

## Estratégias de projeto para concretos com adições minerais: a ruptura do controle da **resistência à compressão aos 28 dias** e a **gestão de ciclo de vida** no *fib Model Code 2020*

RICARDO COUCEIRO BENTO - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-6069-306X> - ([bento@pucpcaldas.br](mailto:bento@pucpcaldas.br)) – PUC MINAS

### RESUMO

O *fib Model Code 2020 (MC 2020)* ESTABELECE UM NOVO MARCO GLOBAL PARA O PROJETO E GESTÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, INTEGRANDO SUSTENTABILIDADE E DESEMPENHO AO LONGO DE TODA A VIDA ÚTIL. AO ROMPER COM O PARADIGMA TRADICIONAL DE CONTROLE DE RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS E PERMITIR IDADES DE REFERÊNCIA ESTENDIDAS (56 OU 91 DIAS), O CÓDIGO VIABILIZA O USO DE CONCRETOS DE BAIXO TEOR DE CLÍNQUER E ELEVADOS TEORES DE LIGANTES ALTERNATIVOS COMO AS ADIÇÕES MINERAIS. EMBORA APRESENTEM DESENVOLVIMENTO INICIAL DE RESISTÊNCIA MAIS LENTO, TAIS MATERIAIS OFERECEM DURABILIDADE SUPERIOR E REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DA PEGADA DE CARBONO. ESTE ARTIGO ANALISA A APLICAÇÃO DESSES PROCEDIMENTOS SOB A ÓTICA DO *LIFE CYCLE MANAGEMENT (LCM)*, EXPLORANDO A IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DOS PRINCÍPIOS DE *QUALITY & INFORMATION MANAGEMENT (Q&IM)*. O EIXO CENTRAL DA ABORDAGEM É O DESENVOLVIMENTO DO *BIRTH CERTIFICATE* (CERTIDÃO DE NASCIMENTO) ESTRUTURAL, INSTRUMENTO QUE ASSEGURA A RASTREABILIDADE E A CAPTURA DE DADOS DE DESEMPENHO DESDE A CONCEPÇÃO. O ESTUDO DEMONSTRA COMO ESSA VALIDAÇÃO PRECOZE PERMITE EQUILIBRAR METAS DE DESCARBONIZAÇÃO COM A INTEGRIDADE ESTRUTURAL E OS CRONOGRAMAS EXECUTIVOS, GARANTINDO CONFORMIDADE COM O MC 2020 E A NORMATIZAÇÃO NACIONAL. CONCLUI-SE QUE A TRANSIÇÃO PARA IDADES DE CONTROLE ESTENDIDAS É A ESTRATÉGIA TÉCNICA IMPORTANTE PARA A VIABILIZAÇÃO DE CONCRETOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL. A IMPLEMENTAÇÃO DO MONITORAMENTO VIA *BIRTH CERTIFICATE* E A GESTÃO Q&IM ATUAM COMO O ELO DE SEGURANÇA

MANDATÓRIO, CONVERTENDO O HIATO INFORMATIVO DA CURA LENTA EM UMA TRAJETÓRIA DE DESEMPENHO PREVISÍVEL, AUDITÁVEL E TÉCNICAMENTE SEGURA AO LONGO DE TODA A VIDA ÚTIL DA ESTRUTURA.

**PALAVRAS-CHAVE:** MC 2020, SUSTENTABILIDADE, ADIÇÕES MINERAIS, CERTIDÃO DE NASCIMENTO ESTRUTURAL, GESTÃO DO CICLO DE VIDA.

### 1. INTRODUÇÃO

O *fib Model Code 2020 (MC 2020)* estabelece-se como o referencial pré-normativo de vanguarda para o concreto estrutural contemporâneo. Transcendendo as abordagens tradicionais, o documento consolida o estado da arte para ativos novos e existentes, integrando de forma holística, desde a concepção e execução até a desconstrução. A principal inovação reside na fusão de requisitos de segurança e resiliência com metas explícitas de preservação ambiental e eficiência de recursos [1].

Ao contrário do modelo convencional, centrado na conformidade pontual do material, o MC2020 adota o *Life Cycle Management - LCM* (Gerenciamento do Ciclo de Vida). Sob essa ótica, o valor de uma estrutura é medido por sua capacidade de manter o desempenho funcional com o menor impacto ambiental. Essa filosofia viabiliza a transição das idades de controle de 28 para 56 ou 91 dias. Tal flexibilidade é o catalisador para o uso de cimentos de baixo teor de clínquer e elevados volumes de adições minerais — como escórias e

cinzas volantes — reduzindo severamente a pegada de carbono do setor.

Essa mudança exige uma governança de dados rigorosa e nesse contexto, o *Quality & Information Management - Q&IM* (Gestão de Qualidade da Informação) emerge como o pilar de segurança, partindo do princípio que a confiabilidade estrutural não advém apenas de coeficientes parciais, mas da mitigação de incertezas via captura estruturada de dados. A gestão deixa de ser fragmentada para tornar-se um processo contínuo.

De acordo com as diretrizes do MC2020, a gestão estrutural deve ser compreendida não como uma sucessão de intervenções isoladas, mas como um processo contínuo e integrado. Essa abordagem inicia-se na Fase de Projeto, onde são estabelecidas as estratégias de durabilidade e os modelos de deterioração que regerão a vida útil da obra. Ao avançar para a Fase de Execução, o foco recai sobre a coleta de dados reais de construção, culminando na elaboração do *Birth Certificate* (Certidão de Nascimento) — documento essencial que formaliza o estado técnico da estrutura no momento de sua entrega. Por fim, durante a Fase de Manutenção a gestão consolida-se por meio do monitoramento sistemático e da recalibração constante das previsões de vida útil, garantindo que o desempenho real esteja alinhado às expectativas planejadas.

Embora o *fib Model Code 2010* já sinalizasse o uso de idades avançadas, suas

formulações ainda eram fortemente atreladas ao marco dos 28 dias. O MC2020 rompe definitivamente esse vínculo ao permitir idades de controle longevas (56 e 91 dias), institucionalizando a sustentabilidade no âmago do cálculo estrutural.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O Birth Certificate e o Digital Twin na gestão de riscos do MC 2020

Uma das inovações mais pragmáticas do MC2020 (Capítulos 6 e 10) é o conceito de *Birth Certificate* (BC), cujas diretrizes fundamentam-se no *fib Bulletin 93* [2]. Longe de ser um simples relatório de ensaios de compressão, o BC constitui o “DNA digital” do elemento estrutural, consolidando dados físicos e digitais que definem sua identidade e potencial de desempenho no ato da entrega. Este registro abrange a dosagem real executada, a procedência granulométrica dos materiais, gradientes térmicos de lançamento, protocolos de cura e, essencialmente, a correlação das resistências iniciais (3, 7 e 28 dias) com o desempenho alvo de longo prazo. O BC estabelece a *baseline* (linha de base) que alimenta o *Digital Twin* (Gêmeo Digital) da estrutura, servindo de alicerce para a Gestão do Ciclo de Vida. Diferente de modelos BIM estáticos, o *Digital Twin* no contexto do MC2020 é um sistema dinâmico. Ele integra dados de monitoramento em tempo real para simular o comportamento futuro, calibrar parâmetros de segurança e viabilizar intervenções de manutenção proativas, garantindo que a estrutura cumpra sua função com máxima eficiência e mínima incerteza.

### 2.2 Protocolos de Life Cycle Management - LCM (Gerenciamento do Ciclo de Vida)

O *Life Cycle Management* - LCM (Gerenciamento do Ciclo de Vida), conforme estruturado no Capítulo 10 - *Implementation of Q&IM during LCM* do MC2020, estabelece um fluxo operacional projetado para mitigar os riscos inerentes à aceitação tardia do material. Este processo é segmentado em três etapas fundamentais:

#### FASE DE CONCEPÇÃO DA INFORMAÇÃO

Durante a etapa de projeto, estabelece-se a conformidade aos  $j$  dias como

marco de referência. Em consonância com o Capítulo 6 do MC2020, definem-se os indicadores de dados que comporão o BC, garantindo que os critérios de segurança e sustentabilidade sejam tecnicamente auditáveis.

#### EXECUÇÃO E CAPTURA ESTRUTURADA DE DADOS

No ato da concretagem, a integração de sensores *in situ* e a coleta de espécimes geram um fluxo de dados em tempo real para o BC. A robustez desse registro — incluindo o histórico térmico de cura e o desempenho mecânico em idades precoces — permite uma inferência estatística de alta confiabilidade sobre a resistência aos  $j$  dias, elevando o grau de previsibilidade do comportamento estrutural.

#### MONITORAMENTO DE DESEMPENHO (PERFORMANCE MONITORING)

O LCM utiliza o BC como ferramenta de manutenção preditiva. Em vez de uma postura reativa, aguardando o marco cronológico de  $j$  dias, o engenheiro valida continuamente a curva de maturação do concreto, assegurando que o elemento “nasça” em conformidade com as premissas de projeto.

Dessa forma, o BC atua como um instrumento de conformidade antecipada. Caso o BC apresente densidade de dados suficiente e correlação precoce positiva, o MC2020 permite o carregamen-

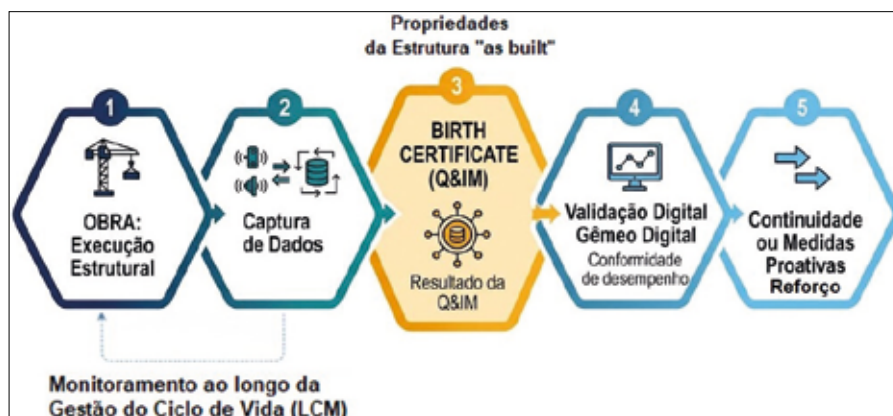
to progressivo da estrutura com base na resistência estimada, relegando o ensaio de  $j$  dias à função de auditoria final. Por outro lado, a detecção de anomalias no BC (como desvios na resistência em idades iniciais ou picos térmicos inadequados) confere ao gestor a autoridade técnica para intervir ou suspender o cronograma executivo de forma imediata e fundamentada.

O fluxo procedimental de implantação da Gestão da Qualidade da Informação durante o Gerenciamento do Ciclo de Vida (Q&IM durante o LCM) está exposto na Figura 1.

### 2.3 Modelos do fib Model Code 2020 e Eurocode 2:2023

A convergência normativa entre o MC 2020 e o *Eurocode 2:2023* consolidou uma abordagem avançada para a cinética de endurecimento do concreto. A metodologia fundamenta-se na interação de dois coeficientes críticos:  $\beta_{cc}(t)$ , que descreve a evolução da resistência à compressão no tempo,  $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ , que pondera os efeitos da carga mantida e deve ser ajustado conforme a idade de carregamento. A metodologia foi detalhadamente demonstrada por BONI & HELENE [3].

A expressão unificada para o crescimento da resistência à compressão em função do tempo é apresentada na Equação 1.



**FIGURA 1**

FLUXO PROCEDIMENTAL DE IMPLANTAÇÃO DA GESTÃO DA QUALIDADE DA INFORMAÇÃO DURANTE O GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA (Q&IM DURANTE O LCM)

FONTE: O AUTOR (2026)

$$[1] \quad f_c(t) = \beta_{cc}(t) * f_c(t_{ref}) \rightarrow \frac{f_c(t)}{f_c(t_{ref})} = e^{\left\{ s_c * \left[ 1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] * \left( \sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}}$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$ : função que representa o crescimento da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

$f_c(t)$ : resistência à compressão na idade  $t$ , dada em MPa;

$t_{ref}$ : idade de controle e referência, em dias;

$f_{c(t_{ref})}$ : resistência à compressão na idade  $t_{ref}$ , dada em MPa;

$t$ : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura.

$S_c$ : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto variando de 0,1 a 0,6 e dependente do tipo de cimento e da resistência à compressão do concreto, conforme a Tabela 1.

A expressão trata do desenvolvimento da resistência do concreto em estado descarregado, governado puramente pela maturação da matriz. Entretanto, a imposição de tensões mantidas elevadas desencadeia fenômenos cinéticos distintos: ocorre uma redução da resistência à compressão ao longo do tempo devido ao efeito de longa duração. O MC 2020 considera esses efeitos por meio do coeficiente  $\beta_{c,sus}$  apresentado na Equação 2.

$$[2] \quad \beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[ 1 + 10^4 \frac{(t - t_0)}{t_0} \right]^{-0,1}$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$ : função que representa a

### TABELA 1

VALORES DE  $S_c$  SEGUNDO MC 2020 E EUROCODE 2: 2023

Resistência à compressão do concreto (MPa)	$S_c$		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$	0,6	0,5	0,3
$35 < f_c < 60$	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$	0,4	0,3	0,1

**Nota:** As classes CS, CN e CR são determinadas em função do tipo e da classe de resistência do cimento. PODE-SE ADMITIR, PARA EFEITOS DE EQUIVALÊNCIA COM OS CIMENTOS NACIONAIS: CS (CP III ou CP IV), CN (CP I ou CP II) e CR (CP V). PARA DETERMINAÇÃO DAS CLASSES CS, CN e CR, CONSULTAR TABELA 14.6.8 "STRENGTH DEVELOPMENT CLASSES OF CONCRETE" DO *fib MODEL CODE 2020* OU A TABLE B1 "STRENGTH DEVELOPMENT CLASSES OF CONCRETE" DO *EUROCODE 2:2023* E A NORMA EN 197-1 "CEMENT - PART 1: COMPOSITION, SPECIFICATIONS AND CONFORMITY CRITERIA FOR COMMON CEMENTS".



### FIGURA 2

FLUXOGRAMA DOS CÁLCULOS DA CONCEPÇÃO SEGUNDO O MC2020 AO *BIRTH CERTIFICATE*

FONTE: O AUTOR (2026)

diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para  $(t - t_0) > 0,015$  dias ~ 20 minutos.

$\beta_{t_0}(t_0)$ : parâmetro que considera a maturidade do concreto:  $\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01.i_n(t_0)$ .

$t_0$ : idade de carregamento do concreto, em dias.  $t_0 \geq 7$  dias.

$(t - t_0)$ : tempo de carga mantida, em dias. Para  $(t - t_0) > 10$  anos, adotar  $(t - t_0) = 3650$  dias.

Para representar simultaneamente os efeitos de crescimento (hidratação) e decréscimo (carga mantida) da resistência à compressão, é necessário que efetuemos a integração das Equações 1 e 2. Esta abordagem associativa descreve a evolução líquida da capacidade resistente do material ao longo do tempo, conforme expresso na Equação 3:

$$[3] \quad f_c(t) = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) * f_c(t_{ref})$$

Quanto ao módulo de elasticidade, o MC2020 estima o desenvolvimento do módulo de elasticidade do concreto segundo a seguinte formulação:

$$[4] \quad E_{ci}(t) = \beta_E(t) * E_{ci}$$

Com:

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,33}$$

Onde:

$E_{ci}(t)$ : módulo de elasticidade em MPa na idade de  $t$  dias

$E_{ci}$ : módulo de elasticidade em MPa na idade de referência  $t_{ref}$

$\beta_E(t)$ : coeficiente dependente da idade do concreto em dias

$\beta_{cc}(t)$ : é o coeficiente de acordo com a equação (1)

Na Figura 2 é apresentado um fluxograma dos cálculos que ilustra da concepção segundo o MC2020 ao *Birth Certificate*.

## 2.4 Influência dos cimentos com adições minerais no desempenho de concretos e justificativas para a adoção de idades avançadas

### 2.4.1 SINCRONIA COM A CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DE LIGANTES DE BAIXO CARBONO

A substituição do clínquer por adições minerais altera fundamentalmente a termodinâmica do endurecimento. Diferente do Cimento Portland sem adições minerais, a reação pozolânica e a formação de produtos de hidratação secundários possuem uma cinética mais lenta. Portanto, a avaliação aos 28 dias é tecnicamente precoce para esses ligantes, pois subestima o desenvolvimento da resistência mecânica que atinge seu platô de estabilidade apenas entre 56 e 91 dias.

### 2.4.2 MATURIDADE DA MICROESTRUTURA E PARÂMETROS DE DURABILIDADE

O refinamento poroso e a densificação da matriz, essenciais para a mitigação do ingresso de agentes agressivos, consolidam-se de forma mais expressiva em idades tardias em concretos com ligantes alternativos. Ao deslocar o controle para 56 ou 91 dias, os modelos de previsão de vida útil (por exemplo, difusão de cloretos) passam a utilizar dados que refletem a microestrutura em seu estado de maturidade real, fornecendo indicadores de

durabilidade superiores aos obtidos em idades iniciais.

### 2.4.3 ALINHAMENTO COM O EUROCODE 2:2023 E O fib MODEL CODE 2020

As novas diretrizes internacionais desvinculam a resistência de projeto aos 28 dias para favorecer a eficiência estrutural. Ao estabelecer a resistência em idades tardias, o projetista permite que o *Birth Certificate* da estrutura registre uma capacidade portante otimizada e condizente com o comportamento de longo prazo. Isso assegura que os modelos de *Quality & Information Management* (Q&IM) operem com margens de incerteza reduzidas, fundamentadas na capacidade real do material.

### 2.4.4 REALISMO QUANTITATIVO E DESEMPENHO AMBIENTAL

A calibração dos indicadores de desempenho ambiental (como o  $\text{CO}_2$ /MPa) torna-se mais fidedigna em idades tardias. Nestas idades, a eficiência das adições é maximizada, permitindo que o projeto alcance metas de sustentabilidade mais ambiciosas, sem comprometer a segurança. A escolha de idades tardias converte o “ganho lento” em uma vantagem estratégica para a redução da pegada de carbono por unidade de resistência alcançada.

## 3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

A metodologia deste estudo baseia-se nas diretrizes do *fib Model Code 2020* (MC 2020) para a flexibilização das idades de controle da resistência à compressão para 91 dias. O capítulo detalha o desenvolvimento de medidas proativas de projeto estrutural, que abrangem a especificação de perfis de resistência escalonada, o ajuste paramétrico da rigidez inicial e a definição de curvas de maturidade alvo. Por meio de simulações analíticas fundamentadas nas variáveis cinéticas de ligantes de baixo carbono, propõe-se um protocolo de validação estrutural que utiliza o *Birth Certificate* e a Gestão da Qualidade da Informação (Q&IM) como instrumentos para mitigar o hiato informativo entre a execução e a idade de controle final, garantindo a segurança e a integridade do ativo ao longo de seu ciclo de vida.

### 3.1 Estratégias de design proativo: requisitos para a transição ao controle aos 91 dias

A transição para a idade de controle de 91 dias e a implementação do *Birth Certificate* (BC) exigem que o projetista estrutural transcenda a mera alteração cronológica nos carimbos de projeto. Torna-se imperativo adotar uma postura proativa, fundamentada na segurança construtiva e na durabilidade sistêmica. Conforme as diretrizes do MC 2020, as iniciativas e ajustes paramétricos fundamentais são:

#### ESPECIFICAÇÃO DE PERFIS DE RESISTÊNCIA ESCALONADA

O conceito de um  $f_{ck}$  estático deve ser substituído por um perfil de crescimento de resistência. O projetista deve definir no memorial descritivo os valores de  $f_{ckj}$  para marcos críticos da obra. É fundamental validar se a resistência intermediária aos 28 dias é suficiente para suportar as solicitações de peso próprio e as sobrecargas dinâmicas da execução.

#### DEFINIÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE ALVO

O projeto deve estabelecer a curva de referência necessária para a validação do BC. Uma nota técnica deve ser integrada ao projeto exigindo que o estudo de dosagem apresente a correlação rigorosa entre maturidade (integral tempo x temperatura) e resistência à compressão, utilizando modelos preditivos validados em laboratório.

#### SINCRONIA ENTRE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA: AJUSTE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ( $E_c$ )

A análise estrutural deve considerar que o desenvolvimento do módulo de elasticidade ( $E_c$ ) ocorre de forma mais acelerada que o ganho de resistência. O MC 2020 e o *Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2023)* fornecem equações para a evolução temporal da rigidez em idades iniciais. Em concretos com altos teores de adições minerais, o incremento de rigidez da matriz é impulsionado pelo efeito físico e pela rápida densificação inicial [4]. Isso permite que verificações de Estados Limites de Serviço (ELS), especialmente o controle de flechas, sejam validadas precocemente, mesmo com a resistência final prevista para os 91 dias.

#### EXIGÊNCIA DO PLANO DE GESTÃO DA INFORMAÇÃO (Q&IM)

O projeto deve instituir a obrigatoriedade de um sistema de monitoramento estruturado. A aceitação técnica do concreto aos 91 dias fica condicionada à integridade do *Birth Certificate*, que deve fornecer os dados de maturidade e resistências precoces necessários para validar a trajetória de desempenho prevista.

#### OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE DURABILIDADE

Concretos com elevados volumes de escória ou cinza volante resultam em matrizes mais densas e resilientes, porém mais sensíveis às condições iniciais de hidratação. O projetista pode otimizar as camadas de cobrimento e os limites de abertura de fissuras, desde que o BC assegure uma cura úmida rigorosa e verificável, em estrita conformidade com as classes de exposição ambiental do MC 2020.

### 3.2 Exemplo de validação estrutural com controle de resistência aos 91 dias

Sob a ótica do projeto estrutural, a principal desvantagem do controle da resistência à compressão aos 91 dias reside no atraso crítico para a tomada de decisões e na validação das premissas de cálculo. Esse intervalo gera um “hiato informativo” de 63 dias em relação ao marco tradicional de 28 dias, onde deve ser aplicada uma “janela de predição digital”.

A Figura 3 apresenta a simulação de monitoramento de um concreto estrutural fictício projetado para uma resistência de referência  $f_{c91}$  de 50 MPa e um carregamento da construção suposto linear.

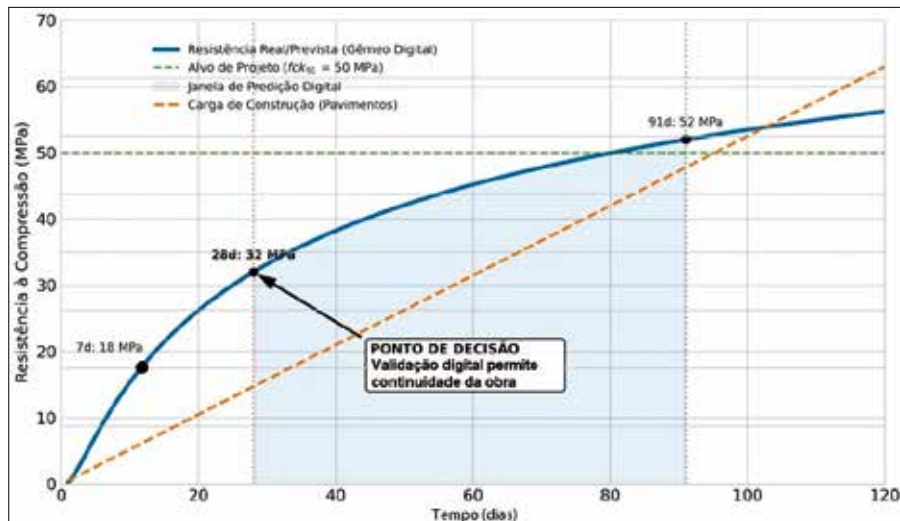
Este cenário ilustra a discrepância entre a percepção de risco convencional e a análise baseada na gestão do ciclo de vida:

#### ANÁLISE DA CURVA DE MATURAÇÃO (AZUL)

Aos 28 dias, o material atinge 32 MPa. Em um protocolo de controle tradicional, esse resultado seria classificado como uma não conformidade crítica, possivelmente acarretando paralisações onerosas ou reforços desnecessários.

#### DINÂMICA DE CARREGAMENTO (LARANJA)

A linha de Carga de Construção demonstra o incremento progressivo das



### FIGURA 3

EXEMPLO DE VALIDAÇÃO DE UM CONCRETO PROJETADO PARA UM  $f_{c91}$  DE 50 MPa

FONTE: O AUTOR (2026)

solicitações (ex: avanço dos pavimentos superiores). O desafio técnico reside em garantir que a resistência disponível no instante  $j$  supere sempre a demanda estrutural, independentemente do valor final de projeto.

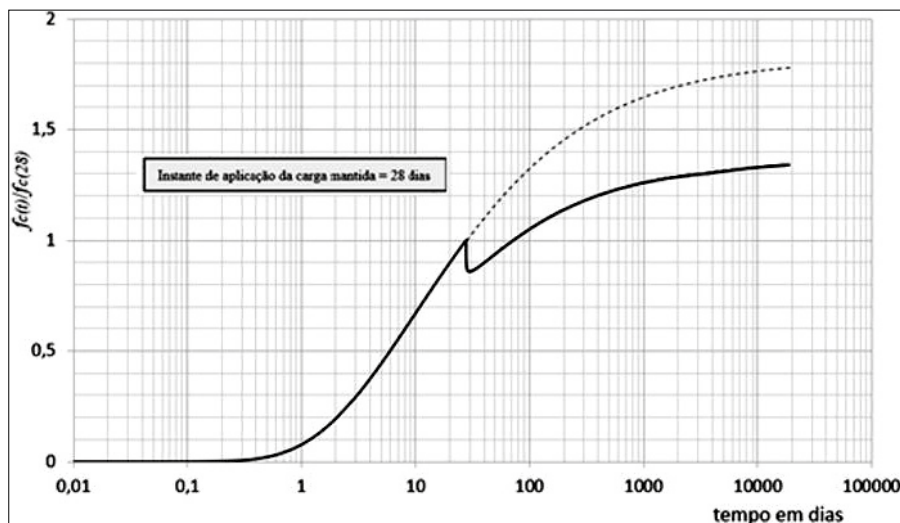
#### PREDIÇÃO VIA GÊMEO DIGITAL

Utilizando os dados reais capturados pelo *Birth Certificate* (18 MPa aos 7 dias e 32

MPa aos 28 dias), o Gêmeo Digital processa a trajetória cinética do ligante alternativo. O modelo matemático projeta uma “janela de predição” que aponta para um valor final de aproximadamente 52 MPa aos 91 dias.

#### O PONTO DE DECISÃO ESTRATÉGICA

O marco de 28 dias deixa de ser um ponto de “aprovação ou reprovação” estática



### FIGURA 4

CURVA DE CRESCIMENTO E DECRÉSCIMO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ATÉ 50 ANOS DE CONCRETOS  $Sc = 0,6$ , *fib MODEL CODE 2020*,  $t_{ref} = 28$  DIAS,  $T(\Delta t_i) = 20^\circ C$ , BONI [5]

para tornar-se um Ponto de Decisão Crítico fundamentado. Com a tendência de ganho validada pela densidade de dados precoces, o engenheiro possui respaldo técnico para autorizar a continuidade do carregamento e o avanço do cronograma executivo com segurança. A incerteza é mitigada não pela espera cronológica, mas pela capacidade analítica do sistema de gestão da informação.

### 3.3 Simulação para a curva de desenvolvimento da resistência e módulo de elasticidade para cimentos de endurecimento lento

Por meio da aplicação das formulações do modelo do *fib Model Code 2020*, a Figura 4 ilustra simulações realizadas por Boni [5] para a curva de desenvolvimento da resistência em um horizonte de 50 anos, para cimentos de endurecimento lento (Classe CS,  $Sc = 0,60$ ), caracterizados por teores elevados de escória de alto-forno (>65%) ou cinzas volantes (>35%) e um  $t_{ref}$  de 28 dias. O emprego dessas equações permite converter a variabilidade do material em uma trajetória de crescimento previsível, garantindo que a resistência de projeto seja validada tecnicamente desde a concepção.

Os resultados indicam que, para este tipo de ligante, a aplicação de carga permanente resulta em uma redução temporária de 14% na resistência combinada [ $f_{c(29)}/f_{c(28)} = 0,86$ ]. Entretanto, essa defasagem é rapidamente atenuada: aos 56 dias, a redução cai para apenas 4% [ $f_{c(56)}/f_{c(28)} = 0,96$ ]. Aos 91 dias, observa-se a plena recuperação e superação do valor de referência em 4% [ $f_{c(91)}/f_{c(28)} = 1,04$ ], evidenciando o robusto ganho de resistência progressivo do material.

Quanto à aplicação da formulação do módulo de elasticidade, a análise quantitativa da evolução inicial (7 e 14 dias) revela que este se desenvolve de forma significativamente mais célere que a resistência à compressão. Como demonstrado na Figura 5, a rigidez (linha tracejada em vermelho) precede a resistência (linha sólida em azul) nas idades precoces. No 7º dia, o ganho relativo de rigidez supera o de resistência em aproximadamente 49%. Enquanto a resistência atinge 55% do valor de projeto, a rigidez já se encontra em patamares superiores, garantindo maior estabilidade estrutural e deformações imediatas reduzidas sob carregamentos precoces.

Esta “Zona de Segurança Estrutural” (período de 21 dias com rigidez proporcionalmente superior) minimiza o risco de flechas excessivas a partir do 14º dia. Tal comportamento confirma a estratégia de concentrar a gestão de risco (Q&IM) na resistência, permitindo cronogramas de descimbramento mais dinâmicos. Finalmente, o registro desses dados no *Birth Certificate* transforma a característica de hidratação lenta em uma oportunidade estratégica de otimização de cronograma e segurança técnica.

## 5. IMPACTOS DO MC2020 NA ENGENHARIA BRASILEIRA: DESCARBONIZAÇÃO DE PROJETO VS. GARANTIA DE PRAZOS EXECUTIVOS

O principal impacto reside na mudança da unidade de medida de eficiência do projeto. Atualmente, as normas brasileiras focam na conformidade mecânica e de durabilidade de forma isolada. O MC2020 introduz o conceito de que um bom projeto deve minimizar o índice de carbono.

### 5.1 Critérios de projeto e metas de descarbonização

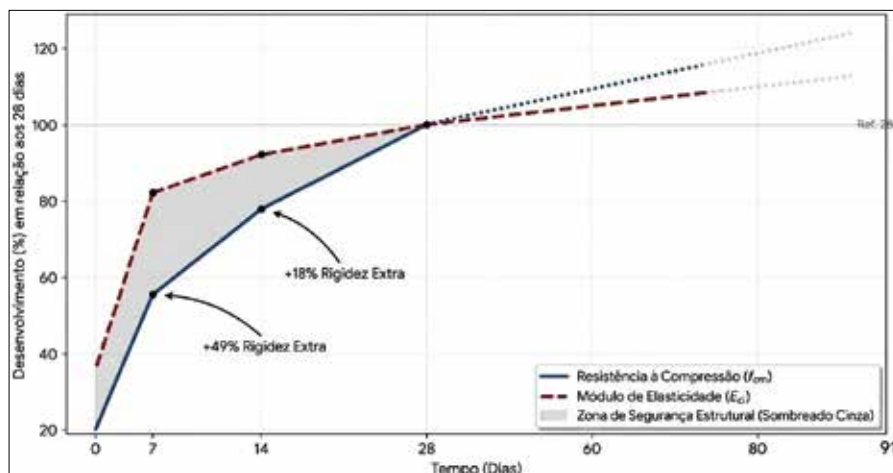
À luz das normas brasileiras, o impacto mais imediato ocorre na especificação do concreto. Enquanto a prática atual foca na conformidade aos 28 dias, o MC2020 estabelece que a ecoeficiência é um requisito de projeto.

O uso de cimentos com elevados teores de adições minerais reduz drasticamente a emissão de  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$ , mas exige que o projetista aceite um ganho de resistência mais lento. O impacto direto nos critérios de projeto brasileiros será a necessidade de:

- ▶ Substituir o  $f_{ck}$  de 28 dias por idades de 56 ou 91 dias nos memoriais descritivos;
- ▶ Adotar o Índice de Intensidade de Carbono ( $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3/\text{MPa}$ ) como parâmetro de validação do traço;
- ▶ Revisar modelos de durabilidade, uma vez que concretos com adições minerais apresentam matrizes mais densas e resilientes ao ataque de agentes agressivos em idades avançadas.

### 5.2 Dinâmica construtiva e desempenho em tempo real

A principal barreira cultural para a



**FIGURA 5**

EVOLUÇÃO TEMPORAL ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS PRIMEIRAS IDADES (7 E 14 DIAS), ( $t_{ref}$  28 DIAS)

FONTE: O AUTOR (2026)

adoção do MC2020 no Brasil é o receio de atrasos nos cronogramas físicos. No entanto, o impacto nos prazos de entrega pode ser neutralizado, ou até otimizado, mediante o uso da Gestão da Qualidade da Informação (Q&IM).

Diferente do modelo tradicional, onde se “aguarda” o resultado da prensa, a implementação do *Birth Certificate* permite:

1. **Validação precoce pela rigidez:** Como o módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) se desenvolve de forma mais célere que a resistência à compressão ( $f_c$ ), as verificações de Estados Limites de Serviço (ELS) e desformas podem ser autorizadas precocemente.
2. **Janela de predição digital:** Através de dados de maturidade capturados in situ, o gestor da obra possui uma trajetória estatística confiável da evolução do material. Isso permite o carregamento progressivo da estrutura sem comprometer a segurança, garantindo que o cronograma físico não seja impactado pela idade de controle de 91 dias.

Dessa forma, o cumprimento das diretrizes do MC2020 nas obras brasileiras converte o risco técnico em lucro de durabilidade, sem sacrificar a velocidade executiva, desde que a engenharia de dados (Gêmeo Digital) seja integrada ao ciclo de vida da estrutura.

## 6. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A transição para o paradigma da construção sustentável, consolidada pelo *fib Model Code 2020*, demanda a superação do dogma técnico dos 28 dias. A adoção de idades de referência estendidas (56 ou 91 dias) transcende o benefício ambiental; trata-se de uma decisão fundamentada na cinética de hidratação de ligantes de baixo carbono, permitindo ao projetista sintonizar a resistência de controle com as solicitações reais da estrutura ao longo de sua vida útil. Embora o ganho de resistência à compressão seja mais lento nesses compostos, o desenvolvimento do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) ocorre de forma acelerada, assegurando a rigidez necessária para a estabilidade e o Estado Limite de Serviço (ELS) em fases precoces da obra.

É imperativo o aprimoramento técnico dos profissionais envolvidos para compatibilizar as particularidades de cada sistema construtivo com as novas tecnologias de concreto. Em edifícios de múltiplos pavimentos, por exemplo, o aproveitamento do desenvolvimento tardio do módulo de elasticidade pode ser limitado pelos ciclos de concretagem e pelo cronograma de descimbramento. O sistema de escoramento exige que as lajes alcancem rigidez e resistência precoces para suportar o carregamento das etapas superiores, o que pode restringir o benefício do ganho tardio

apenas aos elementos de fundação e pilares.

Em contrapartida, considerando que edifícios de apartamentos representam apenas 14,86% das habitações no país [6], a maioria das construções brasileiras consiste em residências unifamiliares. Nestas obras, a distribuição de cargas sobre lajes inferiores via cimbramento costuma ser menos crítica ou inexistente, tornando a aplicação de concretos de baixo carbono e cura lenta significativamente mais viável e vantajosa do ponto de vista técnico-econômico.

Para mitigar o hiato informativo entre a execução e a idade de controle final, a implementação da Gestão da Qualidade e da Informação (Q&IM) torna-se mandatória. O *Birth Certificate*, conforme preconizado no fib Bulletin 93, atua como o elo de segurança, convertendo dados de maturidade e ensaios iniciais em trajetórias de desempenho validadas. A integração entre o MC2020 e o *Life Cycle Management* (LCM) converte a redução de clínquer em um 'lucro técnico' de durabilidade superior.

Por meio da validação digital, o *Birth Certificate* deixa de ser uma formalidade para se tornar um instrumento de precisão, garantindo estruturas resilientes, seguras e em estrita conformidade com os imperativos climáticos.

Em última análise, a convergência entre o MC2020 e a engenharia brasileira converte o 'ganho lento' das adições minerais em um ativo de durabilidade superior, desde que amparado por uma governança rigorosa de dados (Q&IM) ao longo de todo o ciclo de vida da obra. ☺

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne: version 1, 2023.
- [2] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). Bulletin 93: Birth Certificate and Through-Life Management Documentation. Lausanne: fib, 2020.
- [3] BONI, RICARDO; HELENE, PAULO. Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, [Maceió]. Anais. São Paulo: ISSN 2175-8182. IBRACON, 2024.
- [4] NEVILLE, A. M. (2011). Properties of Concrete. 5th Edition. Pearson Education.
- [5] BONI, RICARDO. Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto. 2025. Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2025.
- [6] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: Domicílio. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html?localidade=BR&tema=2>. Acesso em: 4 maio 2026

# Concrete Show

by informa

25-27 agosto | 2026 | São Paulo Expo

**Participe do principal evento de construção civil e infraestrutura da América Latina**

- EQUIPAMENTOS • EXPERIÊNCIAS IMERSIVAS
- CONGRESSO • ARENAS • ÁREA EXTERNA

Promoção e Organização



**Garanta seu ingresso!**

[concreteshow.com.br](https://concreteshow.com.br)



**+26 mil** visitantes qualificados

**+450** marcas expositoras

**+36 mil** m<sup>2</sup> de área de exposição



**+70** palestrantes

**+50** horas de conteúdo

**80%** do público formado por decisores

