Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica

(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

FERRAMENTA DIGITAL BASEADA NO MODELO DE MENZEL PARA ESTIMATIVA DA TAXA DE EVAPORAÇÃO DO CONCRETO FRESCO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO EM CONCRETAGENS

DIGITAL TOOL BASED ON THE MENZEL MODEL FOR ESTIMATING THE EVAPORATION RATE OF FRESH CONCRETE AND SUPPORTING DECISION-MAKING DURING CONCRETING OPERATIONS

Washington Flávio da Silva, André Luis Gomes Paes

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: w.flavio@outlook.com

RESUMO – A evaporação superficial pode contribuir para a retração plástica, mas não determina isoladamente a fissuração. Este estudo desenvolveu uma ferramenta digital baseada na formulação de Uno do modelo de Menzel para estimar a taxa potencial de evaporação. A implementação foi verificada por cálculo independente em seis cenários e comparada a leituras do nomograma feitas por dois engenheiros. As saídas coincidiram com a equação até três casas decimais; a divergência média entre leituras foi de 28,3%, e a classificação diferiu da ferramenta em três cenários. Nos incrementos adotados, temperatura do concreto e vento produziram os maiores aumentos da estimativa. Os resultados obtidos pela ferramenta sustentam seu uso como apoio à decisão em concretagens.

Palavras-chave: Evaporação; Retração plástica; Modelo de Menzel; Concreto fresco; Ferramenta digital.

ABSTRACT – Surface evaporation can contribute to plastic shrinkage, but it does not determine cracking by itself. This study developed a digital tool based on Uno's formulation of the Menzel model to estimate potential evaporation. The implementation was checked against independent calculations in six scenarios and compared with independent nomograph readings by two engineers. Results matched the equation to three decimal places; mean divergence between manual readings was 28.3%, and classifications differed from the tool in three scenarios. Under the local variations tested, increasing concrete temperature and wind speed produced the largest increases in the estimate. The results obtained with the tool support its use as an aid to decision-making during concrete placement.

Keywords: Evaporation; Plastic shrinkage; Menzel model; Fresh concrete; Digital tool.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

O concreto recém-lançado pode perder água rapidamente pela superfície antes de desenvolver resistência suficiente para suportar as tensões associadas à retração. Quando a evaporação supera a reposição de água por exsudação, formam-se meniscos nos poros capilares, aumentam as pressões de sucção e cresce a suscetibilidade à retração plástica e à fissuração precoce. A ocorrência e a severidade das fissuras, contudo, não dependem apenas da evaporação. Composição da mistura, taxa de exsudação, restrição, geometria do elemento, aditivos, acabamento, radiação solar e evolução da pega também podem interferir no desenvolvimento da retração plástica e da fissuração (American Concrete Institute, 2020; Deysel et al., 2023; Moelich et al., 2021).

A estimativa da taxa de evaporação da água na superfície do concreto fresco é tradicionalmente baseada no modelo de Menzel (1954), posteriormente difundido em forma de nomograma pelo American Concrete Institute. O procedimento utiliza as temperaturas do ar e do concreto, a umidade relativa e a velocidade do vento para estimar a taxa potencial de evaporação. Uno (1998) retomou essa base e apresentou formulações em unidades métricas e de aplicação computacional, facilitando o uso do modelo sem a necessidade de leitura gráfica. O ACI 305R-20 destaca, contudo, que a taxa calculada representa um indicador do potencial de evaporação e não deve ser interpretada, isoladamente, como previsão da ocorrência de fissuras (American Concrete Institute, 2020).

Embora o nomograma seja útil em campo, sua leitura exige sucessivas projeções entre escalas. Papadimitropoulos et al. (2020) descrevem o uso do nomograma como complexo e demorado, com possibilidade de imprecisões na leitura, e investigam modelos analíticos para reproduzir suas saídas. A digitalização do procedimento, portanto, não se limita a uma mudança de interface. Ela permite registrar as variáveis de entrada, repetir o cálculo sob o mesmo critério e reduzir a dependência da interpolação visual.

A partir dessa lacuna, foi desenvolvido um aplicativo responsivo que recebe as quatro variáveis ambientais, calcula a taxa estimada de evaporação e apresenta uma classificação operacional para apoio à tomada de decisão. Adotou-se como hipótese que a implementação digital reproduziria a formulação computacional de referência de forma consistente e que a leitura manual apresentaria maior variabilidade entre avaliadores, especialmente em cenários próximos aos limites de classificação.

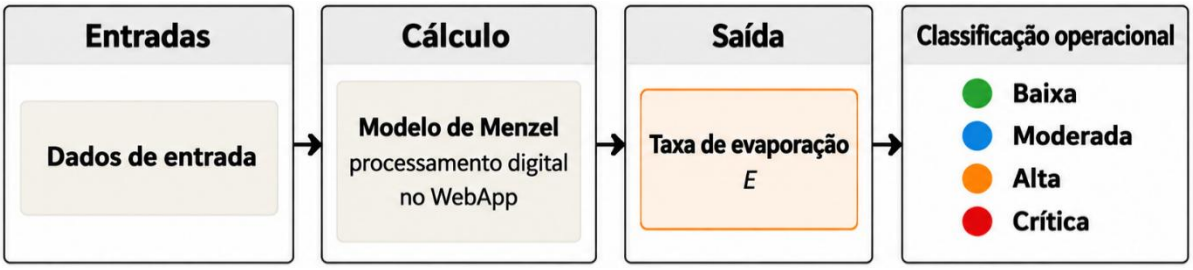
ISSN 2317-1316

O estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar uma ferramenta digital baseada no modelo de Menzel para estimar a taxa de evaporação do concreto fresco e fornecer apoio à tomada de decisão em concretagens. Especificamente, buscou-se verificar numericamente a rotina implementada, comparar suas saídas com leituras independentes de um procedimento gráfico, avaliar o efeito das diferenças sobre a classificação operacional e analisar a sensibilidade local da estimativa às variáveis de entrada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é aplicada, de abordagem quantitativa, computacional e comparativa. O protótipo foi desenvolvido como aplicativo responsivo. As entradas são temperatura do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR), temperatura do concreto (Tc) e velocidade do vento (V). A saída principal é a taxa estimada de evaporação E, expressa em kg/m²/h. O fluxo funcional utilizado na ferramenta é apresentado na Figura 1.

Figura 1: Fluxo funcional do aplicativo para estimativa da taxa de evaporação e classificação operacional.



A base matemática do estudo foi organizada em duas expressões. Para comparação com a formulação clássica, considerou-se a forma métrica modificada da equação de Menzel apresentada por Uno (1998), conforme a Equação (1). Nessa expressão, E_m é a taxa estimada de evaporação, e_s representa a pressão de vapor de saturação, T_c e T_a são as temperaturas do concreto e do ar, r é a umidade relativa em forma decimal, obtida por $UR/100$, e V é a velocidade do vento em km/h.

$$E_m = 0{,}313.[e_s(T_c) - re_s(T_a)].(0{,}253 + 0{,}060V) \quad (1)$$

Para a rotina operacional do aplicativo foi utilizada a formulação computacional direta proposta por Uno (1998), derivada do modelo de Menzel, conforme a Equação (2). Essa forma

ISSN 2317-1316

reúne em uma única expressão as quatro variáveis de entrada e elimina a necessidade de determinação separada das pressões de vapor, o que favorece sua implementação digital.

$$E_u = 5.10^{-6}.[(T_c + 18)^{2,5} - r(T_a + 18)^{2,5}].(V + 4) \quad (2)$$

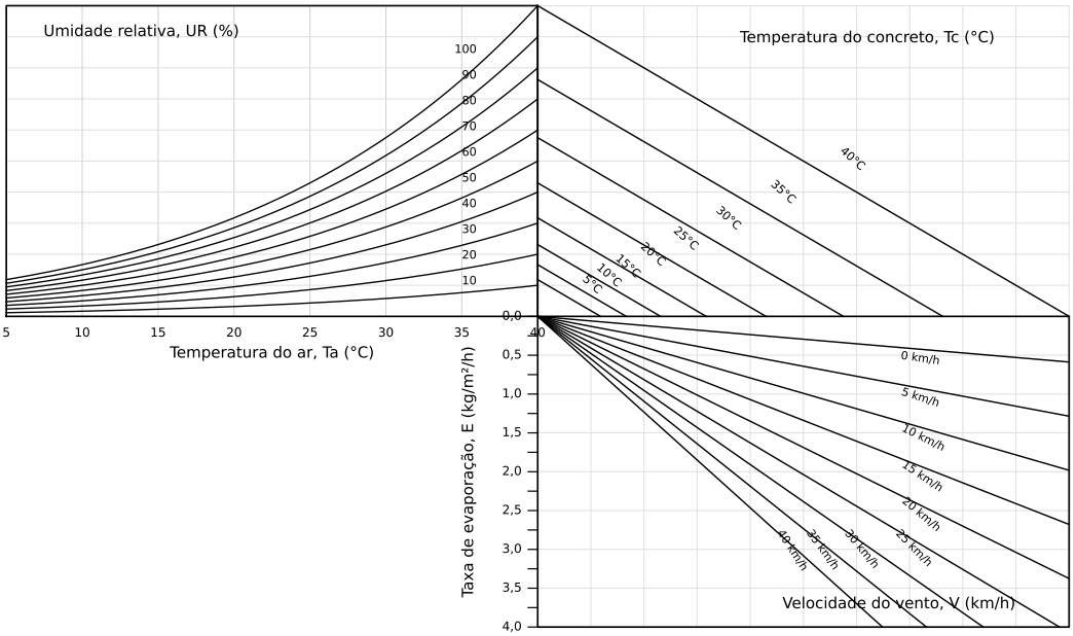
A verificação da implementação foi realizada por cálculo independente da Equação (2) em seis cenários. Os casos foram definidos em pares próximos às três fronteiras da classificação operacional adotada no protótipo, aproximadamente 0,5, 1,0 e 1,5 kg/m²/h. Essa escolha permitiu avaliar não apenas a proximidade numérica, mas também a possibilidade de pequenas diferenças modificarem a interpretação operacional.

As quatro faixas utilizadas pela interface foram definidas neste estudo para organizar a interpretação da saída: baixa para $E < 0{,}5$ kg/m²/h; moderada para $0{,}5 \leq E < 1{,}0$ kg/m²/h; alta para $1{,}0 \leq E \leq 1{,}5$ kg/m²/h; e crítica para $E > 1{,}5$ kg/m²/h. Essas denominações não são apresentadas como categorias normativas do ACI. O valor de 1,0 kg/m²/h é tratado pelo ACI 305R-20 como referência técnica para adoção de precauções contra secagem rápida, com a ressalva de que misturas com baixa exsudação podem ser vulneráveis em taxas inferiores (American Concrete Institute, 2020).

Para a comparação gráfica foi utilizado um redesenho vetorial do nomograma em unidades SI, preparado para padronizar o instrumento de leitura e apresentado na Figura 2. Dois engenheiros realizaram as leituras de forma independente, em ambiente controlado, com apoio de mesa, cadeira, régua e caneta. Ambos receberam os mesmos seis cenários e não tiveram acesso aos resultados do aplicativo nem às respostas do outro avaliador antes de finalizar as leituras. No artigo, os profissionais são identificados apenas como Avaliador 1 e Avaliador 2. A etapa foi tratada como comparação técnica exploratória do procedimento gráfico adotado, sem pretensão de representar o desempenho dos usuários ou de todas as condições de campo.

ISSN 2317-1316

Figura 2: Nomograma em unidades SI utilizado nas leituras independentes pelos avaliadores.



A divergência relativa entre as duas leituras manuais foi calculada pela Equação (3), em que E1 e E2 representam os valores obtidos pelos Avaliadores 1 e 2. Também foram calculadas as diferenças absolutas entre as leituras e a estimativa do aplicativo, além da concordância das faixas operacionais.

$$D_{12} = \frac{|E_1 - E_2|}{(E_1 + E_2)/2} * 100 \quad (3)$$

A análise de sensibilidade local foi realizada pelo procedimento de variação de um fator por vez. Adotou-se como condição de referência T_a = 25 °C, UR = 50%, T_c = 30 °C, e V = 10 km/h. Essa combinação foi definida por reunir valores intermediários, não extremos, e permitir a variação individual das entradas dentro da faixa analisada neste estudo, sem partir de uma condição limite. Em quatro cenários adicionais, alterou-se somente uma variável, mantendo as demais constantes: T_a passou de 25 °C para 30 °C, UR, de 50% para 60%, T_c passou de 30 °C para 35 °C e V, de 10 km/h para 15 km/h. A variação percentual da taxa foi calculada pela Equação (4), em que E_i é a estimativa obtida após a alteração e E_{base} é a estimativa da condição de referência. Valores positivos indicam aumento de E e valores negativos, redução. Por se tratar de uma análise local, os percentuais obtidos descrevem o comportamento do modelo apenas em torno da condição de referência adotada e não representam uma medida global da importância das variáveis.

ISSN 2317-1316

$$\Delta E\% = \frac{E_i - E_{base}}{E_{base}} \quad (4)$$

Os resultados indicam que a ferramenta pode padronizar a estimativa da taxa de evaporação, reduzir a variabilidade associada à leitura gráfica e fornecer informação objetiva para apoiar decisões relacionadas à proteção e à cura do concreto durante a concretagem, sem substituir medições adequadas nem o julgamento do responsável técnico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aplicativo foi implementado e executou o cálculo a partir das quatro variáveis previstas. A Figura 3 apresenta o resultado do Caso A, utilizado também na etapa comparativa. Para T_a = 26 °C, UR = 50%, T_c = 26 °C e V = 10 km/h, a ferramenta retornou E = 0,449 kg/m²/h e classificou a condição na faixa operacional baixa. Além do valor numérico, a interface apresenta a posição relativa na escala e orientações operacionais associadas à classificação adotada no estudo. Essas orientações foram estruturadas a partir de práticas de controle da evaporação, proteção e cura descritas pelo ACI 305R-20 (American Concrete Institute, 2020), sem constituir faixas normativas estabelecidas pelo ACI.

Figura 3: Interface do aplicativo com o resultado e a classificação operacional do Caso A.



A primeira verificação concentrou-se na reprodução da formulação computacional de Uno. A ordem apresentada na coluna Entradas da Tabela 1 é T_a (°C); UR (%); T_c (°C); V (km/h).

ISSN 2317-1316

O cálculo independente foi mantido com quatro casas decimais para tornar visível o efeito do arredondamento, enquanto o aplicativo exibe três casas decimais.

Tabela 1: Verificação computacional nos seis cenários avaliados

Caso	Entradas	Cálculo independente (kg/m²/h)	Aplicativo (kg/m²/h)	Dif. Absoluta (kg/m²/h)
A	26; 50; 26; 10	0,4495	0,449	0,0005
B	24; 60; 24; 20	0,5487	0,549	0,0003
C	26; 50; 28; 20	0,9517	0,952	0,0003
D	28; 50; 30; 20	1,0544	1,054	0,0004
E	26; 60; 32; 25	1,4460	1,446	0,0000
F	24; 60; 30; 30	1,5476	1,548	0,0004

As seis saídas do aplicativo coincidiram com a formulação de Uno na precisão apresentada pela interface. As diferenças absolutas decorreram apenas do arredondamento para três casas decimais e permaneceram iguais ou inferiores a 0,0005 kg/m²/h. Esse resultado verifica a implementação da expressão computacional nos cenários analisados, mas não deve ser confundido com validação física da evaporação real do concreto. A literatura ressalta que a taxa calculada representa um potencial de evaporação e que a fissuração depende de outros mecanismos do concreto fresco (Uno, 1998; American Concrete Institute, 2020; Deysel et al., 2023).

Na etapa de leitura gráfica, observou-se maior dispersão entre os valores obtidos nos cenários analisados. Para organizar essa comparação, a Tabela 2 reúne, em cada caso, as estimativas dos dois avaliadores e o valor calculado pelo aplicativo. Também são apresentados a divergência relativa entre as leituras manuais e o enquadramento dos resultados nas faixas operacionais adotadas no estudo. A última coluna identifica quais avaliadores permaneceram na mesma faixa indicada pelo aplicativo, permitindo verificar se as diferenças numéricas observadas também produziram alteração na classificação operacional.

ISSN 2317-1316

Tabela 2: Leituras independentes do nomograma e comparação com o aplicativo

Caso	Avaliador 1 (kg/m²/h)	Avaliador 2(kg/m²/h)	Aplicativo (kg/m²/h)	D12 (%)	Concordância de faixa
A	0,60	0,70	0,449	15,4%	Nenhum
B	0,54	0,95	0,549	55,0%	Ambos
C	1,46	1,10	0,952	28,1%	Nenhum
D	1,30	1,50	1,054	14,3%	Ambos
E	1,25	2,00	1,446	46,2%	Avaliador 1
F	2,25	2,50	1,548	10,5%	Ambos

A diferença absoluta entre os avaliadores variou de 0,10 a 0,75 kg/m²/h, com média de 0,345 kg/m²/h. A divergência relativa D12 variou de 10,5% a 55,0%, com média de 28,3%. Em relação ao aplicativo, a diferença relativa média foi de 28,5% para o Avaliador 1 e de 47,8% para o Avaliador 2. Esses percentuais não foram tratados como erros do profissional ou como prova de superioridade metrológica do aplicativo, porque o aplicativo não constitui padrão experimental de referência. Eles expressam apenas a dispersão observada entre procedimentos de obtenção da mesma estimativa.

A consequência operacional da dispersão foi observada em três dos seis cenários. No Caso A, o aplicativo indicou faixa baixa, enquanto os dois avaliadores obtiveram valores moderados. No Caso C, o aplicativo permaneceu na faixa moderada e as duas leituras manuais ficaram na faixa alta. No Caso E, o aplicativo e o Avaliador 1 permaneceram na faixa alta, enquanto o Avaliador 2 alcançou a faixa crítica. Nos casos B, D e F houve concordância entre as duas leituras e a classificação digital. Considerando as doze classificações manuais, sete coincidiram com a classificação do aplicativo, correspondendo a 58,3%.

O resultado é coerente com a limitação operacional discutida por Papadimitropoulos et al. (2020), que apontam influência da subjetividade do usuário e dificuldade adicional em regiões de maior densidade gráfica. No presente estudo, as leituras foram realizadas em ambiente controlado e sem acesso prévio aos resultados digitais, o que reduz a possibilidade de influência entre avaliadores. Ainda assim, a amostra de dois profissionais e seis cenários é pequena, e o instrumento utilizado foi um redesenho vetorial preparado para o experimento. Por esse motivo, os resultados demonstram variabilidade do procedimento gráfico nas

ISSN 2317-1316

condições testadas, mas não autorizam generalização para todos os profissionais, nomogramas ou situações de campo.

A análise de sensibilidade local foi calculada diretamente pela Equação (2) e quantificada pela Equação (4). Na condição de referência adotada, obteve-se E = 0,693 kg/m²/h. A Tabela 3 apresenta, para cada alteração individual, a nova taxa estimada e sua variação relativa em relação a essa condição.

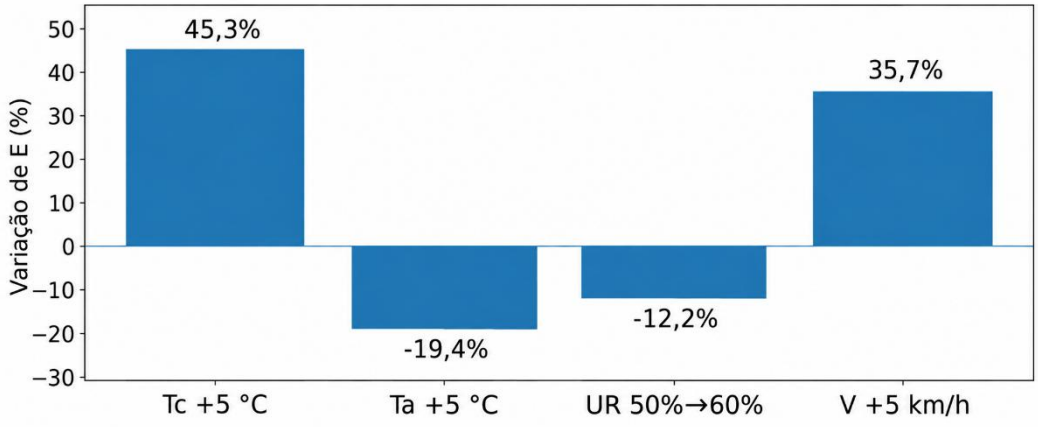
Tabela 3: Análise de sensibilidade local em relação à condição de referência

Condição	**Alteração aplicada**	E **(kg/m²/h)**	ΔE **(%)**
Referência	T_c = 30 °C; T_a = 25 °C; UR = 50%; V = 10 km/h	0,693	0,0%
Temperatura do concreto	T_c: 30 → 35 °C	1,007	+45,3 %
Temperatura do ar	T_a: 25 → 30 °C	0,559	−19,4 %
Umidade relativa	UR: 50 → 60%	0,608	−12,2 %
Velocidade do vento	V: 10 → 15 km/h	0,941	+35,7 %

O aumento de 5 °C em T_c produziu a maior elevação da taxa na condição de referência adotada, com +45,3%, seguido pelo acréscimo de 5 km/h em V, com +35,7%. Em sentido oposto, o aumento de 5 °C em T_a reduziu E em 19,4%, e a elevação da UR de 50% para 60% reduziu a estimativa em 12,2%. A Figura 4 apresenta essas variações com sinal, preservando a distinção entre aumentos e reduções da taxa.

ISSN 2317-1316

Figura 4: Variação percentual da taxa estimada de evaporação na análise de sensibilidade local.



Os sinais observados são coerentes com a estrutura da formulação. O aumento de T_c eleva o potencial de pressão de vapor na superfície, enquanto o aumento de V intensifica a remoção de vapor junto à interface. A maior UR reduz o gradiente de pressão de vapor e, por consequência, a estimativa de evaporação. O efeito de T_a deve ser interpretado em conjunto com T_c e UR, pois a equação representa o balanço entre as condições da superfície e do ar. A magnitude dos percentuais não deve ser extrapolada para outras condições sem nova avaliação local.

O conjunto de resultados mostra duas contribuições distintas. A primeira é computacional: a ferramenta reproduziu a formulação implementada de forma determinística e rastreável nos seis cenários. A segunda é operacional: a comparação exploratória mostrou que a leitura gráfica pode apresentar dispersão suficiente para modificar a classificação em casos próximos às fronteiras adotadas. A ferramenta, portanto, pode reduzir a variabilidade associada à interpretação manual, mas não substitui medições ambientais adequadas nem o julgamento do responsável técnico. Também não deve ser utilizada como único meio para atribuir fissuração à retração plástica, pois o fenômeno depende de exsudação, composição, restrição, tempo de pega e outras condições não representadas pela taxa calculada.

4 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam duas contribuições complementares. No âmbito computacional, a ferramenta digital reproduziu a formulação de Uno nos seis cenários avaliados, dentro da precisão apresentada pela interface, demonstrando consistência na implementação do cálculo. No âmbito operacional, a comparação exploratória revelou

ISSN 2317-1316

divergência média de 28,3% entre as leituras dos dois avaliadores e alteração da classificação operacional em três dos seis cenários, indicando que a interpretação gráfica pode produzir diferenças relevantes, sobretudo em situações próximas aos limites entre faixas. Nesse contexto, a ferramenta padroniza o cálculo e reduz a variabilidade da leitura manual, sem substituir medições ambientais adequadas nem o julgamento do responsável técnico. A taxa estimada de evaporação não constitui, por si só, diagnóstico de fissuração por retração plástica, mas funciona como indicador das condições de secagem superficial. Assim, pode apoiar a identificação antecipada de situações mais críticas e subsidiar medidas de proteção e cura voltadas à redução do risco de retração plástica.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a elaboração deste trabalho, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como apoio em etapas específicas. O ChatGPT, da OpenAI, modelo GPT- 6, auxiliou na busca e conferência de fontes, revisão de concordância e clareza textual, verificação de formatação, elaboração do diagrama do fluxo funcional, aprimoramento de imagens e apoio no redesenho vetorial do nomograma empregado na comparação gráfica. A plataforma Lovable em sua versão web disponível em 2026, foi utilizada como ambiente de desenvolvimento assistido por inteligência artificial para a implementação da ferramenta digital. Os dados de entrada, as leituras realizadas pelos avaliadores, os cálculos, as decisões metodológicas, a interpretação dos resultados e a versão final do texto foram conferidos e validados pelo autor, que assume total responsabilidade pelo conteúdo apresentado.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 305R-20: Guide to Hot Weather Concreting. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2020. Disponível em: https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/305R-20_preview.pdf. Acesso em: 11 ago. 2026.

DEYSEL, R. C.; BOSHOFF, W. P.; SMIT, M. S. Implementing capillary pressure control measures to prevent plastic shrinkage cracking in concrete. Construction and Building Materials, v. 397, art. 132407, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132407. Acesso em: 14 out. 2026.

ISSN 2317-1316

MENZEL, C. A. Causes and prevention of crack development in plastic concrete. In: Proceedings of the Portland Cement Association Annual Meeting. 1954. p. 130–136. Disponível em: https://trid.trb.org/View/868764. Acesso em: 11 ago. 2026.

MOELICH, G. M.; VAN ZYL, J. E.; RABIE, N.; COMBRINCK, R. The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and Concrete Composites, v. 123, art. 104182, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104182. Acesso em: 14 out. 2026.

PAPADIMITROPOULOS, V. C.; TSIKAS, P. K.; CHASSIAKOS, A. P. Modeling the influence of environmental factors on concrete evaporation rate. Journal of Soft Computing in Civil Engineering, v. 4, n. 4, p. 79–97, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.22115/SCCE.2020.246071.1254. Acesso em: 14 out. 2026.

UNO, P. J. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. ACI Materials Journal, v. 95, n. 4, p. 365–375, 1998. Disponível em: https://trid.trb.org/View/539835. Acesso em: 11 ago. 2026.