muito intenso de veículos

e de pessoas), escolha/maior proximidade possível das usinas de concreto fornecedoras, redução do tempo de espera das BTs, mínimo tempo de descarga do material, mínima interferência possível com o trânsito da região.

Levando em conta todos os aspectos acima e mais características peculiares das estruturas (espessura aparente colorido na Torre Atlântica, taxas de armadura etc) a Direção Técnica da obra (engenheiro Maurício

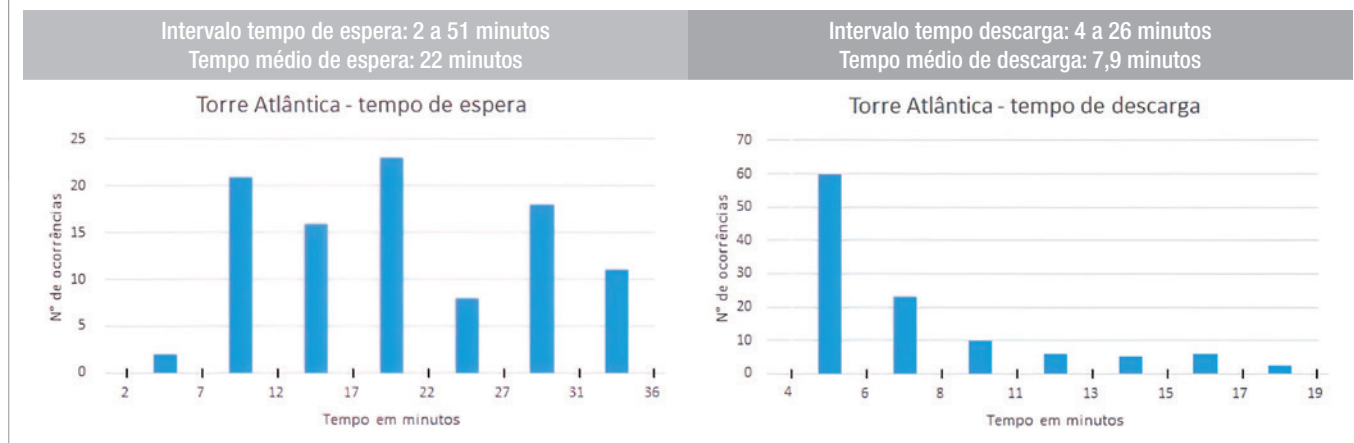
Bianchi), em conjunto com projetistas e consultores, optou pelas seguintes definições e princípios:

- ▶ emprego de concretos autoadensáveis sempre que possível (com máxima restrição ao uso de vibradores), admitindo-se concretos convencionais somente em peças com inclinações (escadas, rampas, fundações em sapatas, fundos inclinados de piscinas, etc.);
- ▶ prévio estudo de dosagem, visando ao melhor empacotamento dos agregados e, sempre que possível,



▶ **Figura 2**

a) Bomba-lança, b) mastro hidráulico, c) mastro mecânico e d) bico de irrigação



- emprego de cimentos compostos com escória de alto forno;
- projeto e fabricação cuidadosa de fôrmas, inclusive com o emprego de vedantes especiais também nos tensores de travamento das fôrmas de vigas e pilares (“agulhas”), redundando estanqueidade condizente com o CAA;
 - emprego de guias para movimentação de armaduras (pré-cortadas e/ou pré-montadas), de fôrmas e cimbramentos, e de equipamentos em geral (compressores de

- ar, prensas para emendas de armaduras com luvas, distribuidora mecânica de concreto, máquinas de hidrojateamento, etc.);
- aluguel de terreno fronteiriço à obra (funcionando como um pulmão para o estacionamento de BTs na fase de maior aplicação de concreto);
 - rígida programação de fornecimento dos concretos, às vezes com duas ou até três frentes simultâneas de concretagem;
 - emprego de equipamentos especiais de lançamento do concreto

- (bomba-lança sempre que possível, mastro hidráulico de distribuição, mastro mecânico/“spider”), conforme Fig. 2;
- provisão de equipamentos de reserva (bombas de concreto, tubulações, abraçadeiras, mangotes, máquinas de solda, ferramentas diversas);
 - obrigatoriedade de cura úmida nas lajes logo após a concretagem, inclusive com o emprego de bicos aspersores (de irrigação) nas lajes de grandes dimensões (Fig. 2);
 - obrigatoriedade de planos de concretagem em todas as situações, com prévia aprovação da equipe de gerenciamento (Tessler Engenharia).

► Tabela 1 – Características do CAA e das concretagens – Torre Atlântica

| Empresas / consultorias | Características do concreto |
|---|--|
| <p>Projeto de arquitetura: Triptyque/Jean Nouvel (fachada) Projeto de fundações: Maffei Engenharia Projeto de estruturas: JKMF Construtora: RFM/Sérgio Porto Concreteira: Engemix/Supermix</p> | <p>Consultoria concreto: PhD e Deseq f_{ck}: 60 MPa Slump flow: 660 a 750 mm Tipo de cimento: CP V ARI RS Volume total de concreto: 17.880 m³ Número total de BTs: 2.557</p> |
| <p>Equipamentos de concretagem: bomba estacionária, mastro hidráulico, mastro mecânico</p> | |

2. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DAS EDIFICAÇÕES

2.1 Torre Atlântica

Estrutura encontra-se totalmente concluída, sendo que o prédio foi executado com concreto aparente colorido, apresentando piscina de 18 x 6 x 1,6 m no apartamento duplex de cobertura e 108 diferentes tipos de terraços conforme ilustrado na Fig. 3. As principais características do concreto e das concretagens, incluindo os

► Tabela 2 – Características do concreto e das concretagens – Prédio Corporativo

| Empresas / consultorias | Características do concreto |
|---|--|
| <p>Projeto de arquitetura: Triptyque/Rudy Ricciotti (fachada) Projeto de fundações: Maffei Engenharia Projeto de estruturas: JKMF Construtora: MPD Concreteira: Cortesia</p> | <p>Consultoria concreto: Paulo Bina f_{ck}: 40 MPa Slump flow: 550 a 650 mm Tipo de cimento: CP II E 40 Volume total de concreto: 12.081 m³ Número total de BTs: 1.710</p> |
| <p>Equipamentos de concretagem: bomba estacionária, bomba-lança, grua e çaçamba</p> | |



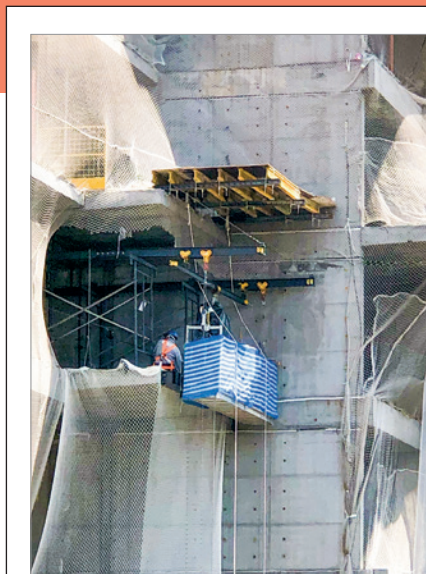
correspondentes subsolos, são apresentadas na Tabela 1.

2.2 Prédio corporativo (edifício Ayahuasca)

Estrutura totalmente concluída, executada com concreto aparente na sua cor normal, prédio totalmente envolvido por lianas pré-moldadas com UHPC – *Ultra High Performance Concrete* e sistema de energia solar na cobertura (Fig. 4), apresentando no nível do 1º subsolo salão de festas (“ballroom”) com pé direito duplo e vão livre em torno de 30 x 30 m, teto sustentado por vigas em concreto protendido com seção de 0,60 x 1,60 m (Fig. 5). As principais características do concreto e das concretagens, incluindo os correspondentes subsolos, são apresentadas na Tabela 2.

2.3 Prédio de serviços

Obra em fase final de execução, com elementos internos em concreto aparente e fachadas revestidas com tijolinhos de barro cozido (produto de demolições), abrigando no térreo di-

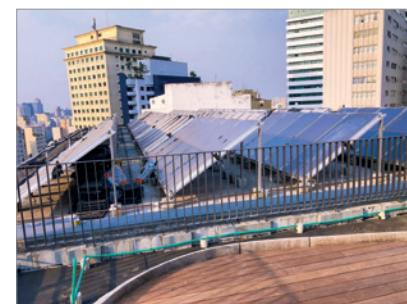


► **Figura 3**

Torre Atlântica em construção: concreto colorido e terraços diferenciados

versas lojas voltadas para a Rua Itapeva. Os três subsolos alojam central de água gelada, central de ar condicio-

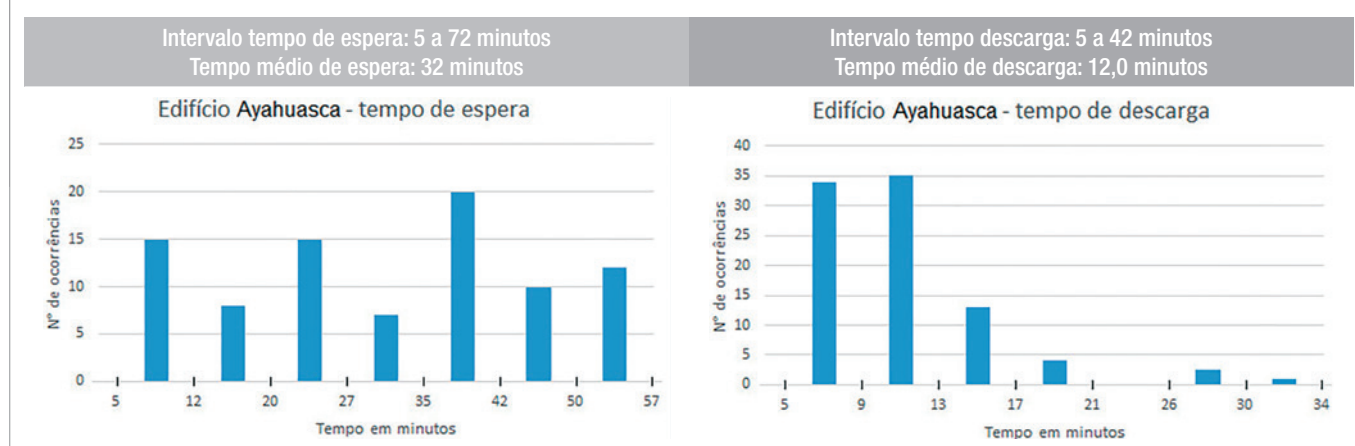
nado, subestação de energia e outros, derivando desse prédio tubulações de grande diâmetro que alimentam todos

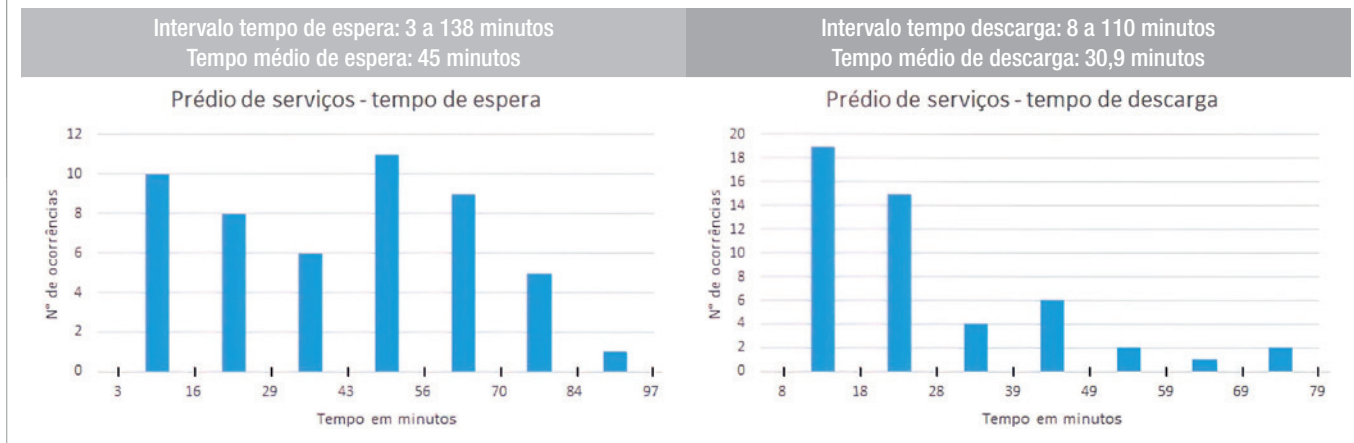


► **Figura 4**

Torre Ayahuasca – lianas em UHPC e sistema de energia solar na cobertura

► **Gráfico 2 – Distribuição dos tempos de espera e descarga das BTs na concretagem do Edifício Ayahuasca ao longo de dois meses**





os edifícios do complexo. As fundações foram executadas com concreto convencional (adensamento com vibradores) e a parte restante com concreto autoadensável. Com vistas a estabelecer parâmetros de comparação com

o CAA, as principais características do concreto empregado nas fundações são indicadas na Tabela 3, apresentando-se na Fig. 6 fotos dos equipamentos mencionados.

3. O EMPREGO DE CAA E A PEGADA DE CARBONO

Com a finalidade de estabelecer comparações, foram solicitados dados

► Tabela 3 – Características do concreto convencional – Prédio de Serviços

| Empresas / consultorias | Características do concreto |
|---|---|
| <p>Projeto de arquitetura: SPOL Architects Projeto de fundações: Maffei Engenharia Projeto de estruturas: JKMF Construtora: MCDI Concreteira: Conceserv/Cortesia</p> | <p>Consultoria concreto: Ercio Thomaz f_{ck}: 40 MPa Slump: 12±2 cm Tipo de cimento: CP II E 40 Volume total de concreto: 2.716 m³ Número total de BTs: 331</p> |
| <p>Equipamentos de concretagem: grua, caçamba, vibradores e bomba-lança</p> | |



► **Figura 5**

Torre Ayahuasca – fase de armação do teto do ballroom (vão de 30 x 30 m, vigas de 0,60 x 1,6 m e concretagem já executada)



► **Figura 6**

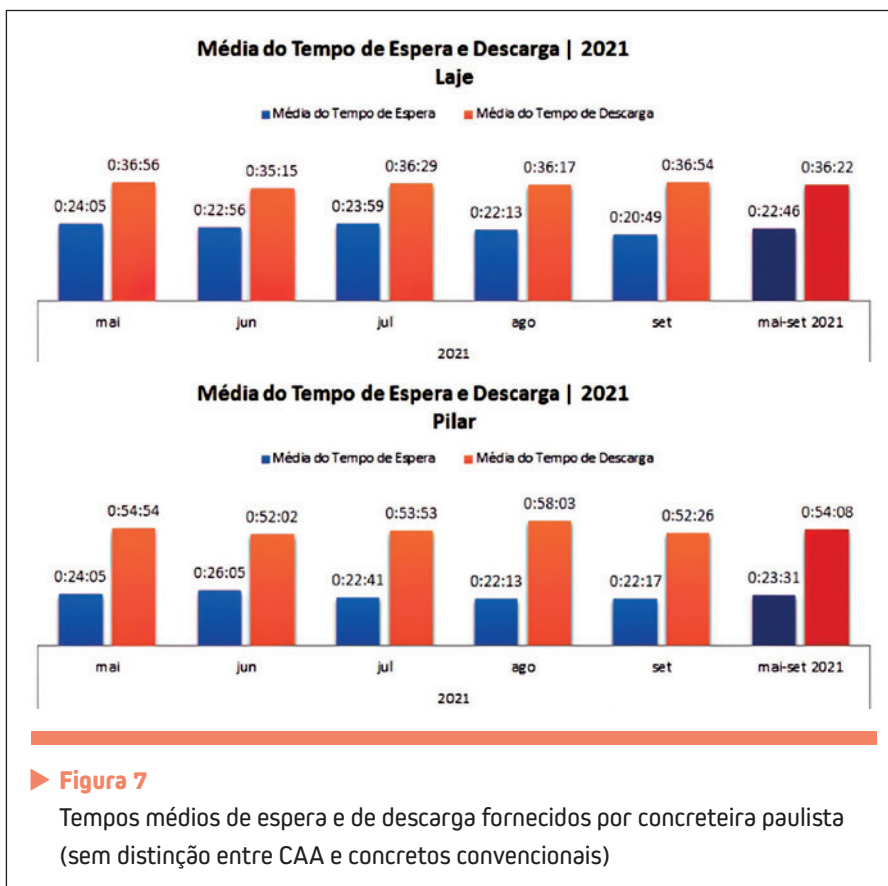
Sistema de refrigeração de água no topo do prédio e acabamento das fachadas com tijolinhos de barro cozido

médios a três concreteiras que atuam no estado de São Paulo, sendo que apenas uma enviou os levantamentos reproduzidos na Fig. 7.

Nas comparações, além dos valores médios acima, serão considerados dados da tabela 3 anterior, considerando tanto execução da estrutura com CAA como com concreto convencional / adensamento com vibradores, resumindo-se os dados na Tabela 4.

Observa-se que os dados fornecidos pela concreteira distinguem entre concretagens de pilares e concretagens de vigas e lajes, mas não fazem distinção entre os tipos de concreto convencional e autoadensável; relativamente ao tempo de espera, não foi indicada diferença significativa, tendo sido registrado tempo médio de 23 minutos num ou noutro caso. Já, para a descarga, indicou-se, entre maio e setembro de 2021, tempos médios de descarga respectivamente de 54 minutos para os pilares e 36 minutos para vigas e lajes, assumindo-se no presente artigo para fins de comparação o valor médio de 45 minutos.

Os registros obtidos na obra Mata-razzo, mesmo com todas as providências de logística que foram adotadas, indicam tempos de espera ligeiramente maiores, ou seja, 22 minutos para a Torre Atlântica (17.880 m³ de concreto), 32,3 minutos para a Torre Ayahuasca (12.080 m³ de concreto) e 45 minutos para o prédio de serviços (2.716 m³ de concreto), verificando-se a média ponderada de 28 minutos. Pelo mesmo critério, verifica-se para o tempo médio de descarga o valor de 11 minutos, embora com notável diferença para as concretagens com



► **Figura 7**
Tempos médios de espera e de descarga fornecidos por concreteira paulista (sem distinção entre CAA e concretos convencionais)

CAA (8 e 12 minutos respectivamente) e concretagens com concreto convencional (31 minutos).

Relativamente aos balanços da potencial emissão de carbono, do ponto de vista dos serviços de concretagem deve-se considerar que, durante o

tempo de espera apenas o motor do caminhão estará em funcionamento, enquanto que durante o tempo de descarga estarão em funcionamento tanto o motor do caminhão como o motor da bomba, assumindo-se que os dois equipamentos têm motores iguais

► **Tabela 4 – Estatísticas de concretos convencionais e concretos autoadensáveis**

| Origem dos dados | Tempo de espera das BTs (min) | Tempo de descarga (min) |
|--|---|---|
| Torre Atlântica – tab. 1 (CAA) | Intervalo: 2 a 51; Média: 22,2 Moda: 10; Mediana = 20 | Intervalo: 4 a 26; Média: 7,9 Moda: 6; Mediana = 6 |
| Torre Ayahuasca – tab. 2 (CAA) | Intervalo: 5 a 72; Média: 32,3 Moda: 40; Mediana = 35 | Intervalo: 5 a 42; Média: 12,0 Moda: 10; Mediana = 10 |
| Prédio de serviço tab. 3 (concreto convencional) | Intervalo: 3 a 138; Média: 44,6 Moda: 75; Mediana = 44 | Intervalo: 8 a 110; Média: 30,9 Moda: 20; Mediana = 28 |
| Dados de concreteira (pilares) | Média = 23 minutos | Média = 54 minutos |
| Dados de concreteira (vigas e lajes) | Média = 23 minutos | Média = 36 minutos |

(potência em torno de 200HP, com-bustível óleo diesel).

Para a realização das estimativas adotou-se:

- ▶ cimento CP II E → gera 0,6 kg de

CO₂ / kg de cimento;

- ▶ cimento CP V ARI → gera 0,8 kg de

CO₂ / kg de cimento;

- ▶ $\gamma_{cim} = 3,15g/cm^3$

$\gamma_{agregados} = 2.65g/cm^3$;

- ▶ consumo de diesel do caminhão-betoneira durante a espera = 1 litro/hora;

- ▶ consumo de diesel do caminhão-betoneira durante a descarga = 2 litros/hora;

- ▶ consumo de diesel da bomba para lançamento a 30 metros de altura = 0,4 L/m³;

- ▶ consumo de diesel da bomba para lançamento a 60 metros de altura = 0,6L/m³;

- ▶ consumo de diesel da bomba para lançamento a 90 metros de altura = 0,9L/m³;

- ▶ consumo de diesel da bomba para lançamento a 120 metros de altura = 1,2L/m³;

- ▶ fator médio de emissão de carbono com a queima do diesel = 2,6kg CO₂/L.

Com base nos valores acima, e supondo-se que todo o consumo de cimento dos traços visou apenas aspectos de resistência mecânica e durabilidade, a redução da emissão de CO₂ para os dois prédios de maior consumo de concreto encontra-se resumida na Tabela 5.

Para as fundações do prédio de serviços, adensamento com vibradores, foi, em geral, empregado concreto com $f_{ck} = 40$ MPa, abatimento de 12 ± 2 cm e traço de 1 : 0,81 : 1,12 : 0,83 : 1,94 : 0,5 (cimento CP II E 40, areia natural, areia de brita, brita 0, brita 1, a/c), e consumo somado de aditivos RA-2 e polifuncional de 1%. Para tal concreto, verifica-se argamassa = 2,93 e concreto = 5,70 resultando $\alpha = 0,51$. O consumo teórico de cimento para cada metro cúbico desse concreto $[C = 1000 / (1/\gamma_{cim} + 1/\gamma_{areia} + 1/\gamma_{B0} + 1/\gamma_{B1} + a/c)]$ atinge 387 kg/m³.

Para o concreto autoadensável da Torre Atlântica, foi em geral empregado

▶ Tabela 5 – Balanço aproximado da emissão de CO₂ para Torres Atlântica e Ayahuasca (supondo-se que o conteúdo de cimento no traço vise somente a resistência e durabilidade)

| Dados | Torre Atlântica | Torre Ayahuasca |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Volume total de concreto | 17.880 m ³ | 12.080 m ³ |
| Número total de caminhões-betoneira | 2.557 | 1.710 |
| Altura máxima de lançamento | 90 m | 30 m |
| Resistência característica do concreto | 60 MPa | 40 MPa |
| Tipo de cimento | CP V ARI RS | CP II E 40 |
| Tempo médio de espera | 22 min | 32 min |
| Tempo total de espera | 2.557*22 = 56.254 min | 1.710*32 = 54.720 min |
| Consumo de diesel espera BT | 56.254/60*1 = 938 L | 54.720/60*1 = 912 L |
| Emissão de carbono espera BT | 938*2,6/1000 = 2,4ton | 912*2,6/1000 = 2,4 ton |
| Tempo médio de descarga | 7,9 min | 12 min |
| Tempo total de descarga | 2.557*7,9 = 20.200 min | 1.710*12 = 20.520 min |
| Consumo de diesel descarga BT | 20.200/60*2 = 673 L | 20.520/60*2 = 684 L |
| Emissão de carbono descarga BT | 673*2,6/1000 = 1,7 ton | 684*2,6/1000 = 1,8 ton |
| Consumo de diesel até H = 30m bomba | 17.880*0,4*1/3 = 2.384 L | 12.080*0,4 = 4.832 L |
| Consumo de diesel entre H = 30 e 60m | 17.880*0,6*1/3 = 3.576 L | — |
| Consumo de diesel entre H = 60 e 90m | 17.880*0,9*1/3 = 5.364 L | — |
| Emissão de carbono no bombeamento | (2384+3576+5364)*2,6 = 29,4 ton | 4.832*2,6/1000 = 12,6 ton |
| Total de CO ₂ emitido nas concretagens | 2,4 + 1,7 + 29,4 = 33,5 ton | 2,4 + 1,8 + 12,6 = 16,8 ton |
| Economia teórica de diesel espera BT ^a | 2*2.557(23-22) / 60*1 = 42,6 L | 1.710(23-32) / 60*1 = -256 L |
| Economia bombeamento BT+ bomba ^a | 2*2.557(45-7,9) / 60*2 = 6.324 L | 2*1.710(45-12) / 60*2 = 3.762 L |
| Redução na emissão de CO₂ | (42,6 + 6.324)*2,6 = 16,6 ton | (-256 + 3.762)*2,6 = 9,1 ton |

(^a) considerando tempos médios de espera e de descarga fornecidos pela empresa concreteira.



concreto com $f_{ck} = 60\text{MPa}$, slump flow = 660 a 750mm e traço de 1 : 1,29 : 0,91 : 1,44 : 0,62 : 0,43 (cimento CP V ARI RS, areia natural, areia de brita, brita 0, brita 1, a/c), e consumo somado de aditivos RA-2 e polifuncional de 1,35%. Para tal concreto verifica-se argamassa = 3,20 e concreto = 5,26, o que leva a $\alpha = 0,61$. O consumo teórico de cimento para cada metro cúbico do CAA, pela mesma fórmula anterior, resulta 425 kg/m³.

Com base nos traços reais anteriores, desconsiderando-se importantes diferenças entre os dois concretos (f_{cks} distintos; cimentos, agregados e aditivos diferentes) e presumindo-se que a diferença de consumo entre os traços (425 – 387 = 38 kg) seja atribuída apenas à maior necessidade de fluidez dos CAA, seriam verificados os seguintes acréscimos nas pegadas de carbono:

► **Torre Atlântica**

38 kg cim/m³ concreto x 0,8 kg CO₂/kg cim x 17.880 m³ concreto = 543 ton CO₂;

► **Torre Ayahuasca**

38 kg cim/m³ concreto x 0,8 kg CO₂/kg cim x 12.080 m³ concreto = 367 ton CO₂.

4. CONCLUSÕES


Com base nos pressupostos e aproximações aqui consideradas, verificou-se

importante redução na emissão de poluentes ao optar-se pelo concreto autoadensável, ou seja, a diminuição no tempo de espera e no tempo de descarga repercutiu cerca de 25 toneladas de CO₂ a menos comparativamente com concretos convencionais de categoria de resistência próxima, mas com adensamento a ser executado por meio de vibradores de imersão. Levando-se em conta que a emissão total gerada pelos dois prédios elencados foi estimada em 50,3 toneladas (33,5 + 16,8), ajuíza-se redução potencial de cerca de 30% do total de CO₂ que seria liberado para a atmosfera, número nada desprezível.

Nas comparações efetuadas, não foram consideradas tipologias / concepções de projeto (estruturas pilar-laje x convencionais, lajes planas x nervuradas etc), sendo que o partido arquitetônico e a concepção estrutural influem de maneira muito significativa no consumo de concreto e de aço e, por consequência, no CO₂ gerado desde a extração das matérias primas, transformação, transporte e aplicação. Não foram também considerados outros poluentes, como NOx, compostos halogenados, dióxido de enxofre etc., com menor potencial de degradação ambiental pelo efeito estufa. Nas comparações também não se levaram em conta cargas de CO₂ advindas da presença no traço de adições

e aditivos, produção de agregados, fôrmas, escoramentos, lavagem de BTs e outros fatores.

Os traços de concreto das edificações do complexo Boulevard Maratarazzo foram sempre estabelecidos pensando-se numa VUP de 100 anos, o que justifica consumos da ordem de 400 quilogramas de cimento por metro cúbico de concreto. Do ponto de vista da emissão direta de carbono, contudo, caso este consumo viesse a ser determinado unicamente pelo critério de fluidez, a quantidade a mais de cimento necessária resultaria em emissão incomparavelmente maior de CO₂, conforme acima demonstrado.

Todavia, há que se ressaltar que, do ponto de vista do ciclo de vida completo de uma edificação e de seu sistema estrutural, se, de um lado, o maior consumo de cimento repercute em maior emissão inicial de CO₂, por outro lado, tende a repercutir na maior durabilidade da obra, dando origem a concretos com menor porosidade, maior reserva alcalina, maior resistência à penetração de agentes agressivos etc. Sem mencionar que concretos com maior consumo de cimento / maior resistência mecânica têm o potencial de produzir estruturas mais esbeltas, ou seja, com menor consumo de concreto e eventualmente com menores taxas de armaduras. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Belizário-Silva, Fernanda et ali. Stakeholder influence on global warming potential of reinforced concrete structure. Journal of Building Engineering 44, 2021.
- [2] Belizário-Silva, Fernanda et ali. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. In IBRACON Revista Concreto e Construções — edição 98, abril/junho de 2020.
- [3] John, Vanderley Moacir et ali. Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção. In IBRACON Revista Concreto e Construções — edição 100, outubro/dezembro de 2020.
- [4] Souza, Milena Pinto Rodrigues. Avaliação das emissões de CO₂ antrópico associadas ao processo de produção do concreto, durante a construção de um edifício comercial, na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo 2012.
- [5] Soares, Jeferson Borghetti. Potencial de conservação de energia e de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para a indústria brasileira de cimento Portland até 2015. Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1998.