

- Joven Parcerero ✓Productividad Responsabilidad Social

Tecnología de Concreto, Estudios Térmicos para Concretagem dos blocos de grandes dimensões da 2ª Ponte Mista sobre o Rio Orinoco.

DESCRIPÇÃO SUMÁRIA

Se as estruturas tivessem total liberdade para deformar-se, quando sujeitas a uma variação térmica, o concreto não seria submetido a nenhum esforço interno, sofrendo apenas variações em suas dimensões, proporcionais aos gradientes térmicos aplicados.

No entanto, sempre existem restrições externas e/ou internas às deformações do concreto, resultantes da ligação das estruturas com suas fundações ou com outras estruturas, da ligação do concreto com as armaduras (no caso de concreto armado) e também da coesão interna do próprio concreto. Tais restrições provocam o surgimento de esforços no interior da estrutura, os quais poderão causar a fissuração do concreto, caso superem a sua capacidade de resistir.

Os blocos da Ponte são estruturas maciças, com grande volume de concreto, com resistência característica de até 30MPa. Estas características, associadas ao lançamento do concreto à temperatura ambiente, fez com que as temperaturas no interior destes atingissem valores superiores a 70°C. O posterior resfriamento do concreto, com tendência ao equilíbrio com a temperatura ambiente, leva à ocorrência de retração da estrutura, o que poderá levar o concreto à fissuração, caso esses esforços superem a capacidade do concreto de resistir.

Por estas razões, se esboça o estudo térmico, com o propósito de planejar o modo mais satisfatório para a execução de concretagem volumosa das sapatas e blocos. Considera-se a velocidade de lançamento, o traço do concreto com relação à dosagem, a presença de cimento e a micro sílica, as alturas das camadas, a prática da cura e as condições ambientais do lugar, visto que todas estas variáveis, impactam diretamente nas variações de temperatura, que se apresentam na massa do concreto.

SITUAÇÃO ANTERIOR

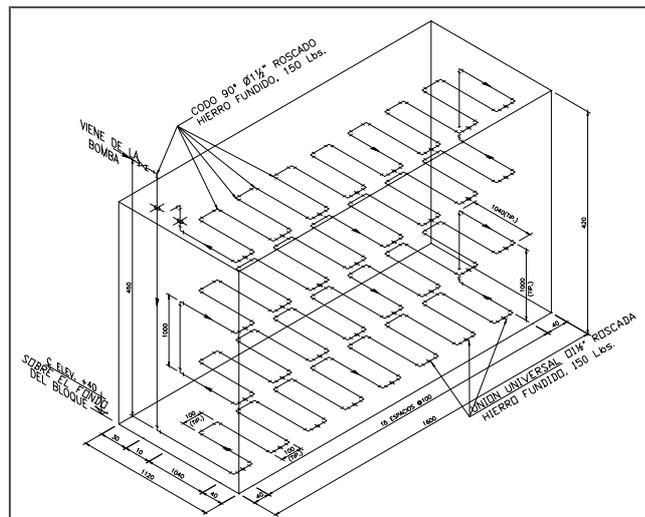
Para as concretagem de blocos e sapatas, a velocidade de lançamento é uma variável que poderia influenciar diretamente no Cronograma e Planejamento das Obras e impactar significativamente nos prazos pactuado com o Cliente.

O calor de hidratação gerado pela reação química do cimento, poderia causar fissuras na estrutura, exigindo deste modo uma seqüência de concretagem, não produtiva que poderia impactar nos ciclos de lançamento.

- Joven Parcerero □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social

Alternativas Estudadas para a solução do problema:

- Minimizar os efeitos térmicos do concreto com a utilização de gelo;
- Diminuir a velocidade de concretagem, fragmentando os lançamentos;
- Instalar serpentinas distribuídas na estrutura, para permitir a circulação de água, com o propósito de provocar uma troca de calor com o concreto, promovendo o resfriamento do mesmo.



Todas estas alternativas, poderiam gerar custos adicionais e perda de tempo na linha de produção.

IDÉIAS E AÇÕES INCORPORADAS

Foi programado junto com Furnas, através do seu Centro Tecnológico de Engenharia Civil (Brasil-Goiânia) um estudo minucioso dos concretos aplicados na obra, o que incluiu a caracterização completa dos materiais de construção utilizados, estudos de dosagem racional, e um estudo térmico, prevendo o monitoramento do comportamento das Estruturas, através de termômetros, instalados quando da produção dos concretos fresco, nas diversas estruturas..

Com todo um sistema de monitoramento instalado, sob orientação direta de Furnas, foi estabelecida uma sistemática de controle que permitisse uma troca de informações em tempo real, entre o pessoal do Laboratório de ODEBRECHT (Setor de Controle e Garantia da Qualidade) instalado na Obra e o os Especialistas do Centro Tecnológico de Furnas, localizado em Goiânia-Brasil.

Desta forma o Modelo Matemático, rodado em Furnas, alimentado em uma 1ª instância por variáveis teóricas, fosse realimentado com os dados reais de campo obtidos pelos instrumentos instalados, em um processo interativo contínuo, visando promover os ajustes necessários, no processo construtivo, que permitissem garantir a manutenção de temperaturas seguras, evitando os

- Joven Parceros □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social

riscos de ocorrência de fissuração das estrutura, mantendo o nível de produtividade programada por ODEBRECHT, nas suas frentes de serviço.

Foram disparadas as seguintes Ações em nível de Controle Tecnológico:

- Intervir na Dosagem e reduzir o consumo de cimento, ainda garantido as resistências de Projeto;
- Adicionar microsilica no concreto, com o propósito de diminuir o calor de hidratação da mistura;
- Monitorar por sensor tipo Carlson, o comportamento térmico do concreto durante a reação química instalada.

ORIGEM DO CONHECIMENTO

O conhecimento tem a sua origem, na experiência dos integrantes do Corpo Técnico de ODEBRECHT, lotado na Obra da 2ª Ponte Mista sobre o Rio Orinoco, apoiada por seus Projetistas representado pela empresa Figueiredo Ferraz, contando com a competente consultoria contratada de Furnas, a experiência vivida pela empresa Simpca, (Empresa Venezuelana local - maior fornecedor de Concreto) e EDELCA empresa da estatal CVG com experiência na construção de grandes barragens.

A fissuração térmica do concreto é um problema bastante conhecido na construção de estruturas de concreto massa. Na construção de estruturas de barragens e usinas hidrelétricas, FURNAS realiza, rotineiramente, análises térmicas do concreto massa, tanto em obras de sua propriedade como em obras em que tem atuado como controle da qualidade durante a construção, inclusive em diferentes obras da ODEBRECHT.

O Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta de considerável precisão no cálculo das temperaturas no interior das estruturas de concreto, permitindo a simulação da construção incremental das estruturas, em camadas sucessivas.

A análise das tensões foi realizada através de um método numérico desenvolvido por FURNAS, levando em consideração o comportamento visco-elástico linear com envelhecimento do concreto, com emprego do modelo logarítmico para descrever a fluência do concreto. Admitida a aplicabilidade do princípio da superposição de Boltzmann-McHenry, à equação constitutiva do modelo visco-elástico linear com envelhecimento do concreto, utilizada no cálculo da história das tensões térmicas horizontais, foi a seguinte:

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t f(z, t-z) \cdot \sigma(z) dz \quad (t \geq z) \quad (1)$$

Onde $\varepsilon(t)$ é a história das deformações de origem térmica.

A resolução numérica da equação (1) pode ser feita da seguinte maneira:

- Joven Parceros □ √Productividad □ Responsabilidad Social

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^j f_{ij} \cdot \nabla \sigma_i \quad (t \geq z) \quad (2)$$

Pode-se representar a equação (5) na forma matricial:

$$[\varepsilon_j] = [f_{ij}] [\nabla \sigma_j] \quad (3)$$

onde:

$$[\varepsilon_j] = \text{Vetor (n) de deformações de origem térmica} = \alpha \cdot \delta T = \alpha \cdot (T_i - T_l);$$

$[f_{ij}] = \text{Matriz (n, n) cujo elemento da linha j e da coluna } i \geq j \text{ é a fluência do concreto na idade } t_j, \text{ com nascimento na idade } z_i, . \text{ De uma maneira mais simplificada, pode-se dizer que a matriz } f_{j,i} \text{ é triangular com a parte superior nula, cujas colunas são um ensaio de fluência com nascimento em } z_i, \text{ onde a diagonal representa o início do ensaio da fluência, isto é } f_{j,i} = 1/E(z_i).$

Para a determinação da tensão de origem térmica, basta isolar $\delta \sigma$ na idade t_j da seguinte maneira:

$$[\nabla \sigma_j] = [f_{ij}]^{-1} \cdot [\varepsilon_j] \quad (4)$$

A superposição das tensões (□) conduz ao cálculo das tensões em qualquer época t_n :

$$\sigma(t_n) = \sum_{j=1}^n \Delta \sigma_j \quad (5)$$

As evoluções das tensões, comparadas com a evolução, no tempo, da resistência à tração do concreto, permitiram a análise da segurança contra a fissuração térmica.

A origem do Conhecimento passou ainda pelas contribuições de Furnas, representada por sua Equipe Técnica, liderada por seu Consultor Walton Pacelli e que na Obra contou com a importante presença do Engº Marcos Pimenta, no início de implantação dos trabalhos de Estruturação do Setor de Controle e Garantia de Qualidade de ODEBRECHT, quando foram compilados em diversos documentos, a base necessária para instruir o presente Estudo Térmico, que foram:

- Equipe de Furnas - Editor WALTON PACELLI DE ANDRADE - Concretos MASSA, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaio e Propriedades - Editora PINI, São Paulo - PS, 1997
- Estudo de Dosagens do Concreto e Caracterização dos Materiais. Relatório DCT.t.01.174.2002-ro. Novembro 2002 – FURNAS CENTRAIS ELETRICAS S.A.

- Joven Parceros □ √Productividad □ Responsabilidad Social

- Estudos Térmicos para os Blocos P16, P19, P22 y P30. Relatório DCT. T. s/nº2002-R0 – FURNAS CENTRAIS ELETRICAS S.A.
- Relatório de Dr. Walton Pacelli, de Fevereiro 2002, Referente a Estudos Térmicos em Concreto – FURNAS CENTRAIS ELETRICAS S.A.
- ACI COMMITTEE 207 - Effect of Restraint, Volume Change and on Cracking of Massive Concrete, Detroit - Usa, Aci Manual of Concrete Practice, 1978, PART 1, PAGES 207-42-207-47
- CARLSON R.W.; HOUGHTON D. L.; POLIVKA, M - "Causes And Control Of Cracking in Reinforced Mass Concrete", Detroit - Usa, Aci Journal, Julho/1979, PAGES. 821-837

Bibliografia Especializada (Corpo Técnico da Obra)

- ORCHARD .D.F.; Concrete Technology Volume 1 Properties of Materials Volume 3.Properties and Testing of Aggregates;
- WADDELL JOSEPH J.;Concrete Construcción Hand Book
- DUDA WALTER H PIPL. Ing.;Manual Tecnológico del Cemento

DETALHES DO METODO

DESCRIÇÃO:

Nos estudos iniciais se analisaram os traços utilizados na Obra, os quais estão indicados na tabela seguinte, quando foram consideradas como agregados graúdos, as britas com diâmetro máximo de 1".

Estrutura	FC (Kg. /cm²)	Cimento (Kg/cm²)	Microsilice (Kg/cm²)
Estribos, Sapatas, Blocos Estacas	250	256 - 297	24 a 35
Lajes	300	286 a 315	27 a 30
Pilares	380	271 a 320	18 a 27

- Joven Parcero
 $\sqrt{\text{Productividad}}$
 Responsabilidad Social

O consumo de cimento utilizado nos traços variou em função do “slump”, e das condições de concretagem.

O controle estatístico dos valores de resistência a compressão, obtidos pela empresa Simpca desde 01/01/1997 a 31/07/2001 está resumido na seguinte tabela, somente registrados para as idades de controle aos 28 dias.

TRAÇO	M250N	M250B	M300M	M300B	M400N	M400B
nº de Amostras	713	999	119	50	11	36
Valor médio (Kgf/cm ²)	357	366	438	407	501	556
Desvio Padrão (Kgf/cm ²)	55.3	55.3	61.7	55.5	40.6	71.6
Coefficiente de Variação %	15.5	15.2	14.1	13.6	8.1	12.9
Desvio de Laboratório (Kgf/cm ²)	4.4	4.6	4.3	3.3	7.4	3.4
Coef var. Lab. %	1.2	1.2	1.0	0.8	1.5	0.6
FC28(Kgf/cm ²)	250	250	300	300	400	400
Fcx 1,65	341.2	341.2	401.8	391.6	477	518.1
TRAÇO	M250N	M250B	M300M	M300B	M400N	M400B
nº de Amostras	713	999	119	50	11	36
Valor Médio (Kgf/cm ²)	357	366	438	407	501	556
Desvio Padrão (Kgf/cm ²)	55.3	55.3	61.7	55.5	40.6	71.6
Coefficiente de Variação %	15.5	15.2	14.1	13.6	8.1	12.9
Desvio de Laboratório (Kgf/cm ²)	4.4	4.6	4.3	3.3	7.4	3.4
Coef var. Lab. %	1.2	1.2	1.0	0.8	1.5	0.6
FC28(Kgf/cm ²)	250	250	300	300	400	400
Fcx 1,65	341.2	341.2	401.8	391.6	477	518.1

Como naquele momento inicial, Furna não dispunha dos resultados dos ensaios representativos dos materiais que seriam usados nos concretos da 2ª Ponte, foram assumidos valores universais de materiais com as mesmas características, para levar adiante a pesquisa e os estudos preliminares na avaliação da temperatura dos concretos.

- Joven Parceros
 Productividad
 Responsabilidad Social

As propriedades consideradas nesta análise, foram escolhidas de um traço de referência, cujo concreto foi fabricado com agregados graúdos de rochas gnáissicas, com um código de traço E2619.

Coeficiente de dilatação linear ($\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$)	=	11,45
Difusividade térmica ($\text{m}^2/\text{día}$)	=	0,091
Calor específico (cal/g)	=	0,24
Massa Específica (Kg./m^3)	=	2350

Calor de Condutividade Térmica ($\text{Kcal. /g.m.}^\circ\text{C}$) = 51,324

Massa Hidratação do Cimento:

7 dias (j/g)	=	282,41 o 68 cal/g
28 dias (j/g)	=	345,26 o 81,8 cal/g

Igualmente foram considerados traços de concretos que indicavam um consumo de cimento respectivamente de 250 kg/m^3 , 300 Kg./m^3 , 350 Kg./m^3 y 400 Kg./m^3 , e também um concreto com 249 Kg./m^3 de cimento e 24 Kg./m^3 de microsilica.

	E-2690 Referências	Hipóteses			
		1	2	3	4
C (Kg./m^3)	358	250	300	350	400
0,5	19,4	13,55	16,26	18,97	21,68
1	32,5	22,70	27,23	31,77	36,31
1,5	37,3	26,05	31,26	36,47	41,68
2	40,8	28,49	34,19	39,89	45,59
3	43,7	30,52	36,62	42,72	48,83
4	45,2	31,56	37,88	44,19	50,50
5	46,1	32,19	38,63	45,07	51,51
7	47,1	32,89	39,47	46,05	52,63
10	47,8	33,38	40,06	46,73	53,41
15	48,4	33,80	40,56	47,32	54,08

- Joven Parceros
 Productividad
 Responsabilidad Social

Foram estudadas cinco hipóteses com diferentes alternativas, as quais estão a seguir apresentadas:

Hipótese	Alternativa	Número da Alternativa	Consumo de cimento (Kg./m ³)	Temperatura de Lançamento	Intervalo de Lançamento (dia)	
1	Uma camada de 12 m	1	250	25 e 30	Lançamento a 20 cm./h	
	4 camadas de 3,00 m	2			1 dia	
		3			2 dias	
		4			3 dias	
		5			1 dia	
	6 camadas de 2,00 m	6			2 dias	
		7			3 dias	
		8			1 dia	
		12 camadas de 1,00 m			9	2 dias
					10	3 dias
1			Lançamento a 20 cm./h			
2	Uma camada de 12 m	1	300	25 e 30	Lançamento a 20 cm./h	
	4 camadas de 3,00 m	2			1 dia	
		3			2 dias	
		4			3 dias	
		5			1 dia	
	6 camadas de 2,00 m	6			2 dias	
		7			3 dias	
		8			1 dia	
		12 camadas de 1,00 m			9	2 dias
					10	3 dias
1			Lançamento a 20 cm./h			
3	Uma camada de 12 m	1	350	25 e 30	Lançamento a 20 cm./h	
	4 camadas de 3,00 m	2			1 dia	
		3			2 dias	
		4			3 dias	
		5			1 dia	
	6 camadas de 2,00 m	6			2 dias	
		7			3 dias	
		8			1 dia	
		12 camadas de 1,00 m			9	2 dias
					10	3 dias
					2	1 dia
	4 camadas de 3,00 m	3			2 dias	
		4			3 dias	
		5			1 dia	
		6 camadas de 2,00 m			6	2 dias
	7				3 dias	
	8				1 dia	
	12 camadas de 1,00 m	9			2 dias	

Joven Parcero
 Productividad
 Responsabilidad Social

Hipótese	Alternativa	Número da Alternativa	Consumo de cimento (Kg./m ³)	Temperatura de Lançamento	Intervalo de Lançamento (dia)
		10			3 dias
4	Uma camada de 12 m	1	400	25 e 30	Lançamento a 20 cm./h
5	Una camada de 12 m	1	249 de cimento +24 de sílica aditiva	25 e 30	Lançamento a 20 cm./h
	4 camadas de 3,00 m	2			1 dia
		3			2 dias
		4			3 dias
		5			1 dia
	6 camadas de 2,00 m	6			2 dias
		7			3 dias
		8			1 dia
	12 camadas de 1,00 m	9			2 dias
		10			3 dias

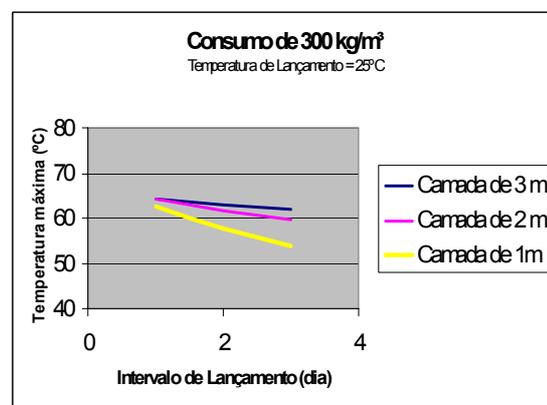
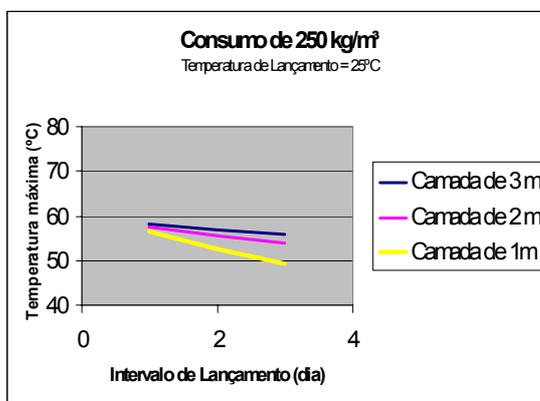
Resumo das temperaturas máximas calculadas para cada hipótese.

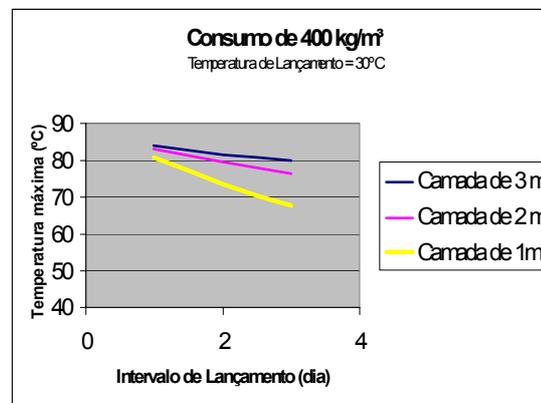
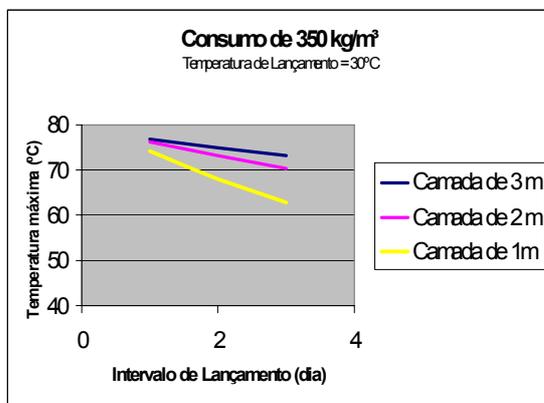
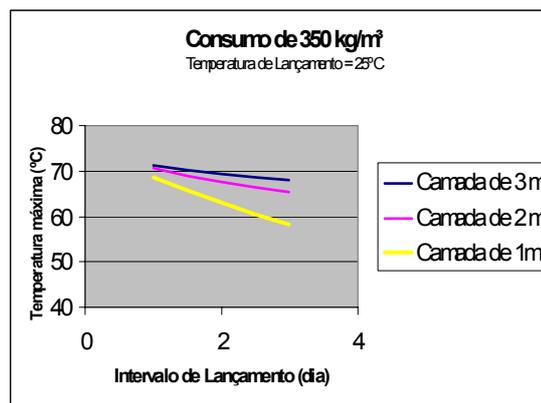
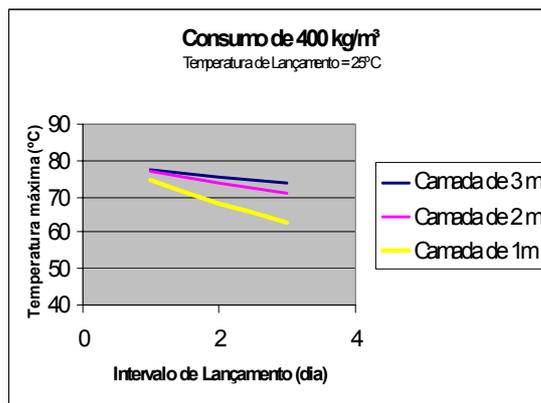
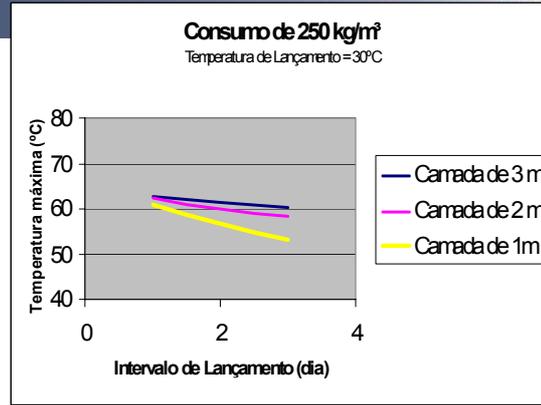
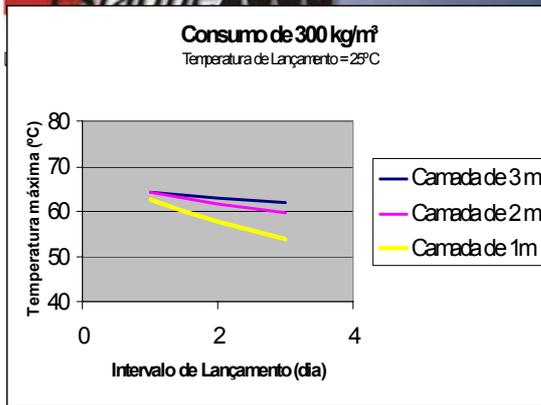
Hipótese	Alternativa	Nó da máxima	idade da máxima (dia)	Temperatura máxima (°C)	
				TI = 25 °C	TI = 30 °C
1	1	68	28	58,84	63,84
	2	70	29	58,04	62,97
	3	71	30	56,74	61,56
	4	80	13	55,75	60,49
	5	71	30	57,68	62,58
	6	74	33	55,67	60,40
	7	77	37	53,98	58,57
	8	74	33	56,49	61,29
	9	79	40	52,48	56,94
	10	84	49	49,22	53,40
2	1	69	28	65,61	71,19
	2	70	29	64,29	69,75
	3	71	30	62,99	68,34
	4	80	13	61,81	67,06
	5	71	30	64,12	69,57
	6	74	33	61,67	66,91
	7	77	37	59,61	64,68
	8	74	33	62,61	67,93
	9	79	40	57,70	62,60
	10	84	49	53,74	58,31
3	1	69	28	72,34	78,49
	2	70	29	71,14	77,19

- Joven Parcerero
 Productividad
 Responsabilidad Social

				Temperatura máxima (°C)		
	3	71	30	69,25	75,13	
	4	82	10	67,88	73,65	
	5	71	30	70,57	76,57	
	6	74	33	67,68	73,43	
	7	77	37	65,23	70,77	
	8	74	33	68,73	74,57	
	9	79	40	62,94	68,29	
	10	84	49	58,26	63,21	
	4	1	69	27	79,15	85,88
		2	70	29	77,68	84,28
3		71	30	75,52	81,94	
4		82	10	73,97	80,26	
5		71	30	77,01	83,55	
6		74	33	73,68	79,94	
7		77	37	70,85	76,87	
8		74	33	74,85	81,21	
9		79	40	68,18	73,97	
10		84	49	62,76	68,09	
5	1	69	28	60,33	65,46	
	2	70	29	58,49	63,46	
	3	71	30	58,13	63,07	
	4	82	13	57,10	61,85	
	5	71	30	59,11	64,13	
	6	74	33	57,01	62,80	
	7	77	37	55,25	59,94	
	8	74	33	57,88	62,80	
	9	79	40	53,67	58,23	
	10	84	49	50,28	54,55	

A seguir se apresentam os Gráficos que indicam a influência do consumo de cimento, intervalo de lançamento e espessura da camada.





De acordo aos estudos realizados a hipótese 5 foi a mais próxima dos limites de aceitação da tolerância, valor que não impunha riscos de fissuração no concreto, já que a temperatura máxima alcançada resultou valor da ordem de 65°C. Todavia, para definir com confiabilidade as alturas das camadas a serem utilizadas nas concretagens, era primordial obter as características dos agregados utilizados na fabricação dos concretos frescos da 2ª Ponte.

Para evitar o risco de fissuração nos blocos, foi recomendada a pre-refrigeração, a qual não foi considerada por ODEBRECHT em seus planejamentos, devido às condições reais de logística existentes na obra, que não permitiria em princípio a utilização deste tratamento.

- Joven Parceros Productividad Responsabilidad Social

Se poderia adotar outra possibilidade de tratamento, qual seja, a utilização de uma pós-refrigeração, com a adoção de circulação de água a temperatura ambiente no interior do maciço, através de serpentinas absorvendo parte do calor de hidratação gerado pelas reações químicas do cimento, evitando que o concreto pudesse elevar sua temperatura acima do valor recomendado, que todavia poderia aumentar custos envolvidos nesta solução.

Para complementar estes estudos, foi necessário enviar aos Laboratórios de Furnas no Brasil, quantidades representativas dos materiais que seriam utilizados na fabricação dos concretos frescos da 2ª Ponte, componentes estes, fornecidos pela empresa SIMPCA e utilizados na obra, com os quais o Engenheiro de Furnas Dr. Marcos Pimenta de Furnas, realizou novos cálculos térmicos.

Nesta oportunidade, o controle foi realizado em duas diferentes etapas, sendo uma cumprida por ODEBRECHT, sob orientação de Furnas, através dos estudos térmicos teóricos prévios, executados antes dos trabalhos de concretagem.

Esses estudos permitiram a previsão das temperaturas e das tensões térmicas admitidas para as estruturas, possibilitando que ODEBRECHT, tivesse segurança e tranquilidade necessárias, para executar as concretagens, sem a necessidade de refrigeração do concreto.

Posteriormente, durante e após as concretagens, efetuou-se o monitoramento das temperaturas no interior das estruturas, visando aferir o comportamento térmico real do concreto, comparativamente ao comportamento previsto pelos estudos térmicos realizados anteriormente.

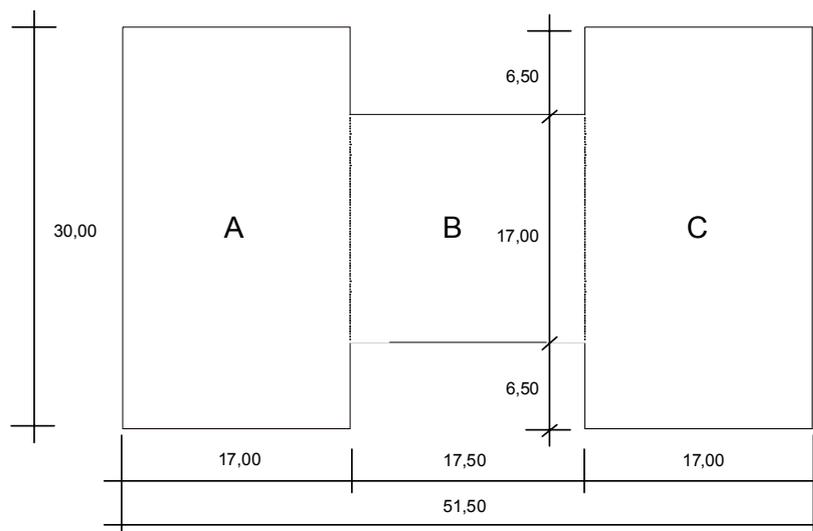
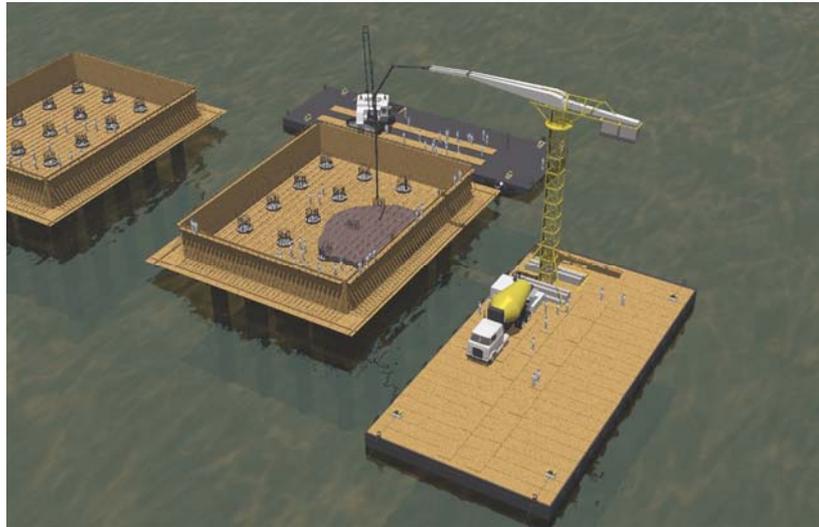
Os estudos térmicos prévios objetivaram a definição do planejamento de concretagem mais adequada e que, ao mesmo tempo, garantisse níveis de segurança contra a fissuração térmica do concreto.

Esses estudos foram realizados por FURNAS, no Brasil, em duas etapas, quais sejam:

1º Cálculos das temperaturas no interior das estruturas e cálculos das tensões de origem térmica, para blocos com diferentes geometrias, tendo sido estudados os Blocos n^{os} 16, 19, 22 e 30, que apresentam as seguintes dimensões:

- Blocos P16 e P22: 17,00m x 17,00m x 4,50m de altura;
- Blocos P19: 17,00m x 10,50m x 4,00m de altura;
- Blocos P30: 6,00m de altura, (com dimensões em planta mostradas na Figura abaixo)

- Joven Parcerero
- ✓Productividad
- Responsabilidad Social



As análises relativas às restrições impostas às deformações dos blocos, pelas suas fundações, assim como às suas influências na deformabilidade e no estado de tensões dos mesmos, foram desenvolvidas conjuntamente por FURNAS, ODEBRECHT e pelo Consorcio BRAVE (braço brasileiro do Consorcio, representado pela Figueiredo Ferraz)

Para que os estudos térmicos pudessem apresentar resultados confiáveis, foi necessária a completa caracterização prévia das propriedades do concreto. Para isso, efetuou-se esta caracterização do concreto da 2ª Ponte no Laboratório de Concreto de FURNAS, (Goiânia-Brasil) compreendendo a realização de sofisticados programa de ensaios de determinação das

- Joven Parceros
 \checkmark Productividad
 Responsabilidad Social

propriedades térmicas, visco-elástico e mecânicas do concreto, entre os quais se destacam:

- Elevação adiabática de temperatura;
- Coeficiente de expansão térmica;
- Calor específico;
- Difusividade térmica;
- Fluência;
- Módulo de elasticidade;
- Propriedades mecânicas.

Foi ensaiada uma dosagem de concreto produzida, com os mesmos materiais empregados nos concretos da obra da 2ª Ponte sobre o Rio Orinoco, a qual tinha composição muito similar às dosagens empregadas na obra, conforme se observa na Tabela.

Material	Unidade	Quantidade/m ³		
		55-3V	55-53V	E-10626
Codigo		Cabeçal P30	Cab. P16, P19 e P22	Ens. Caracterização
Utilização				
Cimento	kg/m ³	278	230	277
Sílica Ativa		27	45	27
Água		183	182	182
Cimento Equivalente		315	292	315
C + 2MS		332	308	332
Areia natural Volcan		---	482	--
Areia natural Seiba		410	482	407
Pedrisco (Arrocillo)		416	---	413
Brita 25 mm		970	834	964
Aditivo MVR	cm ³ /m ³	1,103	1,920	1,096
Aditivo 2237R		1,103	1,001	1,096
Aditivo RH 1000		0,173	---	0,2
Aditivo 387N		---	1,001	--
Relação A/C	-	0,580	0,62	0,580
Relação A / (C + 2MS)		0,551	0,59	0,551

Para tomar as temperaturas na estrutura utilizou-se termômetro digital Carlson, o qual consta de um indicador de leituras e os sensores ou extensômetros elétricos devidamente calibrados.

- Joven Parcerero
- ✓Productividad
- Responsabilidad Social

Equipamento para Registro das Temperaturas



O monitoramento da temperatura iniciou-se pelo bloco do pilar 19, o qual tinha um volume total teórico de 551 m³ de concreto, nesta fase utilizou-se os traços de concreto 53-53V, 53-54V, resistência 250 Kg./cm³.

Primeiramente foram concretados 90 cm de espessura de concreto ao longo do bloco e identificado como fase I, para um total de 169 m³ de concreto, posteriormente, foram colocados dois sensores de temperatura tipo Carlson embutidos na estrutura, os quais foram distribuídos, um no centro gravimétrico da estrutura e outro separado a 1.00 m da lateral, ambos na metade da altura a concretar.

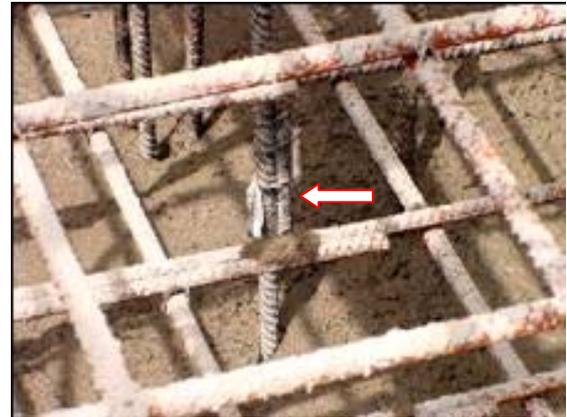
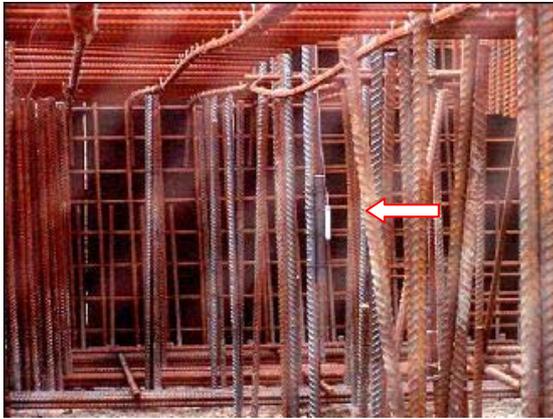
À medida que se avançava a concretagem, foram registradas leituras através de um termômetro digital conectado aos cabos dos sensores, para verificar que estivessem em perfeito estado de funcionamento.

Ao iniciar o contacto do concreto com o sensor, as leituras foram tomadas a cada hora, até um dia depois de haver alcançado a temperatura máxima, em seguida, os registros se realizaram a cada 2 horas, durante o segundo dia, a cada 4 hr até uma semana e a cada 6 hs até duas semanas depois.

A temperatura deste concreto fresco variou entre 32-34 °C, tempo total para a concretagem foi 24 horas, com um volume total de concreto lançado da ordem de 586 m³.

- Joven Parceros
- ✓Productividad
- Responsabilidad Social

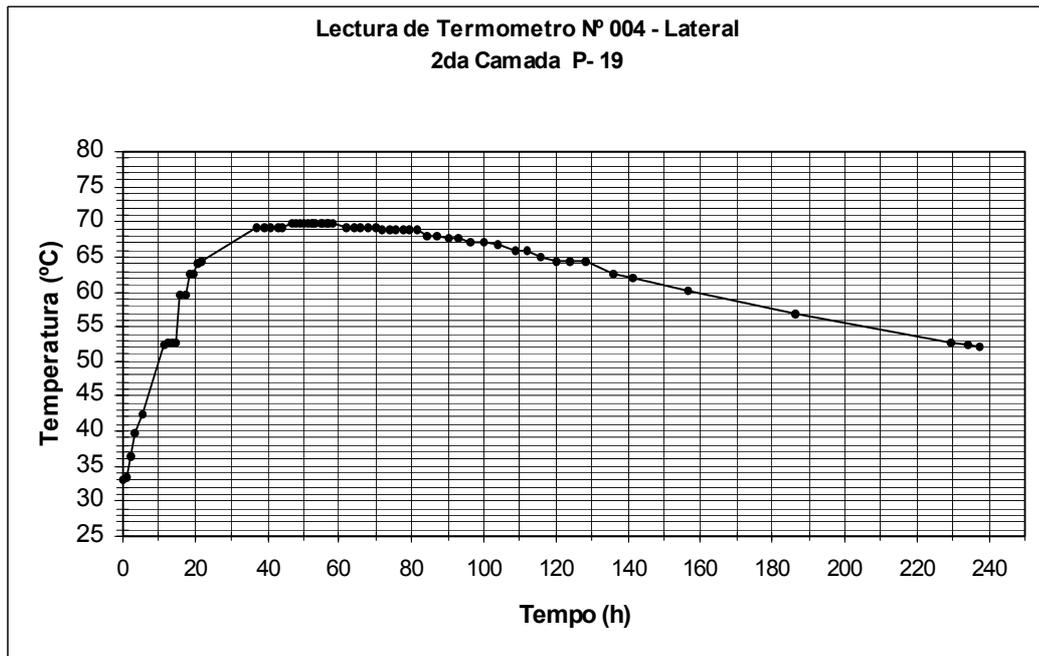
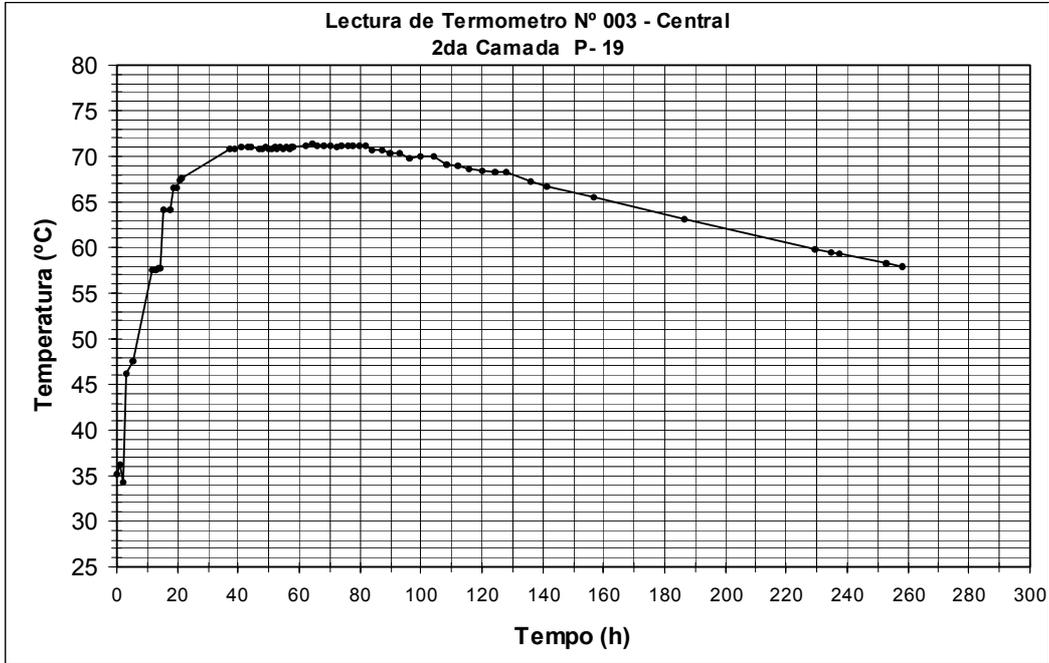
Localização dos Sensores na estrutura.



Concretagem do bloco do pilar 19

- Joven Parcerero
- Productividad
- Responsabilidad Social

Comportamento da temperatura no centro do Bloco.



- Joven Parcerero **Productividad** **Responsabilidad Social**

O bloco do pilar 30 foi dividido em três partes, identificados como A, B, C, foram apresentadas diferentes propostas para a sua concretagem, devido a sua grande dimensão:

Nº 01

Concretagem em uma camada de 5.10 m. de altura dividida em três blocos distribuídos da seguinte maneira:

- Bloco A 2.600 m³
- Bloco B 2.600 m³
- Bloco C 1.517 m³

Nº 02

Concretagem de cada Bloco em duas camadas de 2,50 e 2,60 m. de altura c/u, distribuídas da seguinte forma:

Camada nº 01

- Bloco A1 1.300 m³
- Bloco C1 1.300 m³
- Bloco B1 758 m³

Camada nº 02

- Bloco A2 1.300 m³
- Bloco C2 1.300 m³
- Bloco B2 758 m³

Nº 03

A concretagem se realizaria em uma camada única de 5,10 m. de altura para cada bloco.

Para estas três (03) propostas, se considerou uma velocidade de concretagem de 50 m³/h e as subcamadas com uma altura de 50 cm.

Foram concretados primeiramente os 90 cm. em todo bloco. O traço proposto para ambos os casos foi 55-3v, com consumo de cimento de 245 Kg./m³, microsilica 48 Kg./m³, água 170 Kg./m³, com uma relação a/c = 0,50 e um "slump" de 5".

De acordo com os estudos preliminares e por recomendação do Dr. Marcos Pimenta de Furnas - Brasil, se deveria realizar a concretagem do Bloco na fase

- Joven Parcerero □ √Productividad □ Responsabilidad Social

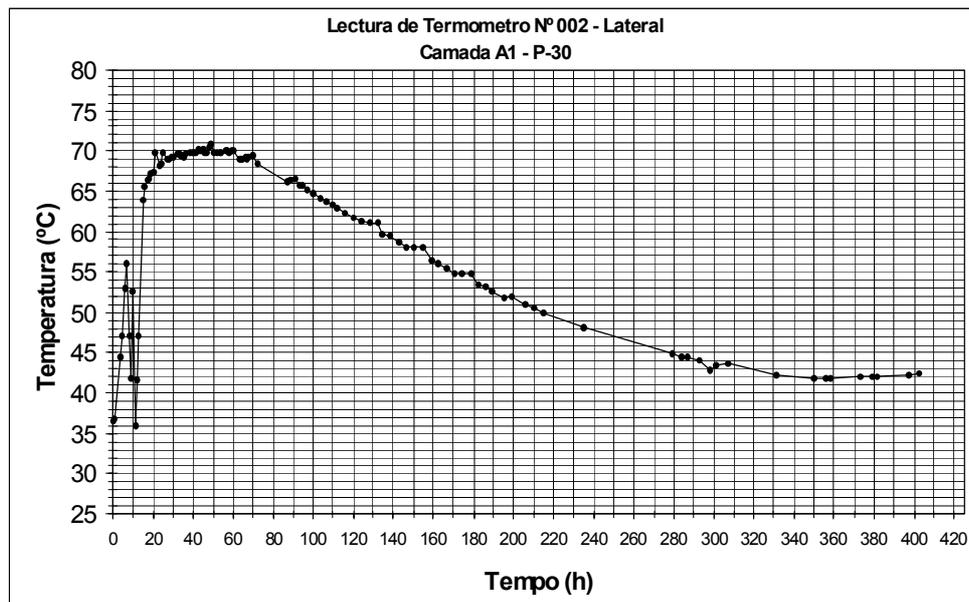
A, em duas (02) camadas e depois realizar a concretagem dos 90 cm. de altura como Fase I.

Foram colocados os sensores da forma indicada por Furnas, com o mesmo procedimento utilizado na concretagem do Bloco do pilar 19.

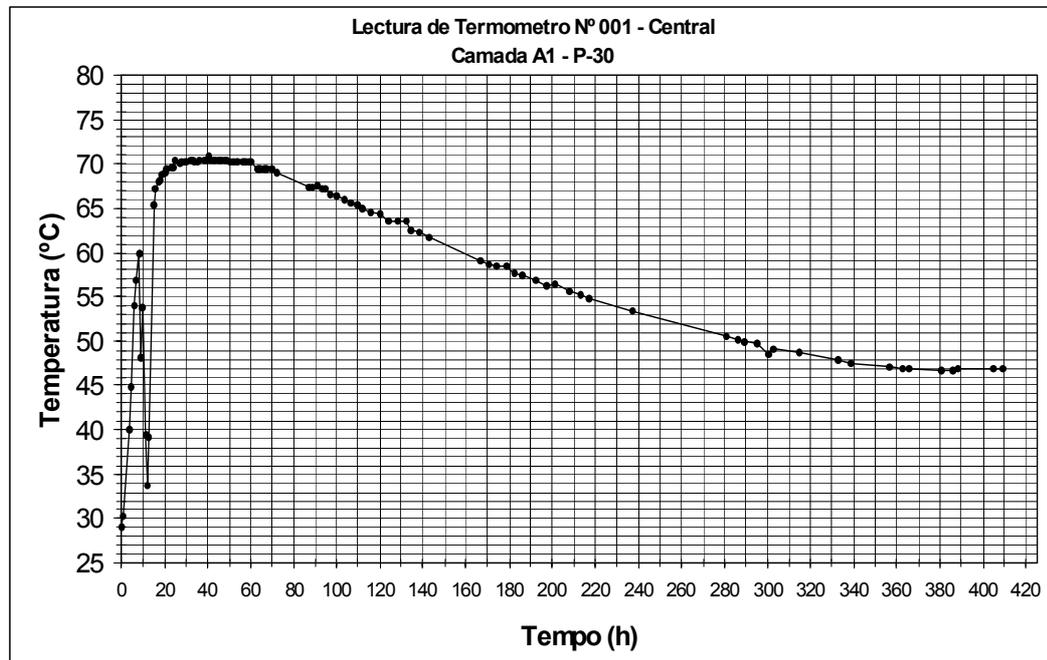
As concretagens se realizaram da seguinte maneira:

- Sub-Camada A1, com um total de 1.301,00 m³ de concreto, executada em 50 horas contínuas, com temperatura de concreto fresco variando entre 29 y 34 °C.
- Sub-Camada A2 com um total de 1.304,50 m³ de concreto, executado em 36 horas contínuas, com temperatura de concreto fresco entre 29 y 34 °C.

Comportamento térmico no extremo lateral do bloco A. Pilar 30



- Joven Parcerero □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social



Comportamento térmico no centro do bloco A. Pila 30



Concretagem do bloco A do pilar 30

Com base no comportamento da estrutura durante o monitoramento das temperaturas, no Bloco do pilar 19, no Bloco A do pilar 30, e baseado nos resultados das análises térmicas para as diferentes alternativas propostas, com respeito às curvas de evolução de tensões térmicas, o Dr. Marcos Pimenta informou ser possível concretar, em uma única camada, os próximos sub-blocos do Bloco da Torre P.30.

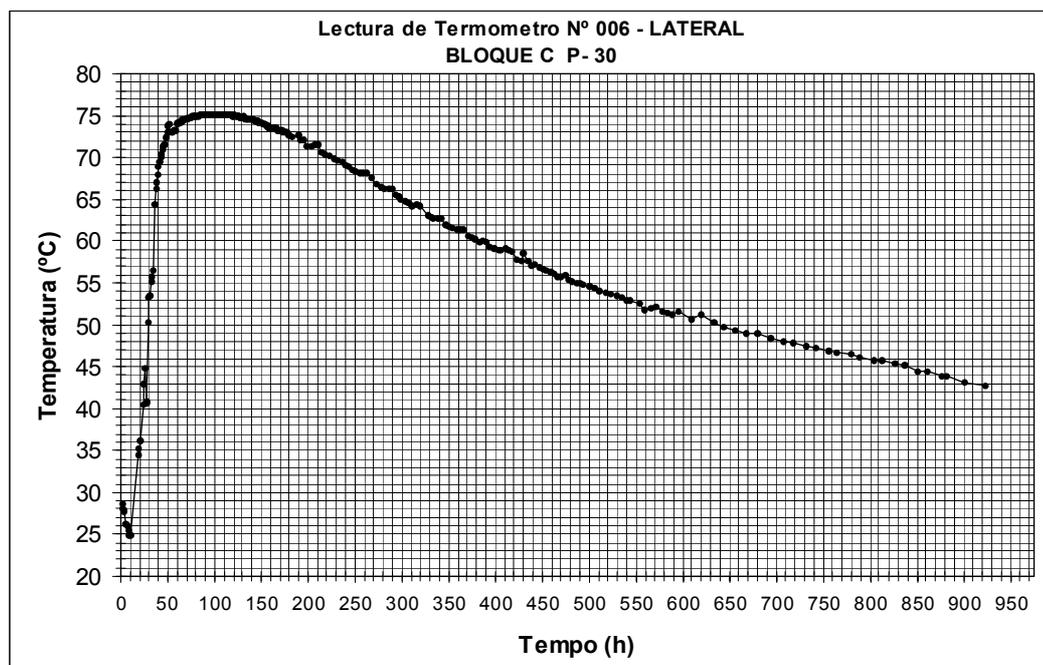
- Joven Parcerero
- ✓Productividad
- Responsabilidad Social

Para a concretagem no sub-bloco C, do Bloco da Torre P.30 foram colocados dois sensores, com as mesmas posições utilizadas nos blocos anteriores. A concretagem total deste Bloco, foi de 2.554,00 m³ de concreto, em um tempo de 64 horas.

Leitura de temperaturas no bloco C do pilar 30

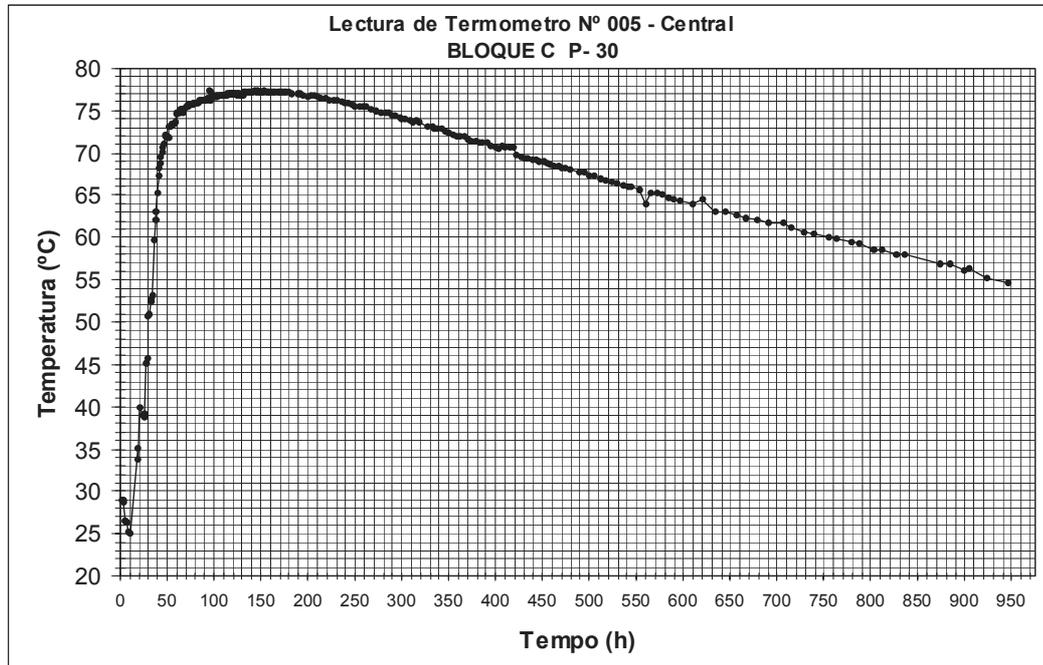


Comportamento térmico no extremo lateral do Bloco C. Pila 30



- Joven Parcerero Productividad Responsabilidad Social

Comportamento térmico no centro do Bloco C. Pila 30



Concretagem bloco C bloco Pilar 30



Para o bloco da Torre P.25, que tem dimensões exatamente iguais ao Bloco da Torre P30, realizou-se uma análise conjunta entre, ODEBRECHT, Furnas e Figueiredo Ferraz, em torno da questão relacionada com a profundidade das estacas desta estrutura (menores que as demais), o que tornou esta estrutura mais rígida e, portanto mais desfavorável às deformações térmicas.

- Joven Parcerero Productividad Responsabilidad Social

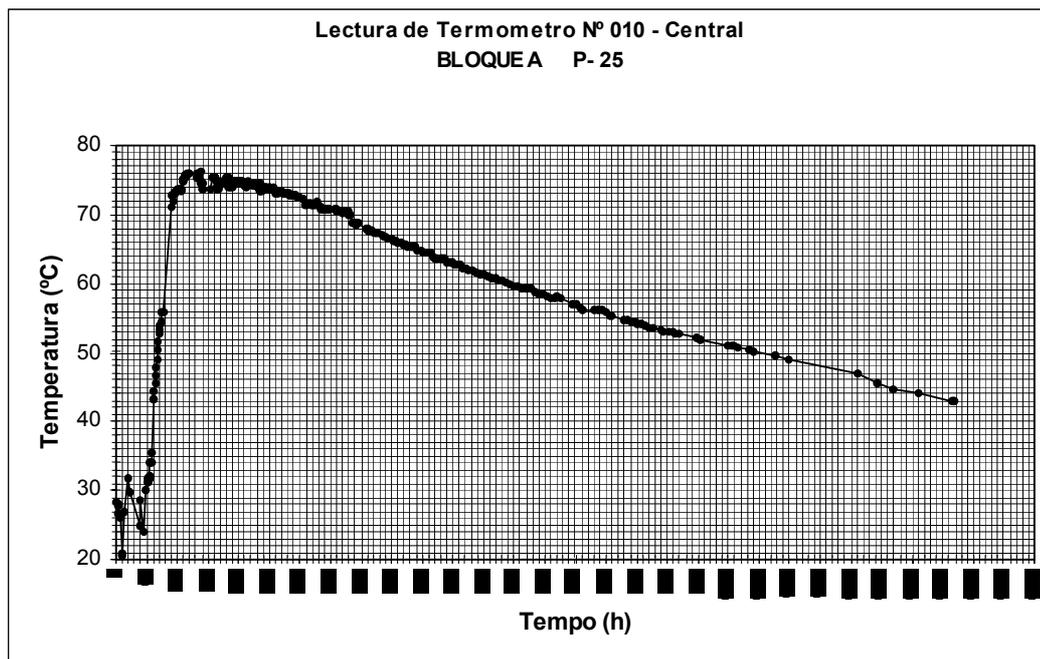
Para esta análise tomou-se uma variação térmica de 50 °C, condição que o projeto admitiu, em função da densidade da armadura existente no bloco.

Se no conjunto de estacas, uma sofre deformações, deslocando-se cerca de 12 mm e a separação entre aquelas, seja considerada de 5 mts, as solicitações impostas por tração horizontal, seriam menores que 100 tf em cada eixo da estaca. Desta forma somente 24 cm² de armadura W 70, seriam suficientes para suportar esta tensão.

Na concretagem deste Bloco realizou-se o estudo térmico somente no bloco A, colocando os sensores nos mesmos posicionamentos, ou seja, na lateral e no centro do bloco.

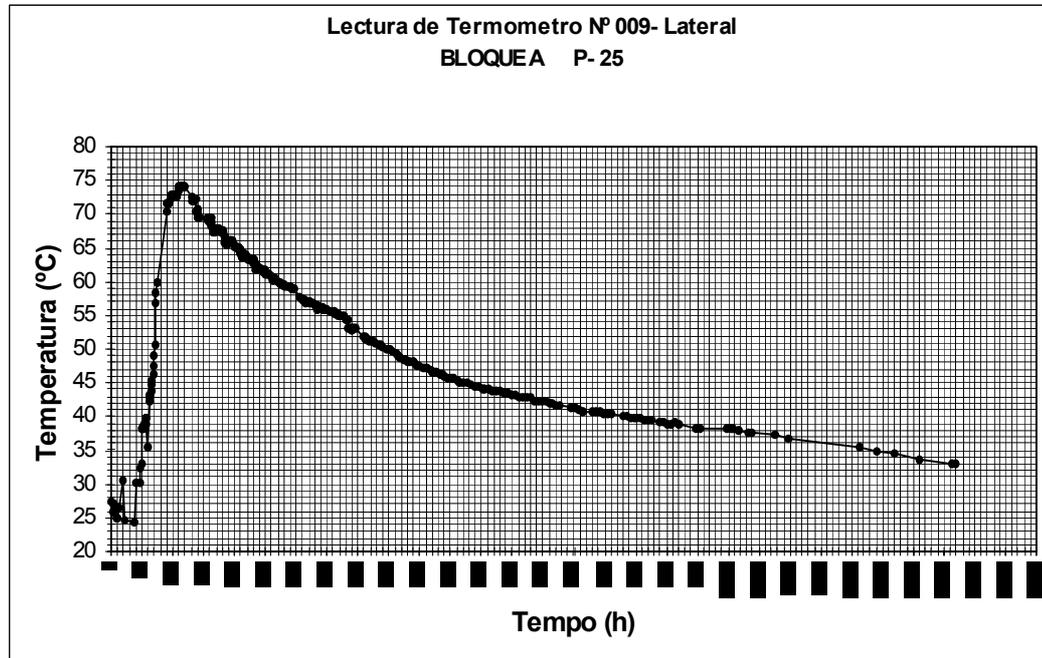
Foram lançados da ordem de 2.644 m³ de concreto, em um tempo de 75 horas, com temperatura do concreto fresco variando entre 25 e 30 °C

Comportamento térmico no centro do Bloco A do Pilar 25

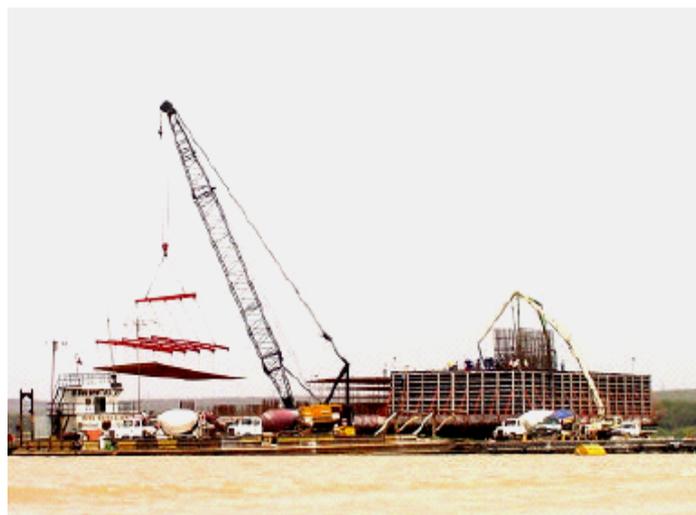


- Joven Parcerero Productividad Responsabilidad Social

Comportamento Térmico do extremo lateral no Bloco A do Pilar 25



Concretagem do bloco A do pilar 25



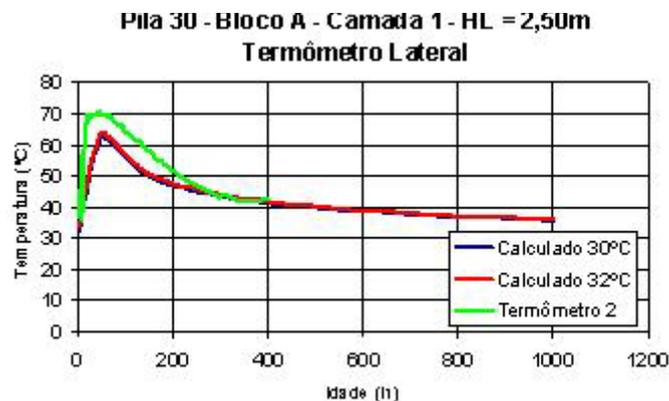
Os estudos térmicos realizados por Furnas no Brasil, para a avaliação da segurança da estrutura, contra a fissuração térmica, foram executados, baseados nas análises das tensões ou deformações atuantes na estrutura, utilizando-se os dados do coeficiente de expansão, o módulo de elasticidade, a

- Joven Parcerero □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social

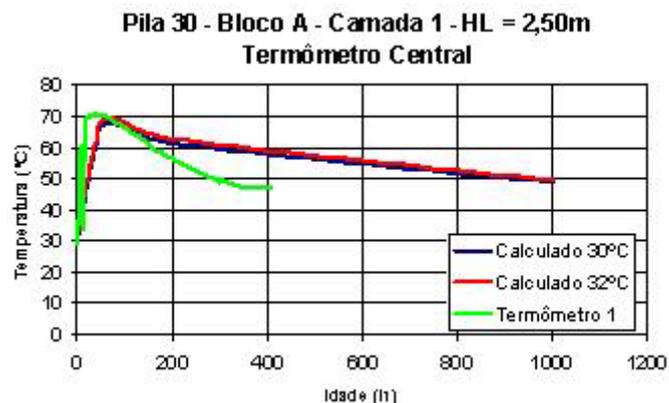
fluência e a resistência a tração do concreto, para cada uma das hipóteses estudadas.

Os gráficos apresentados a seguir, ilustram os resultados obtidos nos cálculos das temperaturas do concreto dos blocos, os quais são comparados às temperaturas medidas nas estruturas, através de termômetros elétricos instalados pela ODEBRECHT, no interior do concreto, quando das concretagens.

Os cálculos prévios foram realizados considerando-se temperaturas de lançamento do concreto de 30°C e 32°C, que correspondem à condição verificada na obra.



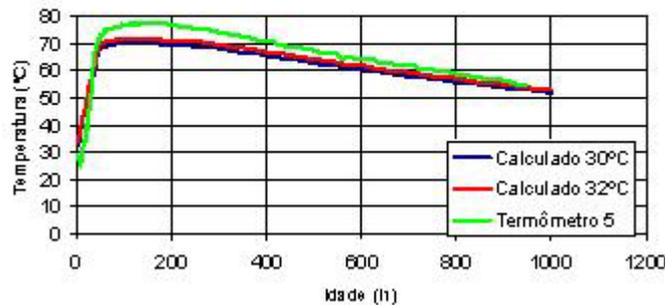
P30 – Bloco A - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas na posição de instalação do termômetro lateral.



P30 – Bloco A - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas na posição de instalação do termômetro central.

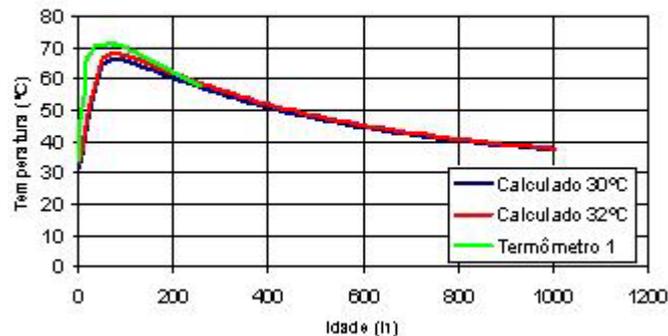
- Joven Parcerero □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social

Pila 30 - Bloco C - Camada Única - HL = 5,1m
Termômetro Central



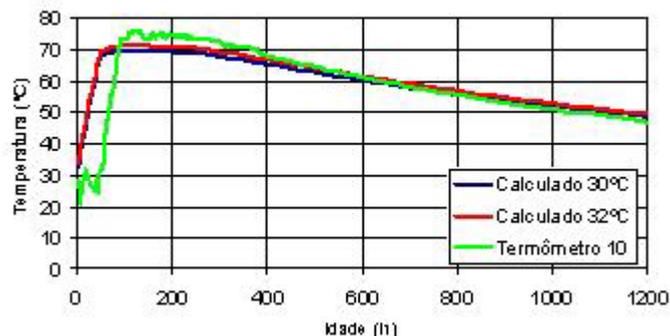
P30 – Bloco C - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas na posição de instalação do termômetro central.

Pila 19 - Camada Única - HL = 3,10m
Termômetro Central



P19 – Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas na posição de instalação do termômetro central.

Pila 25 - Bloco A - Camada Única - HL = 5,10m
Termômetro Central



P25 – Bloco A - Comparação entre as temperaturas calculadas e medidas na posição de instalação do termômetro central.

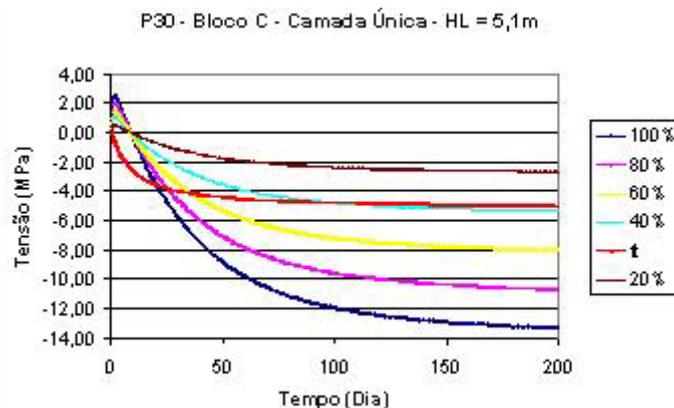
- Joven Parcerero □ √Productividade □ Responsabilidad Social

Através dos gráficos mostrados, observa-se uma correlação muito boa entre os valores das temperaturas calculadas e medidas através dos termômetros instalados nas estruturas.

As diferenças verificadas se devem à impossibilidade de se prever, com total precisão, as reais condições da obra, tais como as evoluções reais da temperatura ambiente e as temperaturas de lançamento do concreto.

Além disso, o modelo de cálculo das temperaturas, não leva em conta os efeitos do acréscimo de temperatura na superfície da estrutura, devido à insolação, entre outros fatores.

Apresenta-se, a seguir, um gráfico ilustrativo das tensões teóricas obtidas a partir das temperaturas calculadas previamente às concretagens. O exemplo apresentado corresponde à situação mais crítica analisada (Pila 30, com concretagem contínua em camada única de 5,1m).



P30 – Tensões calculadas para diferentes graus de restrição.

Conforme se observa na figura anterior, efetuou-se uma análise paramétrica das tensões, considerando-se graus de restrição às deformações térmicas variáveis de 20% a 100%, verificando-se que as tensões calculadas nas estruturas são maiores, à medida que se aumenta a restrição considerada nos cálculos.

Desta forma, a avaliação dos níveis de restrições presentes na estrutura, é de grande importância para a determinação das deformações e das tensões térmicas atuantes.

Os blocos da 2ª Ponte não se apresentam apoiados a uma fundação contínua e rígida, mas estão ligados a um conjunto de estacas, com alturas consideráveis, desde os blocos até a sua base de apoio, no fundo do rio. No caso do Bloco P30, as estacas têm extensão de cerca de 40m.

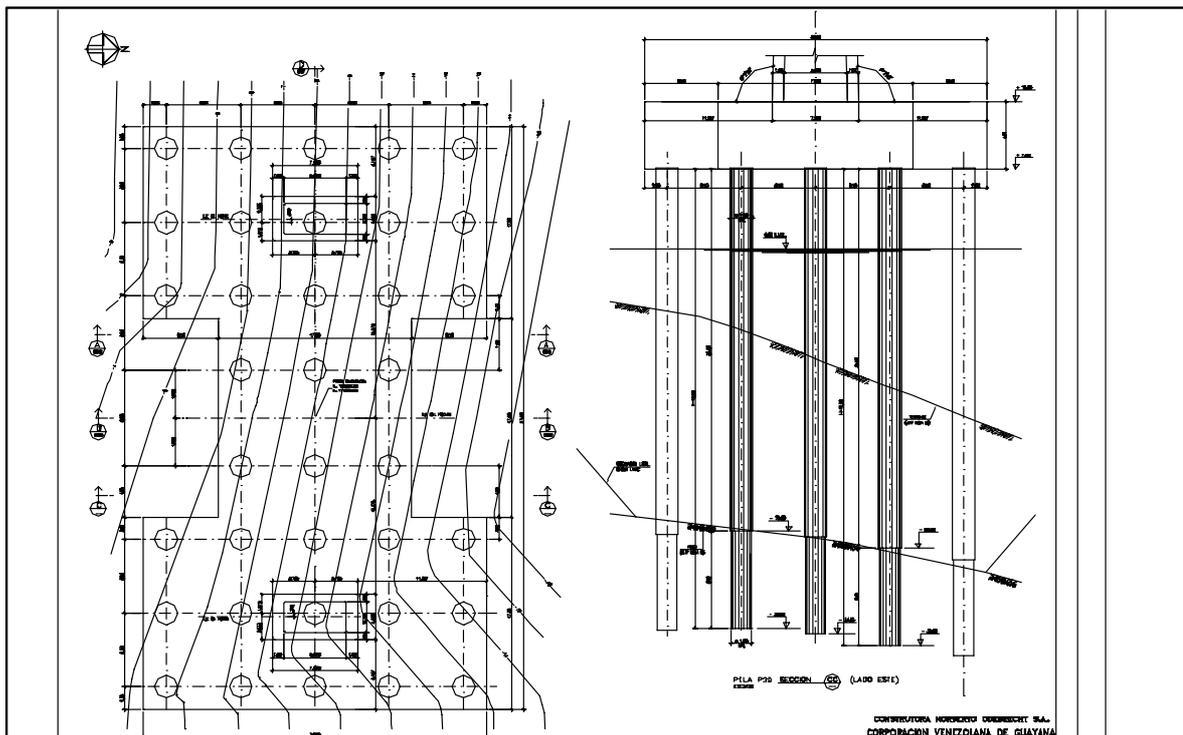
De acordo com o Consorcio BRAVE, nesta situação, quando o Bloco sofre uma variação térmica, esta estrutura não fica impedida de se deformar. Pelo

- Joven Parcerero
- √Productividad
- Responsabilidad Social

contrário, a fundação constituída pelo conjunto de estacas, permite uma importante liberdade para o Bloco se deformar, aliviando as tensões que, de outra maneira, ocorreria no interior desta estrutura.

Esta liberdade é propiciada pela grande flexibilidade das estacas, em função da sua grande profundidade.

CABEZAL P30 Planta e Seção Transversal



Este fato foi verificado pelo Consorcio BRAVE, que realizou uma análise para o Bloco P25. Este Bloco, por ter estacas menores, apresenta-se como uma estrutura mais rígida que o Bloco P30 e, portanto, encontra-se em uma situação mais desfavorável com relação às solicitações por ação das deformações térmicas do Bloco.

Foi analisada, de forma conservadora, uma variação térmica de 50°C e os esforços resultantes foram considerados pelo Consorcio BRAVE, como perfeitamente aceitáveis, em decorrência da flexibilidade das estacas e também das armaduras existentes.

De acordo com os cálculos realizados, quando ocorre a deformação térmica do bloco de coroamento, o conjunto de estacas também sofre deformações, sendo que as estacas mais distantes deslocam-se aproximadamente 12 mm, considerando-se uma distância entre estacas de 5m.

- Joven Parcerero □ √Productividad □ Responsabilidad Social

De acordo com o Consorcio BRAVE, para os demais blocos, a situação é mais favorável ainda, tendo em vista que eles têm estacas mais flexíveis. Para o bloco P30, a restrição à sua deformação seria muito pequena, próxima de zero.

Portanto, como conclusão dos estudos térmicos realizados, verificou-se que era muito pequena a probabilidade de ocorrência de fissuração térmica para restrições inferiores a cerca de 40%.

De acordo com o parecer do Consorcio BRAVE, as restrições não deveriam atingir este valor, favorecendo a probabilidade de que não deveriam ser esperadas fissuras térmicas nas estruturas dos Blocos.

Observa-se que, até o momento, não foram observadas fissuras nas estruturas dos Blocos, o que comprova o acerto das conclusões tiradas a partir dos estudos térmicos realizados.

É muito importante ressaltar e registrar aqui que, as conclusões favoráveis dos estudos térmicos prévios realizados, que permitiram concretar os Blocos, sem a necessidade de refrigeração do concreto, só foram possíveis a partir da estreita interação entre a ODEBRECHT, a empresa responsável pelos cálculos térmicos (FURNAS) e empresa responsável pelo projeto da Ponte (Consorcio BRAVE), durante a realização dos estudos aqui apresentados.

EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS

- Termômetro tipo Carlson
- Extensômetros Elétricos

PROBLEMAS OBSERVADOS

Com relação a instalação dos instrumentos de medição de temperatura.

- No momento da concretagem é importante adotar cuidados especiais com os sensores, que podem vir a ser danificados durante a concretagem, com riscos de perda dos instrumentos.
- O vibrador deve trabalhar o mais afastado possível dos sensores.
- Os sensores localizados no Bloco do pilar 22 foram danificados durante a concretagem e foi necessário descartar a leitura.
- Obter valores equivocados por má conexão realizada no indicador de leituras, por isto é recomendável realizar as atividades com pessoal treinado e capacitado.

- Joven Parcerero □ ✓Productividad □ Responsabilidad Social



RESULTADOS OBTIDOS:

Conseguiu-se acelerar o processo construtivo com segurança, e avançar na direção de se cumprir com o cronograma estabelecido para a obra, dentro dos melhores conceitos de uma boa prática da Engenharia, guardando a Integridade e Segurança das Estruturas e reduzindo os custos finais de construção das Obras.

Somente por força das ações prévias que foram tomadas, para melhor conhecer os problemas que envolviam a construção da ponte, no que se refere à utilização dos concretos em estruturas de grandes dimensões, e os respectivos controles térmicos, foi possível que interagisse ODEBRECHT, FURNAS e Consorcio BRAVE em ações de projeto e construção, de uma forma disciplinada e competente, buscando atingir objetivos colimados, voltados para resolver questões ligadas ao Controle Tecnológico, permitindo que se desenvolvessem Ações de Planejamento Global das Obras, passando por todas as variáveis, ligadas a mobilização de recursos, logística, definição dos Planos de Concretagem e por fim, nortear a Construção dos Grandes Blocos da 2ª Ponte.

Buscou-se, portanto a consolidação daquelas orientações Corporativas que ODEBRECHT vem discutindo e fazendo permear, nas suas Comunidades do Conhecimento, relacionadas com duas diretrizes gerenciais básicas, que deverão nortear as ações dos seus executivos, quais sejam;

- Minimizar Riscos de Engenharia;
- Eliminação de qualquer possibilidade de Ocorrência Futura de Contenciosos Técnicos.