

Curso Master Internacional em
Patologia Avançada III



Profilaxia do Concreto: Projeto, Controle, Conformidade



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

Paulo Helene

*Diretor PhD Engenharia
Prof. Titular Universidade de São Paulo
Diretor e Conselheiro Permanente IBRACON
Presidente Honorífico ALCONPAT Internacional
Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design*

IEP

25 de Outubro de 2016

Curitiba/PR

1

Intervenientes



**projetista
estrutural**



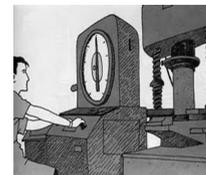
**fornecedor
do material**



**construtora
(execução)**



**tecnologista
(consultor)**



**laboratório
(controle)**

**atribuição de incumbências
ABNT NBR 12655:2015**

2

- **Projeto**
- ***Central de concreto***
- ***Dosagem***
- ***Insumos (materiais)***
- ***Carta de traço***
- **Controle de recebimento**
- **Controle de aceitação**
- **Laboratórios de controle**
- **Execução**
- **Não conformidades**
- **Intervenções corretivas**

3

- **Projeto**
- **Controle de recebimento**
- **Controle de aceitação**
- **Laboratórios de controle**
- **Execução**
- **Não conformidades**
- **Intervenções Corretivas**

4

PROJETO

ABNT NBR 6118:2014
*“Projeto de estruturas de concreto –
Procedimento”*

ABNT NBR 12655:2015
*“Concreto de cimento Portland - Preparo,
controle, recebimento e aceitação -
Procedimento”*

ABNT NBR 15575-1:2013
*“Edificações habitacionais – Desempenho
Parte 1: Requisitos gerais”*

5

ABNT NBR 15575-1:2013 ***“descreve responsabilidades”***

5. INCUMBÊNCIAS DOS INTERVENIENTES

✓ *Projetista:*

- estabelecer a Vida Útil de Projeto (VUP);
- especificar materiais, produtos e processos que atendam o desempenho mínimo estabelecido;
- solicitar informações ao fabricante para balizar as decisões de especificação quando não existirem normas específicas;
- inserir nos projetos ou memoriais de cálculo a consideração de VUPs maiores que os mínimos estabelecidos nesta norma.

6

ABNT NBR 12655:2015

4. ATRIBUIÇÕES DE INCUMBÊNCIAS

✓ *Profissional responsável pelo projeto estrutural*

Cabem a este profissional as seguintes responsabilidades, a serem explicitadas nos contratos e em todos os desenhos e memórias que descrevem o projeto tecnicamente, com remissão explícita para determinado desenho ou folha da memória:

- *registro da resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , obrigatório em todos os desenhos e memórias que descrevem o projeto tecnicamente;*
- *especificação de f_{ckj} para as etapas construtivas, como retirada de cimbramento, aplicação de protensão ou manuseio de pré-moldados;*
- *especificação dos requisitos correspondentes à durabilidade da estrutura e elementos pré-moldados, durante sua vida útil, inclusive a classe de agressividade adotada em projeto (Tabela 1 e 2);*
- *especificação dos requisitos correspondentes às **propriedades especiais** do concreto, durante a fase construtiva e vida útil da estrutura.*

7

Propriedades especiais do concreto

- *módulo de elasticidade (E_c);*
- *massa específica;*
- *absorção de água;*
- *teor de ar;*
- *porosidade;*
- *resistência à abrasão;*
- *dureza superficial;*
- *consistência;*
- *tempo de pega inicial e final;*
- *outras, relacionadas à durabilidade ou ao comportamento mecânico do material.*

8

ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 12655:2015

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.

9

ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 12655:2015

Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

10

ABNT NBR 6118:2014

Tabela 7.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Para concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos definidos na Tabela 7.2 podem ser reduzidos em até 5 mm.

11

Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto

12

Definições

ABNT NBR 6118:2007 item 8.1:

- E_{ci} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c ;
- E_{cs} → módulo de elasticidade secante do concreto, também denominado módulo de deformação secante do concreto;
- $E_{ci}(t_0)$ → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0 ;
- E_{ci28} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias.

ABNT NBR 6118:2014 item 8.2.8:

O módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade;

O módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, ou estimado pela expressão:

$$E_{cs} = E_{ci} (0,8 + 0,2 f_{ck}/80) \leq 1,0;$$

$E_{ci}(t_0)$ → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0 ;

E_{ci28} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias.

13

Definições

EUROCODE 2 item 1.6:

- E_c → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$;
- $E_{c,eff}$ → effective modulus of elasticity of concrete (item 7.4.3);
- E_{cd} → design value of modulus of elasticity of concrete;
- E_{cm} → secant modulus of elasticity of concrete between $\sigma_c = 0$ and $0,4f_{cm}$;
- $E_c(t)$ → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$ and at time t .

fib Model Code 2010 – Notations:

- E_c → modulus of elasticity for concrete;
- $E_{ci}(t_0)$ → tangent modulus of elasticity of concrete at the time of loading t_0 ;
- E_{ci} → tangent modulus of elasticity of concrete at an age of 28 days;
- $E_{ci}(t)$ → modulus of elasticity of concrete at an age $t \neq 28$ days;
- $E_{c,i}$ → secant modulus from the origin to the peak compressive stress (Table 5.1-8);
- $E_{c,imp}$ → modulus of elasticity of concrete for impact loading (item 5.1.11.2.4).

ACI 318-14 item 2.2:

- E_c → modulus of elasticity of concrete;
- E_{cb} → modulus of elasticity of beam concrete;
- E_{cs} → modulus of elasticity of slab concrete.

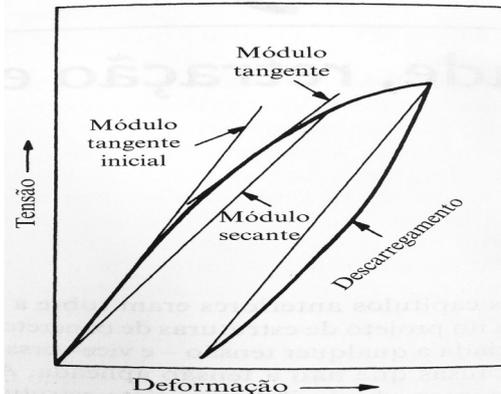
14

Definições

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.:

Módulo de elasticidade tangente inicial: parte reta da curva na tensão-deformação ou, quando não houver um trecho reto, à tangente da curva na origem → importância prática limitada.

Módulo secante: a deformação que ocorre durante o carregamento é considerada elástica, e o subsequente aumento da deformação é atribuído à fluência.



15

Fatores intervenientes

A. Diretos

1. Relação água/cimento: (*inverso*)
2. Natureza do agregado: (*direto*)
Basalto, diabásio, granito, gnaisse, calcário, arenito, meta-sedimento
3. Teor de argamassa seca: (*inverso*)
 $(1+a)/(1+m)$
4. Fração pasta: (*inverso*)
 $(1+a/c)/(1+m+a/c)$
5. Fração agregado: (*direto*)
 $(1+a+p)/(1+m)$
6. Adições: (*inverso*)
7. Umidade do corpo de prova (*inverso*)
8. Teor de ar incorporado ou aprisionado: (*inverso*)

Indiretos:

1. Resistência à compressão (*direto*)
2. Consistência (slump) (*inverso*)

16

Como ensaiar?

Ensaio Estático

ABNT NBR 8522:2008 (Em revisão)

Item 3.5 Módulo de deformação secante (E_{cs}): Propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão σ_a e à tensão considerada no ensaio;

Item 3.6 Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}): módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado **equivalente** ao módulo de deformação **secante** ou cordal entre σ_a e $30\%f_c$ para o carregamento estabelecido neste método de ensaio;

17

Como ensaiar?

Ensaio Estático

ABNT NBR 8522:2008 (Em revisão)

- Módulo de elasticidade tangente inicial, E_{ci} , a $0,3$ de f_c , com escorvação prévia do corpo de prova.
- Módulo de elasticidade a uma deformação solicitada. Anexo A: determinação do módulo secante a qualquer tensão especificada entre $0,2*f_c$ e $0,8*f_c$, sem escorvação.

18

Como ensaiar?



ABNT NBR 8522:2008 (Em revisão)

19

Variações dentro ensaio NBR 8522

Item 8.1 - Repetitividade no laboratório:
Dispersão máxima de 5%, entre dois resultados;
Item 8.2 - Reprodutibilidade entre laboratórios:
Dispersão máxima 10%, entre dois resultados.

Variações interlaboratoriais

Dados do Interlaboratorial do INMETRO 2013 mostram desvios padrões até 6,9GPa para f_{cm} de 46MPa.

Tolerâncias da especificação - NBR 6118

Não prevê tolerâncias nos resultados para aceitação.
Resultado do ensaio \geq Especificado pelo projetista

20

Outras formas de determinar

Métodos dinâmicos:

Velocidade de propagação ultrassônica → ASTM C597-09

Este método de ensaio é utilizado para avaliar a uniformidade, a qualidade relativa do concreto e indicar a presença de vazios. A resultante de módulo de elasticidade é obtido de forma indireta.

Estímulo por impulso → ASTM E1876-09

O método de determinação do módulo dinâmico pelo estímulo por impulso consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um pulsador no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

21

Tomada da velocidade de propagação ultrassônica

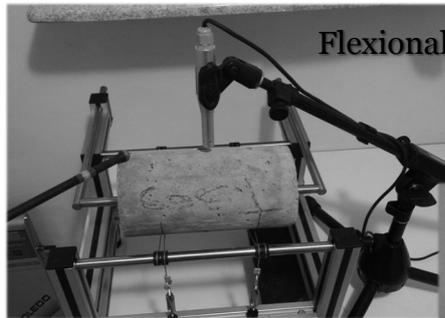
Bancada de ensaios PhD



22

Estímulo por impulso

Bancada de ensaios PhD



23

Dados bibliográficos

Relação entre o módulo dinâmico e estático

Resistência à compressão	Mehta & Monteiro: 2014	Almeida: 2008	
		Estímulo por impulso	
	Ensaio dinâmico em geral	Flexional	Longitudinal
Baixa ≤ 20 MPa	1,40	1,28	1,34
Média $20 < f_{ck} < 40$ MPa	1,30	1,21	1,27
Alta ≥ 40 MPa	1,20	1,06	1,08

24

Dados bibliográficos

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.:

Relação entre o módulo dinâmico e estático

Resistência à compressão	E_c [GPa]	E_d [GPa]		
		Mehta & Monteiro	BS CP 110	Lydon & Balendran
20MPa	25,0	35,1	35,2	30,2
35MPa	33,1	43,1	41,7	39,9
50MPa	39,6	47,5	46,9	47,7

25

De: Thainan Almeida .Phd Engenharia [mailto:thainan.almeida@concretophd.com.br]

Enviada em: sexta-feira, 15 de agosto de 2014 15:41

Para: carlos.britez@concretophd.com.br; Ricardo Boni Gomes Rolim .PhD Engenharia

Boa Tarde.

Prezado Carlos,

A concretagem na segunda - feira foi adiada.

Hoje em inspeção nas vigas já armadas. foi verificado que a viga V1 entre os pilares C1 e C2 faltava uma camada de 7 barras Ø 20, de acordo com o projeto ES-EX-003A-R 06) disponível em obra para conferência dos encarregados, junto com o Eng. Ricardo Boni orientamos a seguir o projeto e colocar à 3 º camada prevista, conforme foto anexa.

Att.,

Thainan

26

Em 22 de abril de 2016 11:40, Rachel Morais .PhD
Engenharia <rachel.morais@concretophd.com.br> escreveu:

Prezado Prof. Paulo Helene,

Conforme conversamos anteriormente sobre a obra de reforço estrutural do empreendimento comunico-lhe formalmente que no dia _____ a Eng^a. _____ responsável pelo acompanhamento do reforço estrutural do referido empreendimento, realizou a FVS – Ficha de Verificação de Serviço da armação da parede de ligação interligada aos pilares da junta estrutural (P34-P35 e P41-P42 – 12º Pavimento) aprovando de modo indevido, tendo em vista que, esta PhD detectou que 24 barras (verticais) Ø 12.5mm foram substituídas por barras Ø 10mm, inclusive, faltavam 26 barras (horizontais) Ø 12.5mm.

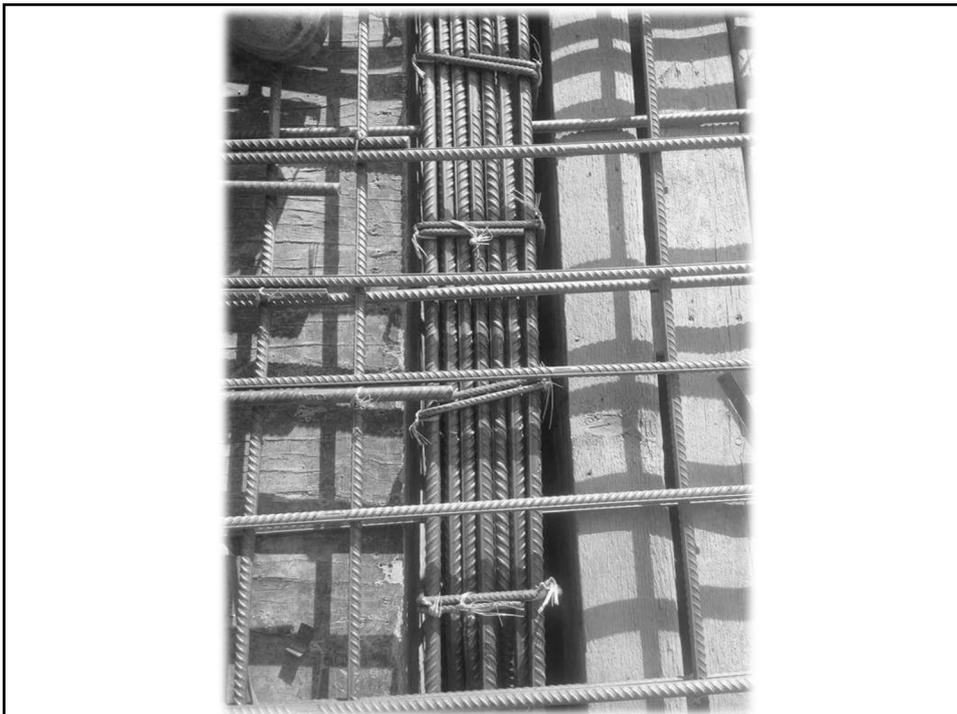
Mediante o exposto, esta PhD solicitou a presença dos envolvidos e orientou que fosse realizada adequadamente as disposições da armação da parede de ligação (P34-P35 e P41-P42 – 12º Pavimento) conforme as especificações existentes no projeto *Folha: 2199-ARM-PIL-017-R01*.

Por fim, registra-se que a empresa responsável pela execução do reforço estrutural realizou as adequações conforme as orientações desta Consultoria. A cópia da FVS assim como o arquivo em PDF do projeto da _____ seguem anexos para consulta.

Atenciosamente,

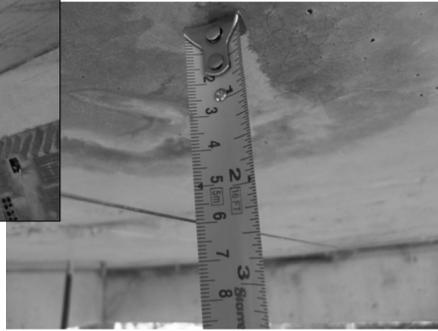
Rachel Morais
Tecnóloga da Construção Civil
Tel.: 55-11-9-5051-4605 ou tel.: 55-11-2501-4822
Rua Visconde de Ouro Preto 201 São Paulo SP 01303-060
rachel.morais@concretophd.com.br
www.concretophd.com.br

27



28

Flechas excessivas

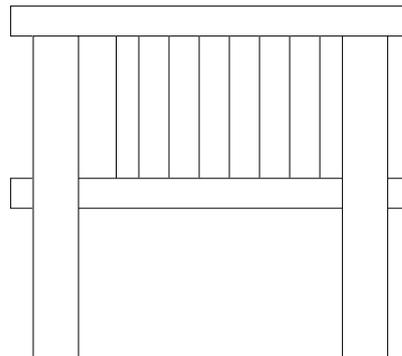


29

laje+vigas com espessura média de
22cm → 550kg/m²

dimensionada para 150kg/m²

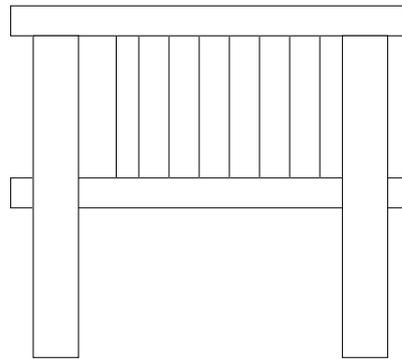
1 ano de idade



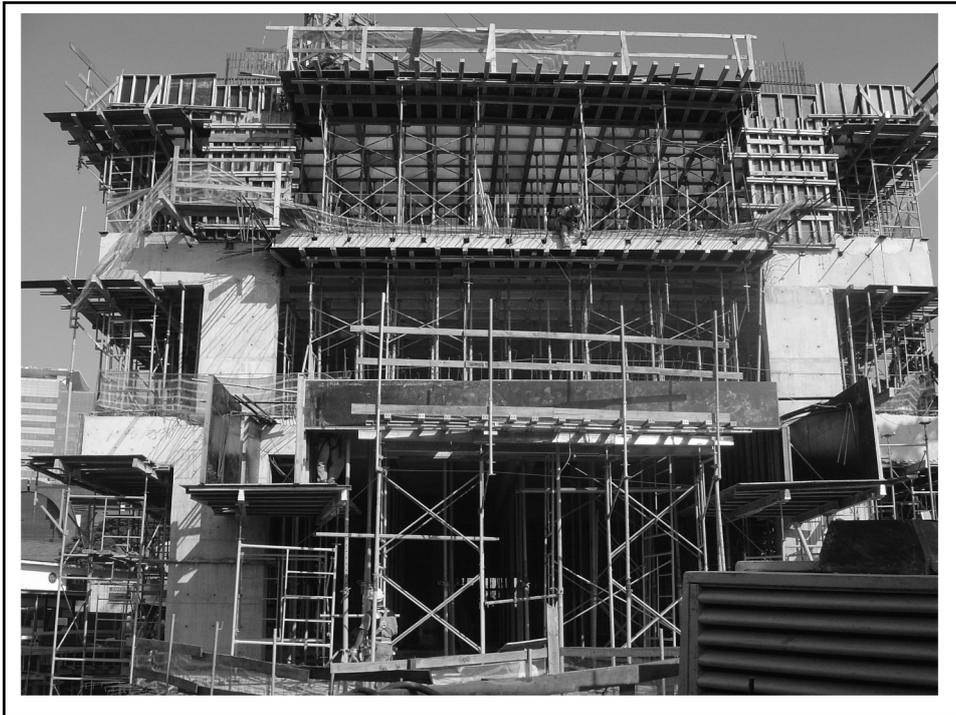
30

tem o módulo; tem o f_{ck}
mas não foi dimensionada
para essa carga

1 ano de idade



31



32

Shopping Center

11.06.2013

colapsou 40.000m²

4 lajes protendidas

3 pavimentos

vãos 7,5m x 7,5m

obra em construção

33



34



35



36



37



38

Comunicado

Shopping Rio Poty

O Shopping Rio Poty vem a público esclarecer a causa do incidente verificado na madrugada de 11/07, bem como detalhar seu plano de retomada das obras, tornado possível após reunir técnicos de renome nacional em colaboração com as autoridades públicas. A conclusão irrefutável a que se chegou foi de que o incidente se deveu a um erro de execução específico e pontual. É importante frisar que, por se tratar de erro isolado, fica garantida a continuidade do projeto. Abaixo a descrição do que ocorreu:

1 Antes de iniciada a concretagem de um trecho específico da Laje do 5º pavimento (L5), foi retirado INADVERTIDAMENTE o escoramento da Laje do 4º pavimento (L4), que se encontrava parcialmente tensionada.

Na fase final da concretagem de trecho do L5, a soma das cargas de duas lajes (L4+L5), sob uma única laje (L4) PARCIALMENTE TENSIONADA e NÃO ESCORADA, acarretou no colapso em cadeia da estrutura.



39

Investigación:

¿Cual es el Concreto Estructural más Sustentable?

$$f_c = 25\text{MPa (250kgf/cm}^2\text{)}$$

$$f_c = 30\text{MPa (300kgf/cm}^2\text{)}$$

$$f_c = 35\text{MPa (350 kgf/cm}^2\text{)}$$

40

Investigación: edificio en hormigón reforzado

- Planta baja;
- 8 pisos tipo;
- cobertura, escaleras y reservatorio superior

análisis comparativa:

- 25MPa;
- 30MPa, mantenidas las mismas dimensiones de las piezas estructurales de 25MPa;
- 35MPa, con reducción de las dimensiones de las piezas.

Área estructural obtenida fue de 2.078 m².
Por lo tanto la carga característica de 0.55 tf/m² (carga permanente + carga accidental).

41

Investigación: edificio en hormigón reforzado

25 MPa :

Cemento: 310 kg

Arena: 870 kg = 0,53 m³ arena / m³ hormigón

Grava: 930 kg = 0,52 m³ grava / m³ hormigón

Agua: 180 kg (o litros)

30 MPa :

Cemento: 340 kg

Arena: 770 kg = 0,47 m³ arena / m³ hormigón

Grava: 970 kg = 0,54 m³ grava / m³ hormigón

Agua: 180 kg (o litros)

35 MPa :

Cemento: 370 kg

Arena: 744 kg = 0,45 m³ arena / m³ hormigón

Grava: 960 kg = 0,53 m³ grava / m³ hormigón

Agua: 180 kg (o litros)

42

**Investigación: edificio en hormigón reforzado
Cantidad de materiales**

Para 25MPa :

hormigón	encofrado	acero
471 m ³	4596 m ²	41619 kg
0,23 m ³ /m ²	2,20 m ² /m ²	20,0 kg/m ²
		88,0 kg/m ³

Para 30MPa :

hormigón	encofrado	acero
471 m ³	4596 m ²	40130 kg
0,23 m ³ /m ²	2,20 m ² /m ²	19,3 kg/m ²
		85,1 kg/m ³

Para 35MPa :

hormigón	encofrado	acero
401 m ³	4464 m ²	39596 kg
0,19 m ³ /m ²	2,10 m ² /m ²	19,1 kg/m ²
		98,7 kg/m ³

43



RESEARCH REPORT R11-01, **Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle**, Department of Civil and Environmental Engineering, Concrete Sustainable Hub, Massachusetts Institute of Technology, august, 2011.

ILCD handbook – **International reference Life Cycle Data System; General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance**, Publications Office of the European Union, 2012, 394 p.

ISO 14025:2006

Environmental labels and declarations - Type III

44

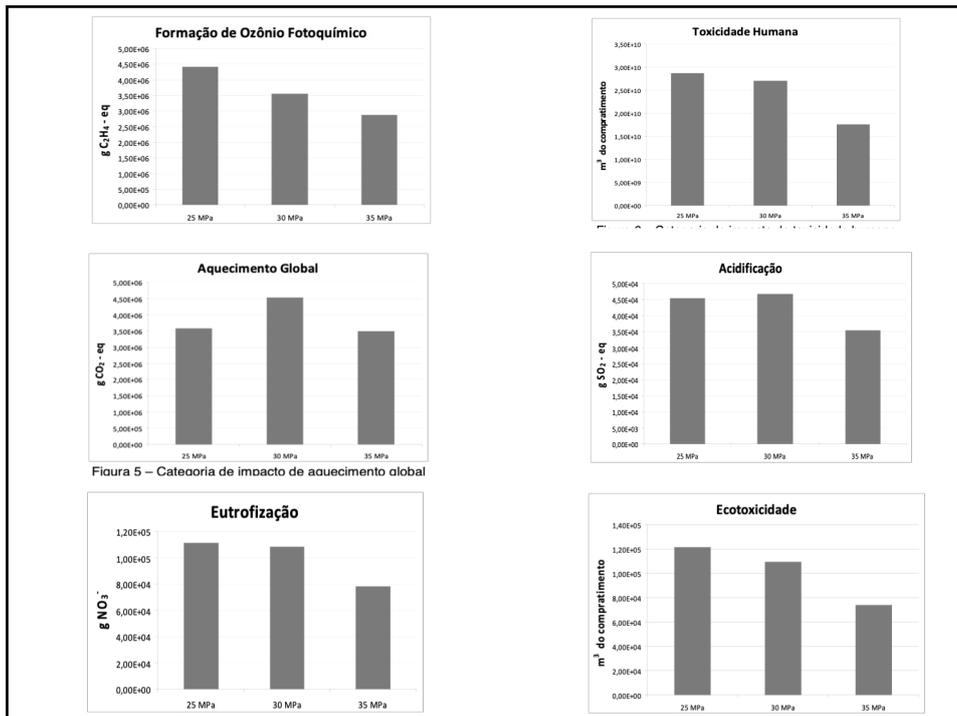
Investigação: edifício de hormigón armado

Indicadores de impacto ambiental

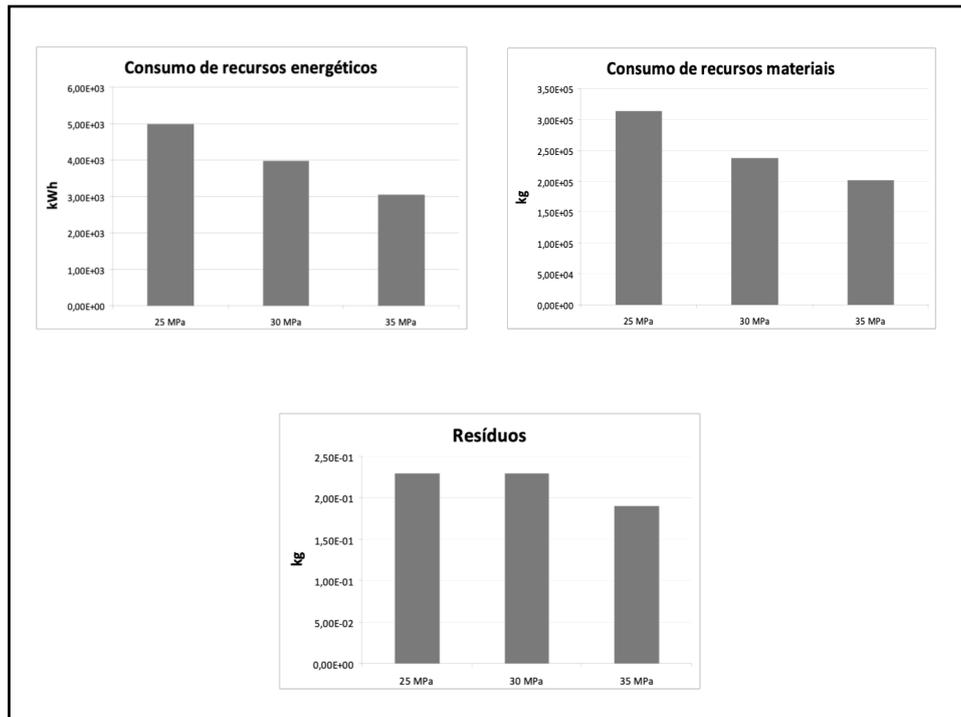
	25 MPa	30 MPa	35 MPa
Eutrofização	Mayor	Medio	Menor
Formación de ozono fotoquímico	Mayor	Medio	Menor
Consumo de recursos Materiales	Mayor	Medio	Menor
Consumo de recursos energéticos	Mayor	Medio	Menor
Ecotoxicidad	Mayor	Medio	Menor
Calentamiento Global	Medio	Maior	Menor
Toxicidad humana	Maior	Medio	Menor
Acidificación	Medio	Maior	Menor
Resíduos	Medio	Maior	Menor

Ricardo BENTO, doutorado IAU.USP.

45



46



47

Investigación: edificio en Hormigón Reforzado

Este es una investigación del Ing. Ricardo Bento y es parte de su tesis de Doctorado que todavía está en curso (andamio / progreso)

“Mismo que no esté totalmente concluida ya es posible afirmar que hubo una ventaja clara en substituir hormigón de 20MPa por hormigón de 35MPa en un edificio de clase mediana baja con apenas 8 pisos.”

“Los estudios en progreso van analizar otras situaciones, casas y edificios altos (>25 pisos) para comprobar que se puede generalizar estas conclusiones parciales pero muy promisoras y a favor del desarrollo de los hormigón de altas prestaciones (alto desempeño)”

48

Investigación: edificio en Hormigón Reforzado

Conclusión:

Para todas las categorías de impacto la estructura de f_c 45 MPa es ambientalmente la mejor, la que causa los mínimos impactos al medio ambiente

Ricardo BENTO, doutorado IAU.USP.

49



50

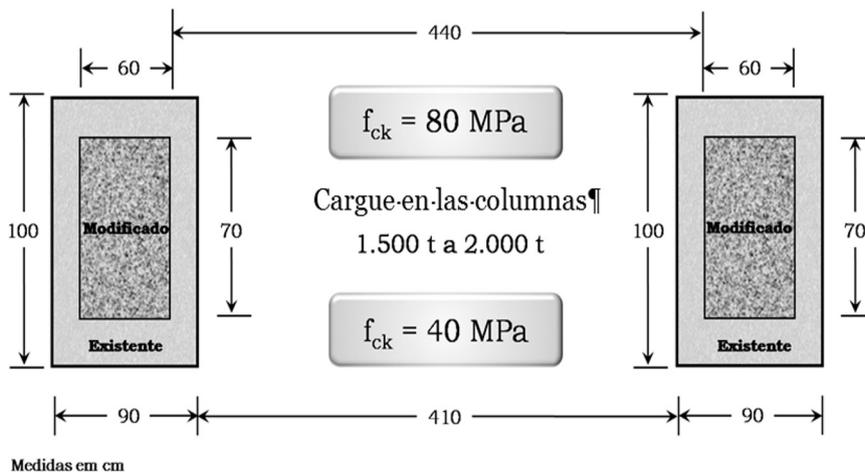
e-Tower

- Edificio e-Tower SP
- 42 pisos
- Helipuerto
- Piscina semi-olímpica
- Academia de gimnasia
- 2 restaurantes
- hormigón coloreado
- f_{ck} columnas = 80MPa



51

Proyecto estructural (e-Tower)



52



53



54



55

Economía de Recursos Naturales

Original:

$$f_c = 40\text{MPa}$$

$$\text{sección transversal} \rightarrow 90\text{cm} \times 100\text{cm} \\ = 0,90\text{m}^2$$

HPC / HSC:

$$f_c = 80\text{MPa}$$

$$\text{sección transversal} \rightarrow 60\text{cm} \times 70\text{cm} \\ = 0,42\text{m}^2$$

56

Sustentabilidad



- **70% menos arena**
- **70% menos grava**
- **53% menos hormigón**
 - **53% menos agua**
- **20% menos cemento**
- **31% menos area de molde**

57

Sustentabilidad



- **25% mas de reaprovechamiento del molde**
 - **43% menos acero**
 - **16 coches a mas**
- **10x vida útil más grande**
- **100% desforma más rápida**

58

Puntos Importantes

Concepto de rendimiento:

Considerando apenas el contenido de cemento:

hormigón 120MPa → 4,0kg/MPa
→ 1,2kg Clinker / MPa

hormigón de 40MPa → 6,7 kg/MPa
→ 2,1kg Clinker / MPa

hormigón de 20MPa → 11,5 kg/MPa
→ 3,5kg Clinker / MPa

59

OBRIGADO !



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

www.phd.eng.br

11-2501-4822 / 23
11-95045-5408

60