

AS APLICAÇÕES DE AÇO CA-70

ESTUDO DEMONSTROU QUE A SUBSTITUIÇÃO DO CA-50 PELO CA-70 EM PONTE EM LAJE RESULTOU EM REDUÇÃO DE 7,1% NO CUSTO TOTAL DA SUPERESTRUTURA. NA PONTE EM DUAS VIGAS, O GANHO FOI MAIS EXPRESSIVO: REDUÇÃO DE 9,1% NO CUSTO TOTAL. ESSA DIFERENÇA É EXPLICADA PELA MAIOR INFLUÊNCIA DO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS) NAS LAJES. OUTRO FATOR É A INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE EMENDA POR TRASPASSE. HÁ TAMBÉM ECONOMIA EM RELAÇÃO A MÃO DE OBRA, POIS HÁ MENOS AÇO A SER ARMADO

POR
 DANIEL MIRANDA DOS SANTOS *
 FERNANDO REBOUÇAS STUCCHI **
 LUCAS BRUM MILOS ***
 LUÍS FILIPE BATISTA CORDEIRO ARAÚJO ****
 RENAN MARTINS SACRAMENTO *****



DANIEL MIRANDA DOS SANTOS



FERNANDO REBOUÇAS STUCCHI



LUCAS BRUM MILOS



LUÍS FILIPE BATISTA CORDEIRO ARAÚJO



RENAN MARTINS SACRAMENTO

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é, historicamente, marcada por conservadorismo tecnológico e por um baixo índice de inovação quando comparada a outros setores industriais [1;6]. Além disso, a alta fragmentação e a complexidade inerente à cadeia produtiva da construção impõem barreiras significativas à adoção de novos métodos e materiais. Contudo, a crescente demanda global por eficiência produtiva e, sobretudo, por práticas que reduzam o impacto ambiental, tem exigido do setor uma postura mais receptiva ao avanço de novas soluções de engenharia de forma ampla [2].

No contexto brasileiro, o concreto armado consolidou-se ao longo do século XX como o principal sistema estrutural. Segundo Stucchi [3], a evolução da resistência dos aços destinados a estrutura de concreto, à luz do desenvolvimento da normalização de produtos, pode ser compreendida a partir de dois principais marcos ao longo do século passado, representados pelas normas EB3-1939 e EB3-1967.

O primeiro marco corresponde à primeira versão de uma norma nacional que especificava aços para concreto armado, na qual se indicavam os aços 37CA e 50CA, com tensões de escoamento de 240 MPa e 300 MPa, respectivamente. O segundo ampliou as categorias de aço para cinco classes, com resistências de 240 MPa, 320 MPa, 400 MPa, 500 MPa e 600 MPa, sendo o aço laminado mais resistente o de 500 MPa.

É possível perceber, assim, que o principal tipo de vergalhão empregado no Brasil hoje, o CA-50, permaneceu com resistência inalterada por aproximadamente 60 anos. Diante desse contexto, destaca-se a atuação pioneira e o protagonismo institucional da ArcelorMittal Brasil em parceria com a Universidade de São Paulo, que, por meio do convênio *Cátedra Construindo o Amanhã* conduziram o desenvolvimento de um aço laminado a quente com tensão de escoamento de 700 MPa. Essa iniciativa resultou

(*) Coordenador da EGT Engenharia, Professor Doutor da Escola Politécnica da USP

(**) Diretor da EGT Engenharia, Professor Titular da Escola Politécnica da USP

(***) Engenheiro da EGT Engenharia, mestrando pela Escola Politécnica da USP

(****) Especialista de Projetos da ArcelorMittal Brasil

(*****) Engenheiro de Projetos da ArcelorMittal Brasil, mestrando pela Escola Politécnica da USP

na introdução comercial desse material, em 2021, configurando um marco relevante para a evolução tecnológica dos aços para concreto armado no país.

Esse avanço tecnológico forneceu embasamento técnico para a atualização da ABNT NBR 7480 [11] — norma que, desde 1980, substitui a antiga EB3 (1967) —, cuja versão de 2024 ampliou o patamar de resistência dos aços para concreto armado ao incorporar a categoria CA-70, com tensão de escoamento de 700 MPa. A inclusão em norma ABNT dessa nova classe alinha o portfólio brasileiro de aços às práticas internacionais. Em mercados como os Estados Unidos e Europa, por exemplo, vergalhões com tensões de escoamento da ordem de 690 MPa e 700 MPa já são amplamente empregados.

Desde o seu lançamento no país, esse vergalhão de maior resistência tem passado por contínuos avanços técnico-comerciais, fomentando a articulação entre diversos agentes da cadeia da construção, como siderúrgicas, pesquisadores, projetistas de estruturas, construtores e centrais de serviço de beneficiamento de vergalhões. Os principais benefícios do CA-70 estão intrinsecamente ligados a sustentabilidade por desmaterialização, já que sua maior resistência permite, quando comparado ao CA-50, utilizar menos aço para suportar os mesmos esforços solicitantes. Como o CA-70 apresenta semelhante nível de emissões de carbono em sua produção quando comparado ao CA-50 — já que ambos são laminados a quente e com composição química semelhante —, a redução do volume de material empregado resulta em uma mitigação direta da pegada de carbono da obra. Adicionalmente, há ganhos secundários expressivos, como o aumento da produtividade e redução de custo nos serviços de armação, a redução do congestionamento de armaduras — especialmente em conexões — e consequente melhora da qualidade da concretagem, entre outros [4;5].

Mesmo com normalização de produto, a continuidade de ações de promoção técnico-comercial desse novo aço se mostra necessária para avanço do seu uso de modo amplo e seguro, e para promoção de atualização da principal norma nacional voltada ao dimensionamento e o detalhamento de estruturas de concreto armado, a ABNT NBR 6118. Diante disso, o presente artigo versará acerca da evo-

lução da disponibilidade comercial do vergalhão CA-70 e das suas aplicações, da evolução de pesquisas científicas e, por fim, serão apresentadas e discutidas duas soluções de pontes em concreto armado, uma em laje e outra sobre vigas, de características análogas às de padrão DNIT utilizando vergalhão CA-70 desenvolvida conjuntamente entre a Universidade de São Paulo, a EGT Engenharia e a ArcelorMittal Brasil com objetivo de difundir soluções de infraestrutura mais sustentáveis econômica, social e ambientalmente.

2. EVOLUÇÃO DO VERGALHÃO CA-70 NO PAÍS

Atualmente, a ArcelorMittal Brasil produz o vergalhão CA-70 em duas usinas localizadas em Piracicaba – SP e em Resende – RJ, que juntas produzem mais de 1,5 milhão de toneladas de aço anualmente. Com o alinhamento das ações ligadas ao (i) desenvolvimento técnico colaborativo entre engenheiros da ArcelorMittal Brasil, pesquisadores, projetistas de estruturas, entre outros acerca das aplicações do novo aço, (ii) da capacidade produtiva, (iii) da oferta de serviços de corte, dobra, armação e (iv) fornecimento para todo o território nacional, o vergalhão CA-70 tem,

paulatinamente, expandido sua presença nas obras nacionais.

Na ArcelorMittal Brasil, as vendas desse produto aumentaram mais de 200% em 2025 quando comparado ao ano anterior, além dele estar presente em mais de 70% das unidades federativas do país.

Na Figura 1, é apresentada uma linha do tempo com os principais marcos da evolução do vergalhão de 700 MPa no Brasil até o momento.

3. DISCUSSÕES NORMATIVAS E ABORDAGEM ADOTADA

O principal obstáculo ao uso do aço CA-70 em projetos estruturais no Brasil reside na sua ausência na ABNT NBR 6118:2023 [9], que rege o dimensionamento e o detalhamento de estruturas de concreto armado no país. Embora a ABNT NBR 7480:2024 [11] já estabeleça suas propriedades mecânicas e requisitos de certificação, a norma de projeto ainda não contempla diretrizes específicas para sua aplicação.

Não obstante, a ABNT NBR 6118:2023 [9] admite, na ausência de normalização nacional específica e em situações particulares, o emprego de normas internacionais — prática recorrente no projeto de obras especiais, como pontes estaia-

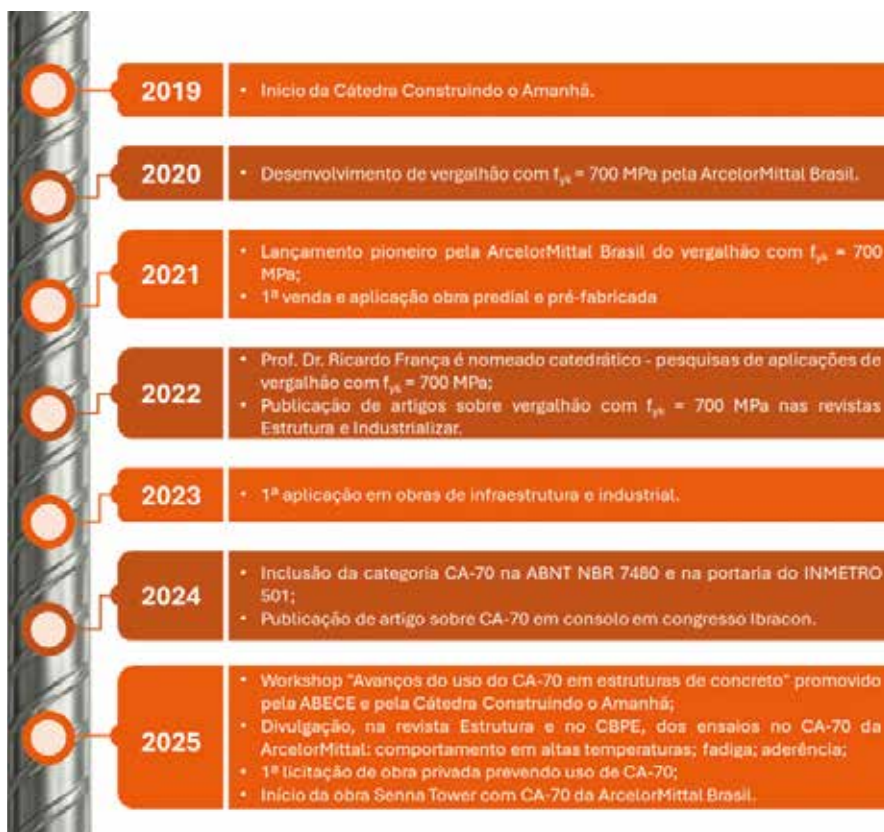


FIG. 1 - PRINCIPAIS MARCOS DO AVANÇO DO CA-70 NO BRASIL

das. Nesse contexto, a defasagem entre as normas de produto e de projeto tem levado a adoção de referências como o Eurocode 2 [15], o fib Model Code 2010 [17], o fib Model Code 2020 [18], ACI CODE 318-25 [21] e a Recomendação ABECE 008:2024 [8], a partir das quais podem ser formuladas hipóteses de projeto a serem devidamente justificadas caso a caso.

No que diz respeito ao comprimento de ancoragem e emenda por traspasse, as especificações da ABNT NBR 6118:2023 [9] são baseadas no CEB-FIP Model Code 1990 [14] e não foram atualizadas para contemplar aços com tensão de escoamento superior a 600 MPa. A formulação vigente assume que a resistência de aderência cresce proporcionalmente à tensão de escoamento do aço, sem incorporar a não linearidade observada experimentalmente. Esse comportamento já é reconhecido pelo fib Model Code 2010 [17], pelo fib Model Code 2020 [18] e pelo Eurocode 2 [15] em suas versões mais recentes, que aplicam coeficientes de correção que aumentam progressivamente o comprimento de ancoragem com o crescimento de f_{yk} [12]. A Figura 2 ilustra a distribuição da tensão de aderência ao longo do trecho ancorado das barras, conforme observado em resultados experimentais, os quais indicam que essa tensão não é uniforme, apresentando valores menores nas extremidades e maiores na região central do comprimento de ancoragem, com concreto mais confinado e afastado da face.

Ensaio de arrancamento (*pull-out*) realizados no Laboratório de Estruturas

e Materiais (LEM) da Escola Politécnica da USP, encomendados pela *Cátedra Construindo o Amanhã*, com barras de 12,5 mm da ArcelorMittal e duas formulações de concreto (média de três corpos de prova de $\approx 39 \text{ MPa}$ e $\approx 64 \text{ MPa}$), indicaram que, para níveis de tensão inferiores ao escoamento (condição típica de projeto), as resistências de aderência média e máxima dos aços CA-70 e CA-50 são essencialmente equivalentes [13].

Por outro lado, o comportamento do CA-70 no regime pós-escoamento ainda carece de investigação específica. O comprimento de ancoragem adotado no ensaio padrão (5 ϕ) mostrou-se insuficiente para provocar o escoamento das barras de CA-70, de modo que esse regime não pôde ser avaliado diretamente.

Para garantir uma comparação justa entre as soluções com CA-70 e CA-50, duas abordagens foram avaliadas: adotar integralmente o Eurocode 2 [15] para ambos os aços, o que implicaria abandonar as prescrições da ABNT NBR 6118 [9] até mesmo para o CA-50; ou manter as regras da ABNT NBR 6118 [9] para o CA-50 e aplicar apenas o fator de correção para ancoragem do Eurocode 2 [15] em função da mudança de f_{yk} ao dimensionar o CA-70. Esta segunda abordagem, detalhada na seção seguinte, foi a adotada.

A fadiga é outra lacuna normativa relevante, especialmente em pontes sujeitas a carregamentos cíclicos ao longo de toda a vida útil. A ABNT NBR 6118:2023 [9] não apresenta curvas S-N específicas para o CA-70, e tanto o Eurocode 2 [15] quanto o fib Model Code 2020 [18] adotam a premissa de que a resistência à fadiga independe da tensão de escoamento, aplicando os

mesmos limites de flutuação de tensão para diferentes classes de aço. Ensaio encomendados pela cátedra citada e realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) com vergalhões CA-70 de 16 mm da ArcelorMittal obtiveram coeficientes angulares da curva S-N de $k_1 = 5,88$ e k_2

– 12,49, frente a $k_1 = 5,0$ e $k_2 = 9,0$ do CA-50 segundo o fib Model Code 2010 [17], resultando em resistência 16% superior a 2 milhões de ciclos [7]. Ainda assim, enquanto essas curvas não são incorporadas às normas vigentes, este trabalho adotou, a curva do CA-50 prevista na ABNT NBR 6118:2023 [9].

De modo a conferir maior robustez às análises desenvolvidas neste trabalho, especialmente no que se refere à aderência e à fadiga do aço CA-70, ensaios experimentais vêm sendo conduzidos e deverão ser ampliados. Nesse contexto, prevê-se a realização de ensaios em escala reduzida dos projetos descritos a seguir, contemplando verificações nos estados limites de serviço (fissuração e abertura de fissuras) e nos estados limites últimos (resistência à flexão e fadiga à flexão).

Quanto à armadura de cisalhamento, a ABNT NBR 6118:2023 [9] limita a tensão de cálculo nas armaduras transversais a 435 MPa, o que torna, a princípio, inviável o aproveitamento da resistência adicional do CA-70 nos estribos. Essa restrição merece ainda futura investigação experimental específica, de modo que uma futura revisão da ABNT NBR 6118 [9] possa estabelecer regras adequadas para o CA-70 também no cisalhamento, confirmando ou não essa restrição. Para o estudo aqui realizado, não foram verificados critérios das normas internacionais para as armaduras de cisalhamento.

4. SOLUÇÕES EM CA-70 AVALIADAS PARA PONTES

4.1. Critérios Adotados

4.1.1. Ancoragem e Traspasse

A ABNT NBR 6118:2023 [9] especifica calcular o comprimento de ancoragem básico por meio das Equações (1) e (2), aplicáveis aos aços CA-25, CA-50 e CA-60:

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{db}} \geq 25\phi \quad (1)$$

Com:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (2)$$

Em que:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c ;$$

f_{ctk} , é a resistência do concreto à tração característica;

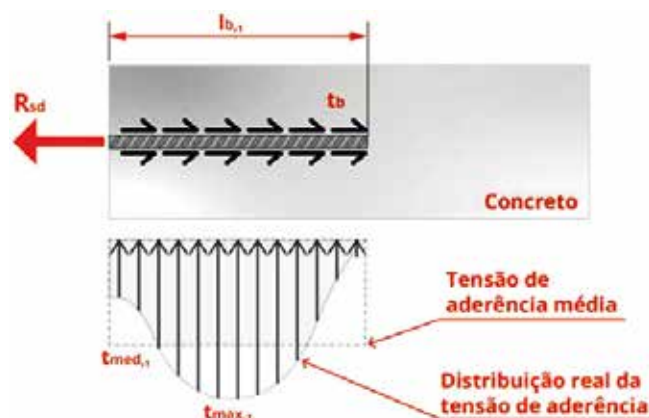


FIG. 2 – TENSÕES DE ADERÊNCIA AO LONGO DE TRECHO DE BARRA ANCORADA

f_{bd} , é a resistência à aderência de cálculo;

$\eta_1 = 2,25$ para aço CA-50;

$\eta_2 = 1,0$ para barras em boas condições de aderência;

$\eta_2 = 0,7$ para barras em más condições de aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para barras com diâmetro menor que **32 mm** ;

$\eta_3 = (132 - \phi)/100 \leq 1$ para barras com diâmetro maior ou igual à **32 mm** .

Essa formulação pressupõe que f_{bd} varia linearmente com f_{yd} , ou seja, não penaliza aços de maior resistência com comprimentos de ancoragem proporcionalmente mais elevados. Embora essa hipótese seja adequada para aços convencionais, ela tende a conduzir à subestimação dos comprimentos de ancoragem em aços de alta resistência, cujo comportamento de aderência não evolui na mesma proporção que f_{yk} .

Para mitigar essa limitação, a Recomendação ABECE 008:2024 [8] propõe, com base no fib Model Code 2010 [17], a introdução do fator η_4 .

Por sua vez, a versão mais recente do Eurocode 2 [15] revisou a formulação do comprimento de ancoragem, anteriormente similar à da ABNT NBR 6118:2023 [9]. De forma consistente, o fib Model Code 2020 [18] adota um equacionamento análogo ao do Eurocode 2 [15]. Por essa razão, optou-se, neste trabalho, pela utilização dessa abordagem.

O comprimento de ancoragem segundo o Eurocode 2 [15] pode ser calculado por:

$$l_{bd} = k_{lb} k_{cp} \phi \left(\frac{\sigma_{sd}}{435} \right)^{105} \left(\frac{25}{f_{ck}} \right)^{1/2} \left(\frac{\phi}{20} \right)^{1/3} \left(\frac{1,5\phi}{c_d} \right)^{1/2} \geq 10\phi \quad (3)$$

Em que:

$\phi/20 \geq 0,6$;

$25/f_{ck} \geq 0,3$;

$c_d = \min \{0,5c_s; c_x; c_y; 3,75\phi\}$;

$k_{cp} = 1,0$ para barras em boas condições de aderência;

$k_{cp} = 1,2$ para barras em más condições de aderência;

$k_{cp} = 1,4$ para barras utilizadas sob bentonita ou similares;

$k_{lb} = 50$ para situações de cálculo permanentes e transientes;

$k_{lb} = 35$ para situações de cálculo acidentais.

O comprimento de emenda pode ser calculado por:

$$l_{sd} = k_{ls} l_{bd} \geq 15\phi \quad (3)$$

Em que: $k_{ls} = 1,2$

O fator corretor da tensão de escoamento apresentado na Equação (3), conforme o Eurocode 2 [15] — que admite a utilização de aços com tensão de escoamento de até 700 MPa — corrige essa limitação por meio de um coeficiente explícito em função de σ_{sd} , conforme expresso a seguir:

$$\left(\frac{\sigma_{sd}}{435} \right)^{\eta_\sigma} = \left(\frac{700/1,15}{435} \right)^{1,5} = 1,4^{1,5} = 1,66 \quad (5)$$

Com isso, o comprimento de ancoragem adotado para o CA-70 é:

$$l_{b,nec} = 1,18 \alpha l_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (6)$$

Em que:

$\alpha = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha = 0,7$ para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$;

$l_{b,min} = \max\{0,3l_b; 10\phi; 100 \text{ mm}\}$.

Para ilustrar a diferença prática entre os dois aços, considere uma barra de $\phi 25 \text{ mm}$ em boas condições de aderência, concreto C35 e extremidade reta ($\alpha = 1,0$). Adotando $A_{s,calc} / A_{s,ef} = 1,0$, e $c_s = c_x$

$c_y = 3\phi$ os comprimentos de ancoragem e de emenda necessários são:

- CA-50: $l_{b,nec} = 76 \text{ cm}$ ($\approx 30\phi$) – NBR | $l_b = 114 \text{ cm}$ ($\approx 46\phi$) – EC2

- CA-70: $l_{b,nec} = 125 \text{ cm}$ ($\approx 50\phi$) – NBR adaptada | $l_b = 188 \text{ cm}$ ($\approx 75\phi$) – EC2

O comprimento de ancoragem do CA-70 é **66%** maior que o do CA-50, e o comprimento de emenda por traspasse acompanha essa proporção. Essa diferença é crítica em elementos com vãos maiores, onde emendas se fazem necessárias: o aumento do traspasse pode consumir parte ou toda a economia de aço obtida pela maior resistência do CA-70, como observado nas longarinas das pontes estudadas neste trabalho.

Na Figura 3 e na Figura 4, apresentam-se as curvas de comprimento de ancoragem reta e de emenda para barras $\phi 25$ em função da tensão de escoamento do aço, obtidas a partir de diferentes normas, com o objetivo de ilustrar de forma mais clara as diferenças práticas entre os aços analisados. Os valores adotados nos projetos aqui discutidos são identificados como “NBR – Adaptada”. Em todos os casos, os cálculos foram realizados considerando cobrimento e espaçamento entre barras iguais a 3ϕ .

FIG. 3 – COMPRIMENTOS DE ANCORAGEM RETA PARA VERGALHÃO DE AÇO Ø25 EM FUNÇÃO DA SUA TENSÃO DE ESCOAMENTO

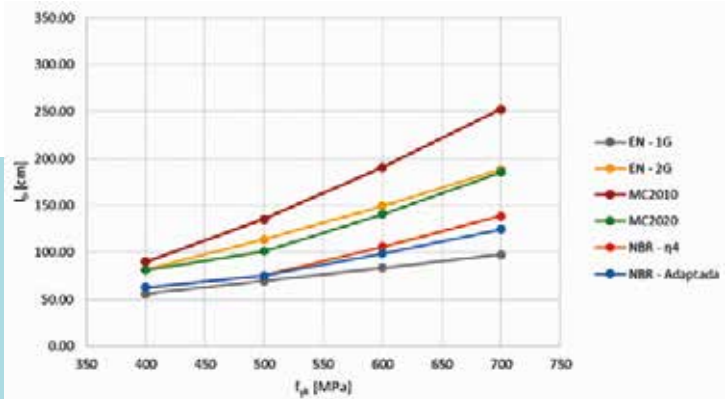
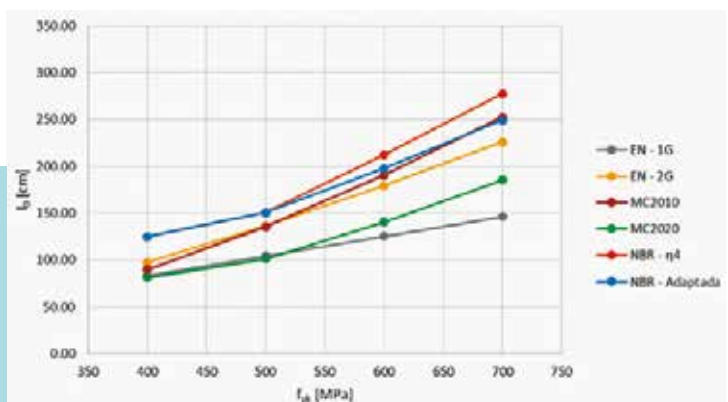


FIG. 4 – COMPRIMENTOS DE TRASPASSE PARA VERGALHÃO DE AÇO Ø25 EM FUNÇÃO DA SUA TENSÃO DE ESCOAMENTO



4.1.2. Fadiga

Tanto o Eurocode 2 [15] como o Model Code 2020 [18] consideram que a resistência à fadiga do aço independe da tensão de escoamento, pois adotam limites de flutuação de tensão que não se alteram para diferentes valores de f_y . Com isso, foi adotada para o CA-70 a curva S-N da NBR 6118:2023 [9] para o CA-50.

A ABNT NBR 6118:2023 [9] admite que a análise da fadiga seja realizada assumindo o concreto no estágio II, tratado como material elástico-linear que não resiste à tração. Adicionalmente, a flutuação de tensão no aço para a combinação frequente não pode ultrapassar os valores apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – PARÂMETROS PARA AS CURVAS S-N (WÖHLER) PARA OS AÇOS DENTRO DO CONCRETO
 FONTE: ABNT NBR 6118:2023 [9]

Armadura passiva, aço CA-50									
Valores de $\Delta f_{sd, fad, m, br}$ para 2×10^6 ciclos (MPa)									
Caso	ϕ (mm)								Tipo ^b
	10	12.5	16	20	22	25	32	40	
Barras retas ou dobradas com $D^c \geq 25\phi$	190	190	190	185	180	175	165	150	T ₁
Barras dobradas ou estribos ^{d,e} com $D < 25\phi$	105	105	105	105	100	95	90	85	T ₁
	$D_{min} = 8\phi$, para $\phi \geq 20$ mm								
	$D_{min} = 5\phi$, para $\phi < 20$ mm								
$D_{min} = 3\phi$, para $\phi \leq 10$ mm	85	-	-	-	-	-	-	-	
Ambiente marinho ^e Classe IV	110	110	110	110	110	110	110	110	T ₄
Barras soldadas ^e (incluindo solda por ponto ou das extremidades) e conectores mecânicos	85	85	85	85	85	85	85	85	T ₄

a Admite-se, para certificação de processos produtivos, justificar os valores desta Tabela em ensaios de barras ao ar. Esses valores devem ser calculados de acordo com a ABNT NBR 7478.
 b Ver a Tabela 2.
 c D é o diâmetro do pino de dobramento.
 d Valores obtidos pela multiplicação do fator redutor ξ em função do diâmetro do pino de dobramento D e do diâmetro da barra ϕ , sendo $\xi = 0,35 + 0,026 D/\phi$
 e A maioria das curvas S-N intercepta a curva da barra reta correspondente. Nesses casos, a resistência à fadiga da barra é válida para número de ciclos menor do que o do ponto de

TABELA 2 – TIPOS DA CURVA S-N
 FONTE: ABNT NBR 6118:2023 [9]

Tipo	N*	k ₁	k ₂
T ₁	10 ⁶	5	9
T ₂	10 ⁶	3	7
T ₃	10 ⁶	3	5
T ₄	10 ⁷	3	5
T ₅	10 ⁶	5	5
T ₆	10 ⁶	5	7
T ₇	10 ⁶	5	10

4.1.3. Armadura de cisalhamento

Como a ABNT NBR 6118 [9] limita a tensão de cálculo nas armaduras de cisalhamento em **435 MPa**, não seria, a princípio, vantajoso utilizar o aço CA-70 em estribos. Dessa forma, foi considerada a utilização de aço CA-50 nos estribos.

4.1.4. Escolha do tipo de aço e dos diâmetros das barras para cada elemento

Como a diferenciação dos aços em obra se baseia apenas em gravações conformadas nas barras, e após corte e dobra os tipos podem ser facilmente confundidos, determinou-se que cada diâmetro nominal deveria ser atribuído exclusivamente a um único tipo de aço. Na prática, os diâmetros menores, utilizados em armaduras de distribuição, estribos e grampos de borda, foram reservados ao CA-50, enquanto os diâmetros maiores, empregados nas armaduras principais de flexão, foram destinados ao CA-70. Essa separação elimina a ambiguidade em obra sem exigir controle adicional de rastreabilidade.

4.2. Projetos desenvolvidos

Foram estudadas duas tipologias de superestrutura: uma ponte em laje com vão de 10 m e uma ponte em duas vigas com vão de 20 m. Em ambos os casos, analisou-se apenas a superestrutura, adotando concreto C35, Classe de Agressividade Ambiental II e carregamento pelo trem-tipo TB450 (ABNT NBR 7188:2024 [10]). Os esforços foram determinados por modelo computacional através do software MIDAS

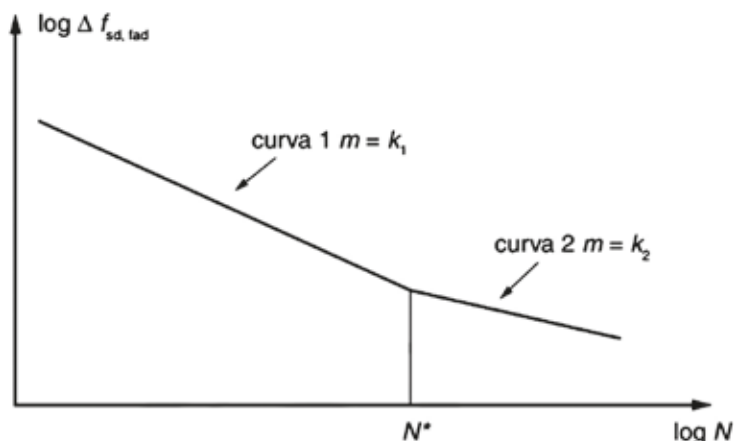


FIG. 5 – FORMATO DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À FADIGA (CURVAS S-N) PARA O AÇO – FONTE: ABNT NBR 6118:2023 [9]

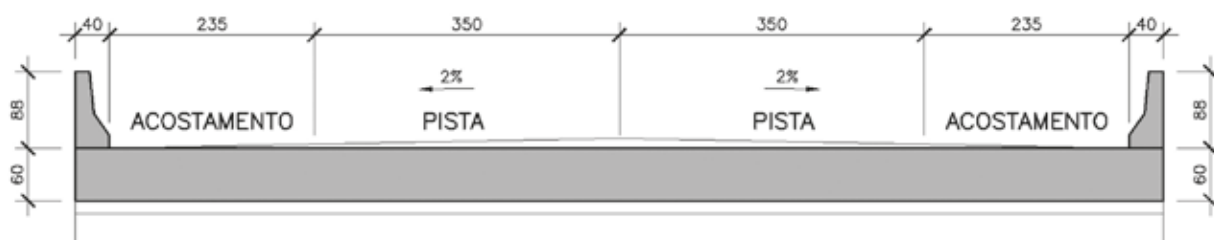


FIG. 6 – SEÇÃO TRANSVERSAL

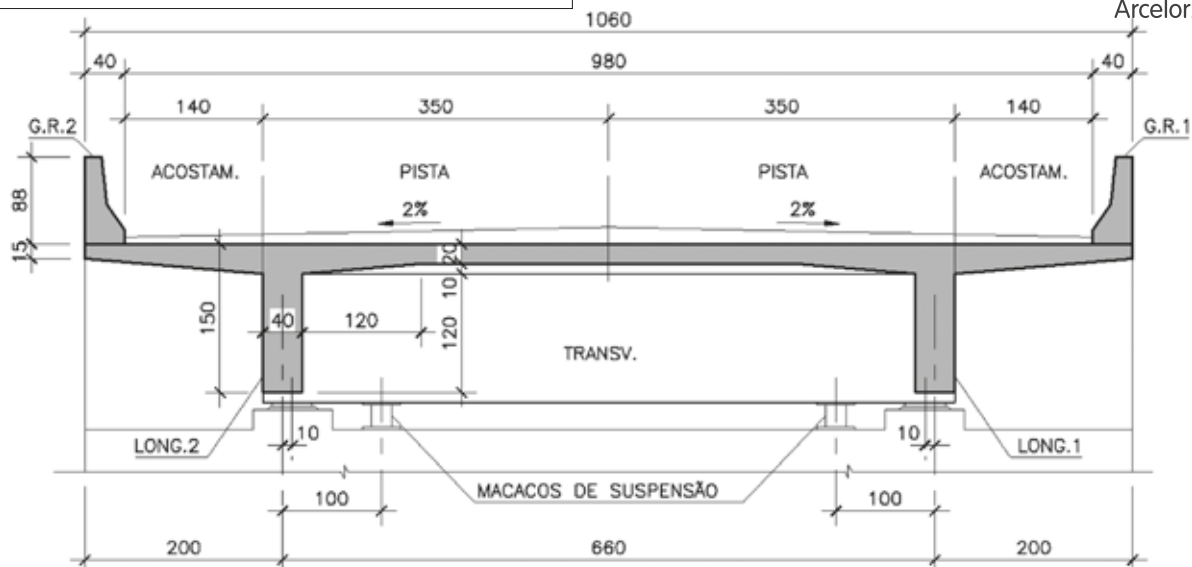


FIG. 7 – SEÇÃO TRANSVERSAL

Civil, com lajes modeladas como elementos de placa e vigas como elementos de barra.

A ponte em laje estudada tem **10 m** de vão e apresenta a seção transversal apresentada na Figura 6.

A ponte em duas vigas possui **20 m** de vão e apresenta a seção transversal apresentada na Figura 7.

Em ambas as soluções foi considerado concreto C35 ($f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$) e a Classe de Agressividade Ambiental CAII.

O modelo foi carregado, em diversas posições do veículo, considerando o espreadimento da área de contato do pneu (norma brasileira) até plano médio da laje. A determinação da largura de espreadimento foi realizada com a espessura mínima do pavimento.

Buscou-se dimensionar a laje de modo que não fosse necessária armadura de cisalhamento, respeitando o V_{Rd1} . A ausência de estribos aliada ao menor custo norteou a escolha da altura da ponte.

No caso específico da ponte em laje, por mais que a força cortante solicitante seja menor que o V_{Rd1} , os momentos volventes nas extremidades da laje são elevados. Marti [19] mostra que o momento volvente na borda de uma laje corresponde a uma força cortante de mesma magnitude sendo transferida ao longo da borda, o que implica que seria necessária armadura de cisalhamento na região.

Além disso, a analogia com vigas submetidas à torção circulatoria sugere que as bordas das lajes devem ser armadas de forma semelhante às faces laterais dessas vigas.

No caso em questão, as armaduras superiores e inferiores no plano da laje, perpendiculares à borda, devem ser conecta-

das por meio de armaduras transversais. Isso pode ser obtido por meio da emenda das barras superiores e inferiores com barras em forma de grampo envolvendo a borda, conforme a Figura 8. Por isso, adotou-se esse tipo de detalhe de modo a evitar a utilização de estribos.

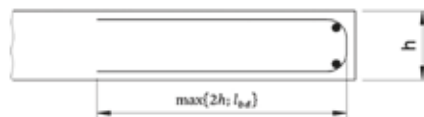


FIG. 8 – ARMADURA DE EXTREMIDADE PARA AS LAJES

Com essas premissas, obteve-se a armação apresentada nas Figuras 9 e 10.

Na ponte em laje, a armadura principal de flexão, inferior, foi especificada em CA-70 com barras de $\phi 20 \text{ mm}$ e $\phi 16 \text{ mm}$, enquanto a armadura transversal foi dimensionada com barras de $\phi 10 \text{ mm}$. Na ponte em duas vigas, as longarinas recebem armadura longitudinal em CA-70 com barras de $\phi 25 \text{ mm}$; estribos de CA-50. Essa distribuição, além de garantir o

melhor aproveitamento da resistência do CA-70 onde o ELU é determinante, viabiliza a distinção dos tipos de aço por diâmetro adotada como critério de projeto.

4.3. Comparação de Custo

De modo a avaliar a solução mais vantajosa economicamente, buscou-se no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO [16]) os valores atualizados dos principais materiais utilizados para a execução da estrutura. Vale ressaltar que não foram consideradas as formas, foram considerados apenas o aço e o concreto. A Tabela 3 apresenta os códigos referentes aos materiais na tabela SICRO e os valores obtidos. Para determinação do custo unitário da composição “Armação em aço CA-70”, foi considerado acréscimo no custo do aço de 10% em relação ao custo do CA-50, que é adicional razoável considerando preços observados no mercado atual. Assim, a composição de custo relacionada ao aço CA-70 é cerca de 5,40% maior que a do CA-50.

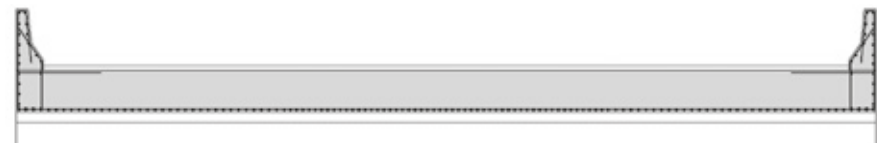


FIG. 9 – ARMADURA DA PONTE EM LAJE



FIG. 10 – ARMADURA DA PONTE EM DUAS VIGAS

TABELA 3 – VALORES POR MATERIAL DA TABELA SICRO

Código	Descrição	Unidade	Custo Unitário
1108113	Concreto - $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	m ³	R\$ 490,71
407819	Armação em aço CA-50	kg	R\$ 13,34
-	Armação em aço CA-70	kg	R\$ 14,06

Os valores obtidos para o conjunto concreto e aço podem ser observados nas tabelas abaixo.

TABELA 4 – VALORES TOTAIS DA SUPERESTRUTURA – SOLUÇÃO EM LAJE

Total						
Aço	Concreto		Aço		Taxa	Total
	Volume	R\$	Peso	R\$	kg/m ³	R\$
	m ³		kg			
CA-50	79,50	39.011,45	4.583,92	61.149,49	57,66	100.160,93
CA-70	79,50	39.011,45	3.843,82	54.057,83	48,35	93.069,28

TABELA 5 – VALORES TOTAIS DA SUPERESTRUTURA – SOLUÇÃO EM DUAS VIGAS

Total						
Aço	Concreto		Aço		Taxa	Total
	Volume	R\$	Peso	R\$	kg/m ³	R\$
	m ³		kg			
CA-50	78,76	38.648,07	18.407,66	246.697,81	233,72	285.345,89
CA-70	78,76	38.648,07	15.822,75	220.614,28	200,90	259.262,35

TABELA 6 – VALORES DAS LAJES – SOLUÇÃO EM DUAS VIGAS

Laje						
Aço	Concreto		Aço		Taxa	Total
	Volume	R\$	Peso	R\$	kg/m ³	R\$
	m ³		kg			
CA-50	44,16	21.669,51	8894,46	118.652,15	201,42	140.321,65
CA-70	44,16	21.669,51	7934,25	111.583,91	179,67	133.253,42

TABELA 7 – VALORES DAS LONGARINAS – SOLUÇÃO EM DUAS VIGAS

Longarina (para uma viga)						
Aço	Concreto		Aço		Taxa	Total
	Volume	R\$	Peso	R\$	kg/m ³	R\$
	m ³		kg			
CA-50	11,70	5.741,31	3991,69	53.249,10	341,17	58.990,41
CA-70	11,70	5.741,31	3296,43	45.649,01	281,75	51.390,32

TABELA 8 – VALORES DAS TRANSVERSINAS – SOLUÇÃO EM DUAS VIGAS

Transversina (para uma viga)						
Aço	Concreto		Aço		Taxa	Total
	Volume	R\$	Peso	R\$	kg/m ³	R\$
	m ³		kg			
CA-50	5,60	2.747,98	764,91	10.773,73	136,59	13.521,71
CA-70	5,60	2.747,98	647,81	8.866,17	115,68	11.614,15

Com base nos valores apresentados, observa-se que as soluções com CA-70 resultam, de forma consistente, em me-

nores custos quando comparadas às com CA-50. No conjunto da superestrutura, as soluções em laje e em duas vigas com

CA-70 mostraram-se, respectivamente, 7,08% e 9,14% mais econômicas em relação às suas equivalentes em CA-50.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que o aço CA-70 proporciona economia financeira nas duas tipologias analisadas. Na ponte em laje (vão de **10 m**), a substituição do CA-50 pelo CA-70 resultou em redução de **16,0%** no consumo de aço (de **4.583,92 kg** para **3.842,82 kg**) e economia de **7,1%** no custo total da superestrutura (de **R\$ 100.160,93** para **R\$ 93.069,28**). Na ponte em duas vigas (vão de **20 m**), os ganhos foram mais expressivos: redução de **14,0%** no consumo total de aço (de **18.407,66 kg** para **15.822,75 kg**) e economia de **9,1%** no custo total (de **R\$ 285.345,89** para **R\$ 259.262,35**).

A diferença de desempenho entre as duas tipologias é explicada pela maior influência do Estado Limite de Serviço (ELS) nas lajes. Elementos com baixa taxa de armadura, como é o caso das lajes de pontes, são mais sensíveis à abertura de fissuras e à flecha quando se reduz a área de aço. Nessas situações, parte da economia de aço obtida pela maior resistência do CA-70 é compensada pela necessidade de aumentar a área de armadura para atendimento dos critérios de serviço. Nas longarinas e transversinas, onde a concentração de armadura é naturalmente maior, o ELS não se mostrou limitante, e o benefício do CA-70 foi mais bem aproveitado.

Outro fator determinante para a viabilidade econômica é a influência do comprimento de emenda por traspasse. A análise dos elementos da ponte em duas vigas ilustra bem esse efeito: as transversinas, que possuem vão reduzido e não demandaram emendas, apresentaram economia de **14,1%** no custo total do elemento (de **R\$ 13.521,71** para **R\$ 11.614,15**). Já as longarinas, sujeitas a emendas por traspasse em função do comprimento maior das barras, apresentaram economia ligeiramente inferior, de **12,9%** (de **R\$ 58.990,41** para **R\$ 51.390,82**). Isso evidencia que, em vigas de grandes vãos com elevada demanda de emendas, a vantagem do CA-70 pode ser parcialmente anulada pelo aumento do comprimento de traspasse, fator que o projetista deve avaliar caso a caso.

Do ponto de vista normativo, este trabalho ajuda na discussão de critérios em

relação ao CA-70 a serem introduzidos em futura revisão da ABNT NBR 6118 [9].

Além do aspecto econômico, o uso do aço CA-70 também apresenta vantagens sob o ponto de vista ambiental, em função da redução do consumo de aço e, conseqüentemente, da pegada de carbono da estrutura. Com base em dados do Institut Bauen und Umwelt e.V. para aço para vergalhões produzidos pela ArcelorMittal Brasil (2021), estima-se uma emissão de 881 kg CO₂ por tonelada de aço.

Nesse contexto, a redução de consumo de 740,1 kg de aço na solução em laje implica uma diminuição de aproximadamente 652,0 kg de CO₂ emitidos. Para a solução em duas vigas, a economia de aço é ainda mais significativa, resultando em uma redução de emissões de cerca de 2.277,3 kg de CO₂.

Em síntese, o CA-70 se mostra uma alternativa economicamente viável e tecnicamente consistente para pontes de concreto armado. A vantagem econômica é mais expressiva em: elementos com alta taxa de armadura longitudinal, como vigas e longarinas; elementos com vãos reduzidos que não demandem emendas por traspasse; e estruturas em que o dimensionamento é governado pelo Estado Limite Último e não pelo ELS. Para o caso de peças que exijam traspasse de barras, o uso de emendas mecânicas pode ser uma oportunidade para otimização do consumo de aço e dos custos, podendo esse ser assunto de trabalho futuro.

Para além da viabilidade técnico-econômica diretamente ligada ao aço, é relevante pontuar que o uso do CA-70 pode trazer economias em relação a mão de obra, uma vez que se tem menos aço a ser armado, e de espaçamentos entre armaduras, o que pode proporcionar concretagens mais uniformes.

O conjunto de resultados aqui apresentados representam um passo concreto para a disseminação do CA-70 em pontes brasileiras de modo seguro e tecnicamente responsável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GONÇALVES, B. M.; CORRÊA, F. R. Planejamento na Construção Civil: panorama brasileiro e adoção de novas tecnologias. ENTAC 2024, 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6097/4644>. Acessado em março de 2026.
- [2] Graeff, C.; Gisti, L.; Gruenbaum, T. Construção civil: inovar é preciso! KPMG. Disponível em: <https://kpmg.com/br/pt/insights/2024/09/construcao-civil-inovar.html>. Acessado em março de 2026.
- [3] STUCCHI, F. R. Os vergalhões e o concreto no Brasil. CONCRETO & Construções, Ed. 92, p.104-106, 2018. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao92/files/assets/basic-html/index.html#106. Acessado em março de 2026.
- [4] Concrete Reinforcing Steel Institute – CRS. Guide to the Use of Grade 100 Reinforcing Bars in ACI 318-19. CRSI Technical Note ETN-D-6-20, Schaumburg, Illinois, 2020.
- [5] Applied Technology Council. Roadmap for the use of high-strength reinforcement in reinforced concrete design. 2014.
- [6] SILVESTRE, P. Digitalização moderniza o conservadorismo da construção. Estadão, 2022. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/brasil/macaco-eletrico/digitalizacao-moderniza-o-conservadorismo-da-construcao-civil/>. Acessado em março de 2026.
- [7] ALMEIDA, P.; PUPIN, L. A.; ARAJÚJO, L. F.; BEATRIZ, E. Estudo da fadiga do vergalhão CA-70. Revista Estrutura, Edição 16, p. 77-78. Maio, 2025.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (ABECE). Recomendação ABECE 008:2024 — Barras de aço com 700 MPa de resistência característica ao escoamento (CA-70): projeto de blocos de fundação. São Paulo: ABECE, 2024.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado — Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- [12] BERTAZZOLO, B. B.; CECEL, R. T.; MENEGHETTI, L. C. O comprimento de ancoragem na NBR 6118-23: uma comparação entre modelos. Revista Estrutura, Edição 16, p. 70-74. Maio, 2025.
- [13] BERTAZZOLO, B. B.; CECEL, R.; MENEGHETTI, L. C.; JOHN, V. M. Caracterização da aderência entre concreto convencional e aços de alta resistência. In: 66º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC2025), 2025, Curitiba. Anais... São Paulo: IBRACON, 2025b. ISSN 2175-8182.
- [14] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON; FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (CEB-FIP). Model Code 1990: Design Code. Londres: Thomas Telford, 1993.
- [15] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). EN 1992-1-1:2023 (BS EC2:2023) — Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Bruxelas: CEN, 2023.
- [16] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). SICRO — Sistema de Custos Referenciais de Obras. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos>. Acessado em: 2 de outubro de 2025.
- [17] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). fib Model Code for Concrete Structures 2010. 1. ed. Lausanne: Ernst & Sohn, 2013.
- [18] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). fib Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne: Ernst & Sohn, 2024.
- [19] MARTI, P. Design of concrete slabs for transverse shear. ACI Structural Journal, v. 87, n. 2, p. 180-190, Mar./Apr. 1990.
- [20] SILVA, M. R.; PUPIN, L. A.; ARAJÚJO, L. F. CA-70: avanços em normas e nas aplicações. Revista Estrutura, Edição 16, p. 69-70. Maio, 2025.
- [21] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code for Structural Concrete - Code Regulations and Commentary. Farmington Hills: ACI, 2025.