



**Comitê Brasileiro de
Grandes Barragens**

**XIX
SEMINÁRIO
NACIONAL
DE GRANDES
BARRAGENS**

Uso de Concreto Rolado - Projeto Capanda -
Angola - Ensaios Especiais

ANAIS

Aracaju, março de 1991

USO DO CONCRETO ROLADO - PROJETO CAPANDA (ANGOLA) - ENSAIOS ESPECIAIS

Eng^o José Augusto Braga
Eng^o Mario Raul Zanella
Eng^o Juarez Moraes Zaleski
ITAIPU Binacional

Eng^o F.R. Andriolo
Consultor

RESUMO

O trabalho apresenta um amplo conjunto de informações obtidas de estudos efetuados com concretos convencionais e rolado para a obra de Capanda - Angola.

Através desses estudos, pode-se comparar com nitidez, concretos - convencionais e rolados - produzidos com os mesmos materiais.

Evidencia-se o desempenho análogo de ambos os tipos de concreto.

As vantagens técnicas e econômicas do concreto rolado são atrativas e devem ser consideradas como alternativas nos estudos de barramento, como se aplicou no Aproveitamento Hidroelétrico de Capanda - Angola.

1. APRESENTAÇÃO

Várias foram as alternativas estudadas para o tipo de barramento do Aproveitamento Hidroelétrico de Capanda.

As decisões convergiram para a execução do barramento em concreto gravidade, através da metodologia do concreto rolado.

Essa opção mostra vantagens de custo e tempo na construção da obra, como de maneira geral tem se observado em outras obras onde a metodologia do concreto rolado tem sido adotada. Uma outra vantagem observada nesta alternativa é a otimização da mão de obra para os trabalhos de construção.

As entidades envolvidas no empreendimento do Projeto Capanda, contando com a colaboração do Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, elaboraram um amplo programa de estudos e ensaios visando conhecer detalhadamente as características e propriedades dos materiais disponíveis e dos concretos - convencionais e rolado - para uso na construção da obra.

Este trabalho apresenta então um amplo conjunto de resultados dos ensaios executados.

Há uma clara comparação das propriedades do concreto rolado e demais concretos, convencionais, elaborados com os mesmos materiais.

A título de comparação são apresentados, também, dados de propriedades de concretos rolados usados em outras obras e/ou aplicações.

2. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE CAPANDA

O Aproveitamento Hidroelétrico de Capanda é um empreendimento energético em construção pelo Governo de Angola através do Ministério de Energia e Petróleos, representado pelo GAMEK (Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza).

Brasil e União Soviética são respectivamente representados pela Construtora Norberto Odebrecht S/A. - CNO (encarregada de todas as obras civis e de infraestrutura) e Technopromexport - TPE (encarregada dos estudos geológicos, projetos, fornecimento e montagem dos equipamentos de geração).

O Projeto Capanda (Figura 1), constituído por um barramento gravidade, basicamente em concreto rolado, tem as seguintes características principais:

Altura máxima do barramento	= 110 m
Volume do reservatório	= 4.795.000 m ³
Área do reservatório	= 164 km ²

Potência - (4 unidades Francis de 130 Mw).	= 530 MW
Volume de concretos - rolado:	= 764.000 m ³
- convencionais	= 290.000 m ³
- total	= 1.054.000 m ³

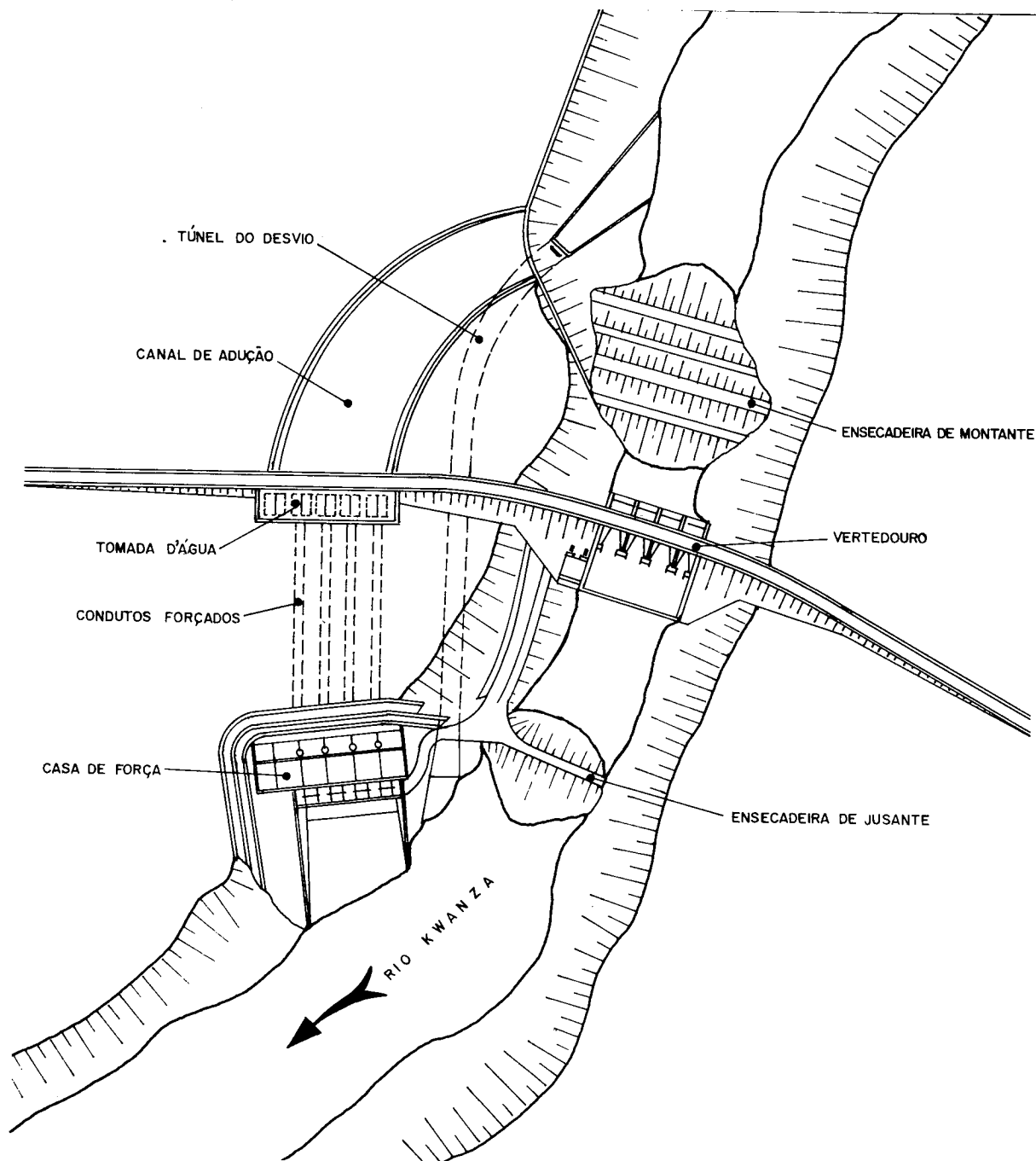


FIGURA 1 - Vista geral do Aproveitamento Hidroelétrico de Capanda.

3. PLANEJAMENTO E PROGRAMA DOS ESTUDOS

O planejamento dos estudos foi feito no segundo semestre de 1987, sendo que a programação estabelecida é a que se vê, simplificada, na Figura 2.

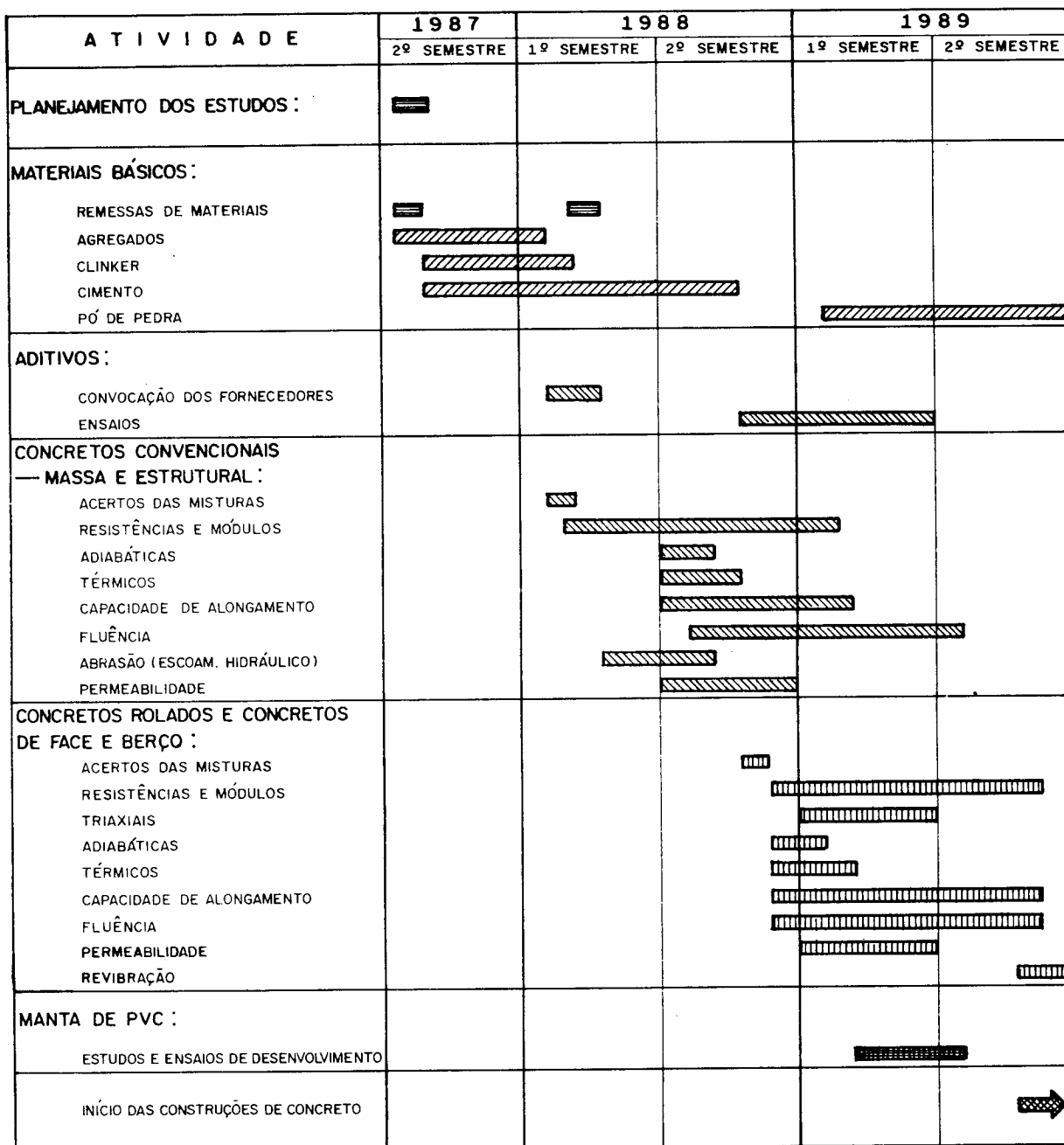


FIGURA 2 - Planejamento e programação dos estudos e ensaios

Durante o planejamento dos estudos foram consideradas as seguintes premissas:

- * Cimento: condições de logística de suprimento à obra, distante 450 km da fábrica, em Luanda, capital de Angola;
- * Material Pozolânico: inexistência de material pozolânico nas proximidades da obra;
- * Areia Natural: jazidas esparsas e de pouca quantidade, com baixo módulo de finura;
- * Rocha para Agregado: meta-arenito, denso e são, cimentado por hidróxidos e/ou óxidos de ferro (cimento ferruginoso).

Tendo em vista essas premissas foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Avaliar as condições de otimização do cimento a ser usado na obra;
- Avaliar as características de sanidade e compatibilidade dos agregados quanto à presença dos álcalis do cimento. Avaliar a real necessidade de uso de materiais pozolânicos;
- Reduzir ao mínimo o consumo de cimento;
- Explorar ao máximo os recursos de usar areia artificial obtida pela britagem do meta-arenito; e,
- Explorar a possibilidade de uso do "pó de pedra" [1] com benefícios de redução das expansões decorrentes da reação álcalis-agregados e da melhoria das resistências e de impermeabilidade.

Dessa forma, no transcorrer dos estudos e ensaios a programação sofreu alguns ajustes, objetivando dosar os concretos com baixo teor de cimento, sem materiais pozzolânicos, com máximo teor de areia artificial (britada) e a incorporação de "pó de pedra" (subproduto da britagem).

4. MATERIAIS

4.1 Agregados

Os parâmetros obtidos através dos ensaios de caracterização dos agregados são mostrados na Figura 3 [2]. Através da Figura 3, nota-se que a areia natural, enviada na segunda remessa, era fina, com módulo de finura de 1,66.

A areia artificial obtida pela britagem do meta-arenito apresentou uma satisfatória quantidade de finos, quando comparada com uma areia artificial (a usada em Itaipu) também obtida por britagem.

A massa específica dos agregados britados e areia natural apresentou-se entre 2,62 t/m³ e 2,64 t/m³.

A absorção situou-se entre 0,5% e 1,3%.

O agregado graúdo, quando submetido aos ensaios de abrasão (Los Angeles) e de ciclagens (natural, artificial, acelerada ao etileno-glicol, acelerada ao sulfato de sódio), apresentou resultados mostrando que o material é resistente.

TIPO DE ROCHA				ARENITO		AREIA		AREIA MISTURA (BRITADA + NATURAL) (%)					
						NATURAL	ARENITO 100%	75+25	50+50	25+75			
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)				4,8	38	1,2		4,8					
GRANULOMETRIA (% RETIDA ACUMULADA)	PENEIRAS	2"											
		1 1/2"			5								
		1"			15								
		3/4"			27								
		1/2"			74								
		3/8"			100								
		Nº 4		4	100	-	5	3,8	2,5	1,2			
		Nº 8		23	100	-	41	30,8	20,5	10,2			
		Nº 16		35	100	-	63	47,2	31,5	15,8			
		Nº 30		50	100	16	79	63,2	47,5	31,8			
		Nº 50		66	100	61	87	80,4	74,0	67,6			
Nº 100		83	100	89	92	91,2	90,5	89,8					
< Nº 100		100	100	100	100	100	100	100					
MÓDULO DE FINURA				2,61	7,32	1,66		3,67		3,17	2,66	2,16	
MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)				2,62	2,64	2,62		2,62		-	-	-	
ABSORÇÃO (%)				0,8	0,5	0,5		1,3		-	-	-	
ABRASÃO LOS ANGELES (% desgaste)				-	13,8	-		-		-	-	-	
COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA (10 ⁻⁶ /°C)					7,56	-		-		-	-	-	
CALOR ESPECÍFICO (cal/g. °C)					0,178	-		-		-	-	-	
REATIVIDADE COM ÁLCALIS DO CIMENTO * CIMANGOLA ** ALTO ÁLCALIS	MÉTODO QUÍMICO	RED DA ALCALINIDADE (mmol/l)		18,3	-	18,0		8,7		-	-	-	
		SÍLICIA DISSOLVIDA (mmol/l)		11,6	-	16,3		38,0		-	-	-	
		RESULTADO NO GRÁFICO		INÓCUO	-	INÓCUO		INÓCUO		-	-	-	
	MÉTODO FÍSICO	3 MESES (% de expansão)	0,028	-	0,002*	0,030**	0,004*	0,022**					
		6 MESES (% de expansão)	0,034	-	0,005*	0,038**	0,004*	0,033**					
		1 ANO (% de expansão)			0,006*	0,046**	0,004*	0,046**					
	MÉT.ACCELERADO	12 DIAS (% de expansão)	-	-	0,030*	0,067**	0,003*	0,081**	-	-	-		
SANIDADE (% DE PERDA DE PESO)	CICLAGEM NATURAL				0,0								
	CICLAGEM ARTIFICIAL				0,0								
	CICLAGEM COM ETILENO GLICOL				0,0								
	CICLAGEM COM SULFATO DE SÓDIO	PENEIRAS	1 1/4"		0,00								
			5/8"		0,07								
			5/16"		0,27								
			Nº 5		-								
		MÉDIA PONDERADA				0,34							
		PENEIRAS	Nº 4		0,05								
			Nº 8		0,23								
			Nº 16		0,13								
			Nº 30		0,26								
Nº 50			0,13										
MÉDIA PONDERADA				0,80									

FIGURA 3 - Parâmetros de caracterização dos agregados.

A areia natural e o material britado foram submetidos a três tipos de ensaios para avaliar a reatividade potencial com os álcalis do cimento.

Pela observação do material sob a ação do método químico de exposição (ASTM-C-289) nota-se um comportamento inócuo, como evidenciado pelas Figuras 3 e 4.

DETERMINAÇÃO	AGREGADOS	AREIA NATURAL	AREIA ARTIFICIAL
SÍLICA DISSOLVIDA (mmol/ℓ)	11,6	16,3	8,7
REDUÇÃO DA ALCALINIDADE (mmol/ℓ)	18,3	18,0	38,0
LEGENDA		-----	-.-.-.-.

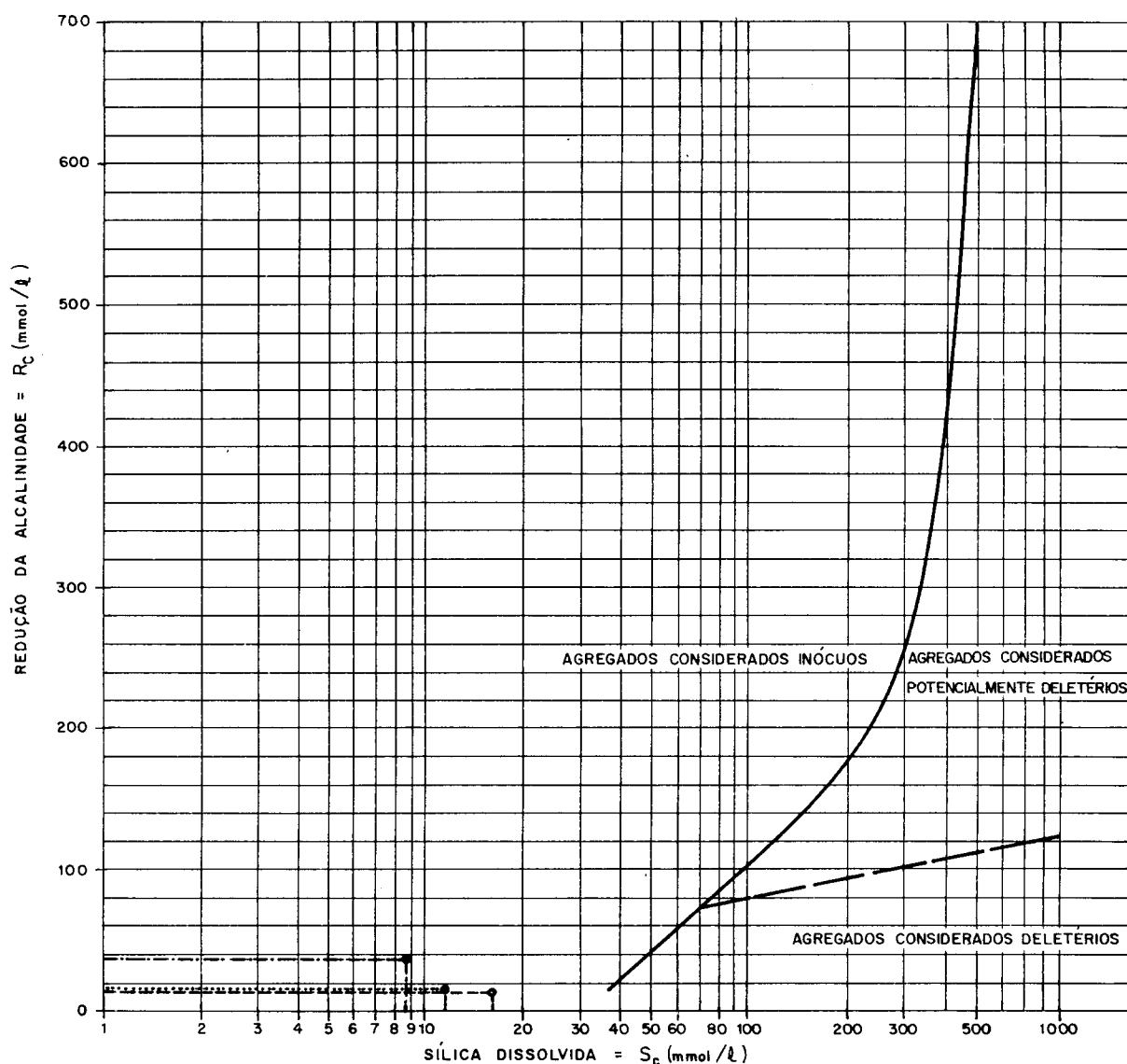


FIGURA 4 - Valores dos ensaios de reatividade potencial -método químico.

A avaliação sob o método físico (ASTM-C-227), feita sobre os materiais, mostrou expansões de pequena ordem, quer sob a ação do cimento de elevado teor de álcalis (equivalente alcalino = 0,94%), quer seja sob a ação do cimento Cimangola (produzido em Luanda-Angola), como se evidencia pelas Figuras 3 e 5.

O meta-arenito foi submetido ainda a um ensaio acelerado para avaliar a reatividade potencial com os álcalis do cimento, desenvolvido pelo "National Building Research Institute" - Accelerated Test. Observa-se, pela Figura 5, que os materiais ensaiados (areia natural e areia artificial do meta-arenito) apresentaram expansões inferiores ao limite de 0,11%, estipulado no método para classificar um agregado reativo com os álcalis.

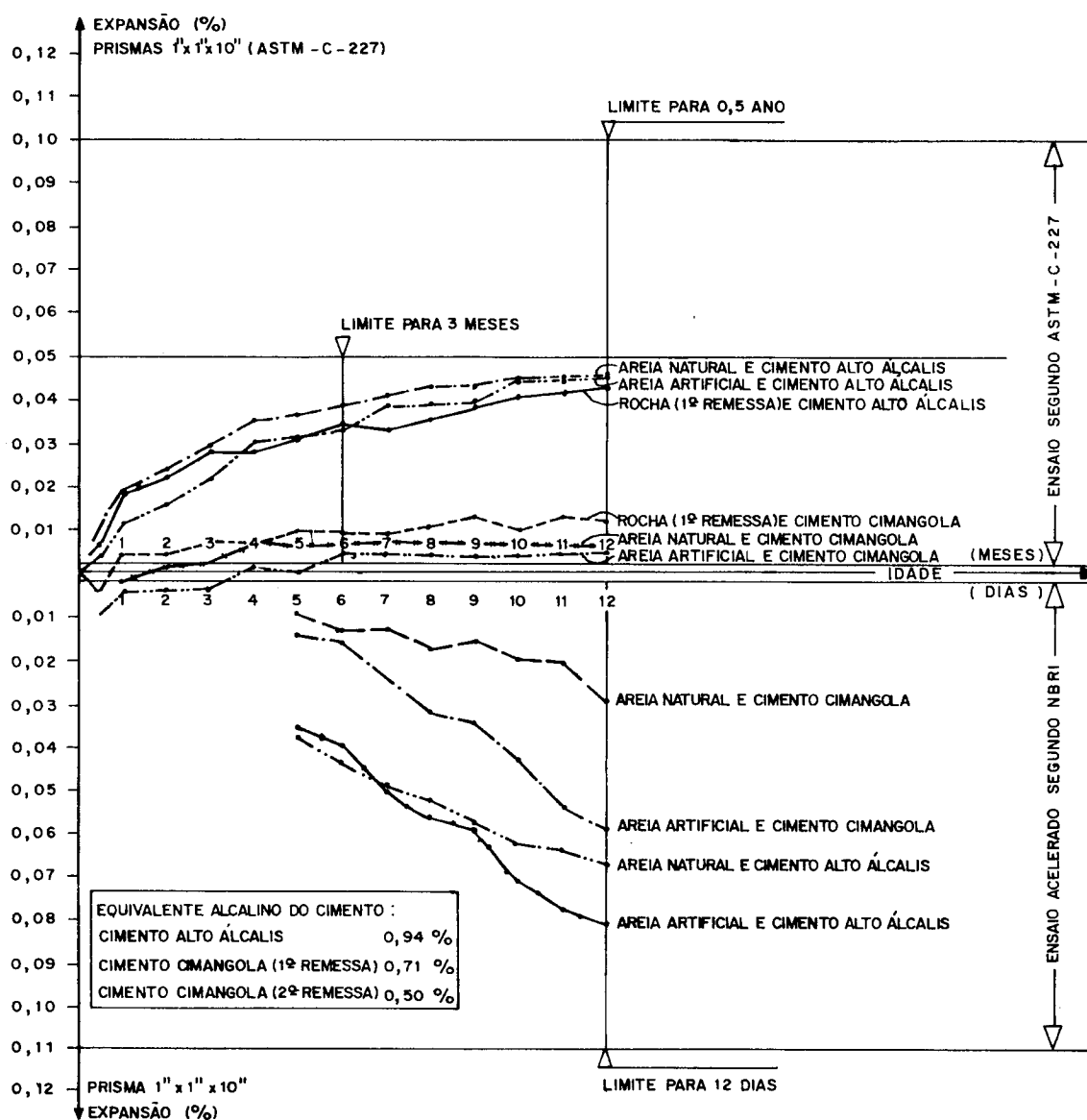


FIGURA 5 - Valores dos ensaios de reatividade potencial - método físico e acelerado.

Os testemunhos de sondagens do meta-arenito mostram:

- * Resistência à compressão axial = 1632 kgf/cm²;
- * Módulo de (elasticidade) deformação = 591.000 kgf/ cm²; e,
- * Coeficiente linear de expansão térmica = 7,56 μ strain/°C.

Confrontando os diversos valores obtidos nota-se que o meta-arenito disponível na região de Capanda é apto para uso como agregado para concretos.

A utilização do "pó de pedra" (fração inferior às malhas nº 100 - 0,15 mm e nº 200 - 0,075 mm) tem mostrado [1] vantagens de resistências e de impermeabilização.

Em 1985, para a obra de Urugua-I, na Argentina, cujos estudos do concreto foram realizados em conjunto com o Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, procurou-se utilizar como fino um material denominado "Limo-Silte", encontrado na região da obra, para melhorar as características do concreto rolado. Os resultados obtidos foram satisfatórios. Porém, verificou-se que o material utilizado apresentava alto índice de pelotização (aglutinação das partículas e higroscópico), mesmo quando estocado ao abrigo da umidade. Então, o Laboratório de Concreto sugeriu a utilização, no lugar do "Limo", do subproduto da britagem do basalto (pó de pedra), um material fino e sem coesão que foi utilizado na construção de Urugua-I.

Também através de estudos no Laboratório de Itaipu, em conjunto com Dr. Albert Osipov, do Scientific Research Centre Hydroproject Institute de Moscou, e a área técnica da Odebrecht, procurou-se avaliar mais profundamente os efeitos do material fino proveniente da britagem de rochas nas propriedades do concreto,

devido a capacidade dos finos recém britados de absorver a cal liberada na hidratação do cimento, se comportando então como um aglutinante. Os ensaios executados comprovam esse conceito.

Dentro dos diversos estudos realizados, avaliou-se a fixação da cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), nas areias, com várias idades após a britagem. Isso teve objetivo de verificar a necessidade de adequação operacional no sistema de beneficiamento de agregado na obra. Os resultados são vistos na Figura 6.

Pelos valores obtidos nota-se que, mesmo após 6 (seis) meses do beneficiamento, a areia artificial com o meta-arenito de Capanda apresentou poder de fixação da cal superior a 30 mg/100 g de areia (considerado como valor mínimo), aos 28 dias na solução de ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$).

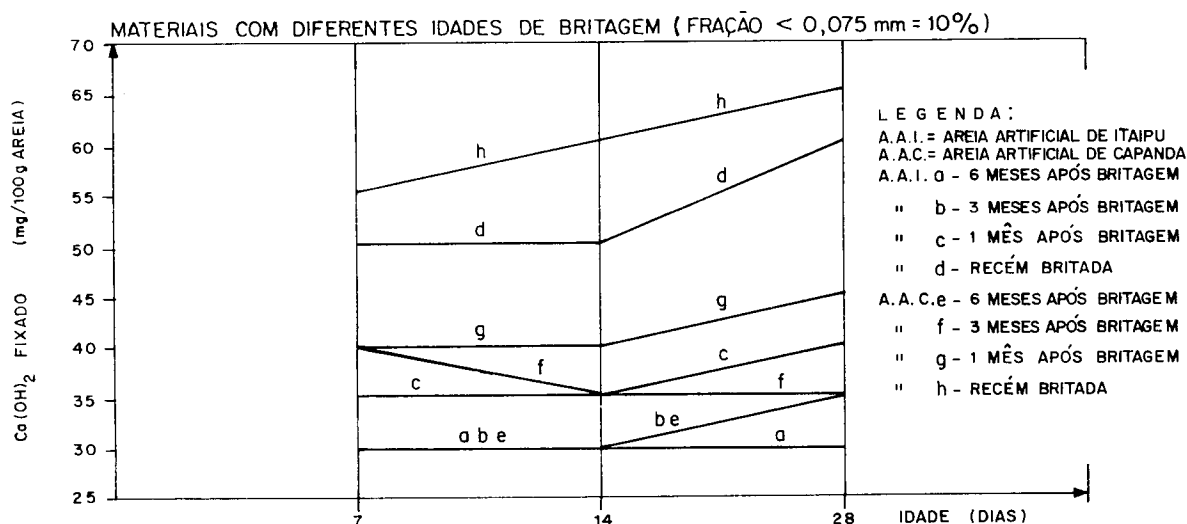
Verificou-se também a fixação da cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) em areias artificiais de meta-arenito com vários teores de material inferior a 0,075 mm, como se vê na Figura 7.

Comparou-se ainda a areia artificial do meta-arenito com outros materiais, como se vê nas Figuras 8 e 9.

Nota-se que areia artificial do meta-arenito apresenta uma certa e satisfatória atividade pozolânica, como se confirma através da Figura 10.

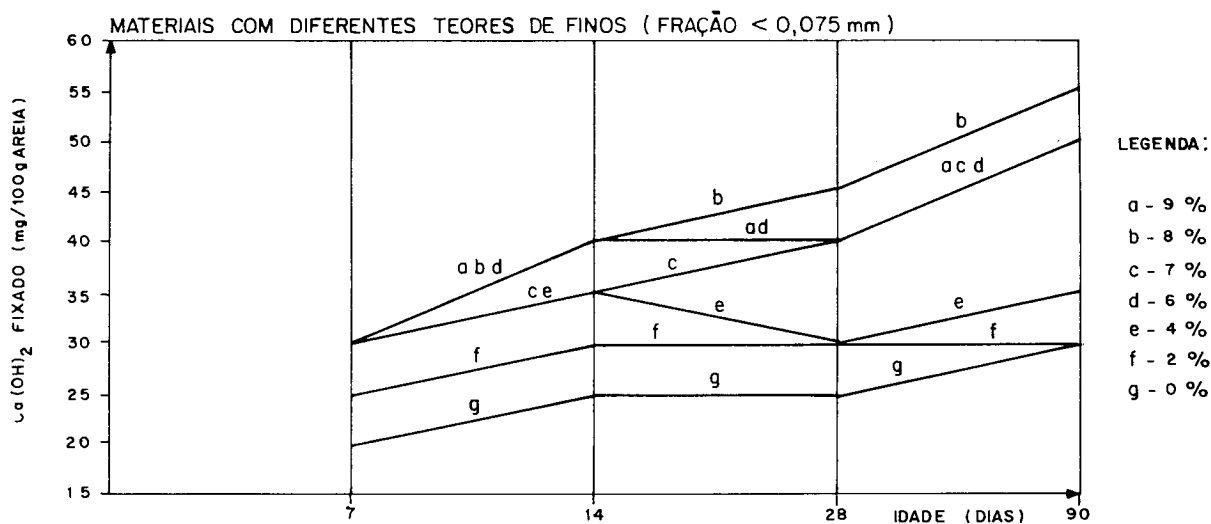
Nota-se, pelos valores da Figura 8, que o silte apresenta uma menor fixação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Fez-se também a avaliação de desempenho do "pó de pedra" no combate à reação álcalis-sílica, utilizando como metodologia a do ensaio rápido (Accelerated Test - National Building Research Institute), sendo que os resultados mostrados na Figura 11, evidenciam a ação benéfica do aumento do teor de finos ($\leq 0,075$ mm) no combate a reação álcalis-sílica.



AMOSTRA		Ca(OH) ₂ NA SOLUÇÃO (mg)			Ca(OH) ₂ FIXADO (mg/100g AREIA)		
		7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
BRANCA		68	68	68	-	-	-
A.A.C.	RECÉM BRITADA	57	56	55	55	60	65
	1 MÊS APÓS BRITAGEM	60	60	59	40	40	45
	3 MESES APÓS BRITAGEM	60	61	61	40	35	35
	6 MESES APÓS BRITAGEM	62	62	61	30	30	35
A.A.I.	RECÉM BRITADA	58	58	56	50	50	60
	1 MÊS APÓS BRITAGEM	61	61	60	35	35	40
	3 MESES APÓS BRITAGEM	62	62	61	30	30	35
	6 MESES APÓS BRITAGEM	62	62	62	30	30	30

Figura 6 - Fixação da cal em areias artificiais à diversas idades após o beneficiamento.



A M O S T R A		Ca(OH) ₂ NA SOLUÇÃO (mg)				Ca(OH) ₂ FIXADO (mg/100g AREIA)			
		7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	90 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
BRANCA		69	70	69	70	-	-	-	-
TEOR DE FINO (< 0,075 mm)	0 %	65	65	64	64	20	25	25	30
	2 %	64	64	63	64	25	30	30	30
	4 %	63	63	63	63	30	35	30	35
	6 %	63	62	61	60	30	40	40	50
	7 %	63	63	61	60	30	35	40	50
	8 %	63	62	60	59	30	40	45	55
	9 %	63	62	61	60	30	40	40	50

FIGURA 7 - Fixação da cal pela areia artificial do meta-arenito de Capanda com diversos teores de finos

A M O S T R A	Ca(OH) ₂ NA SOLUÇÃO - 28 DIAS	Ca(OH) ₂ FIXADO(mg/100g areia) 28 DIAS
BRANCA	69	-
FINOS DE AREIA ARTIFICIAL DE CAPANDA	53	80
SILTE DE CAPANDA	67	10
CINZA VOLANTE - BLAINE = 3000 cm ² /g	16	265

FIGURA 8 - Fixação da cal pelos materiais de Capanda comparativamente com um material pozolânico.

AMOSTRA - MATERIAL APENAS INFERIOR A 0,075 mm		Ca(OH) ₂ NA SOLUÇÃO (mg)			Ca(OH) ₂ FIXADO (mg/100g)		
		7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
BRANCA		69	69	69	-	-	-
AREIA ARTIFICIAL DE CAPANDA METARENITO	3000 cm ² /g	53	50	46	80	95	115
	6000 cm ² /g	49	43	19	100	130	250
	8670 cm ² /g	41	15	7	140	270	310

FIGURA 9 - Influência da finura (em cm²/g) do material passante na peneira 200 (0,075 mm) em relação à fixação da cal.

A R E I A	A D I Ç Ã O	% D E R E P O S I Ç Ã O	Á G U A R E Q U E R I D A (%)				A T I V I D A D E C O M C I M E N T O (%)			
			C I N Z A V O L A N T E	" F I L L E R "			C I N Z A V O L A N T E	" F I L L E R "		
				RECÊM BRITADO	3 MESES D E BRITADO	6 MESES D E BRITADO		RECÊM BRITADO	3 MESES D E BRITADO	6 MESES D E BRITADO
AREIA DO RIO PARANÁ	CINZA VOLANTE	10	103,9				92,0			
		25	108,6				74,9			
		35	111,8				68,9			
	"FILLER"	10		100,6	100,6	100,5		86,7	88,7	85,7
		25		102,6	100,6	100,6		66,9	71,6	68,0
		35		103,9	101,3	100,8		51,3	52,1	50,9
AREIA ARTIFI- CIAL DE CAPANDA	CINZA VOLANTE	10	103,1				90,7			
		25	106,2				76,4			
		35	109,4				71,5			
	"FILLER"	10		100,0	100,6	100,5		80,5	81,4	79,9
		25		100,0	100,6	100,6		64,2	56,3	56,0
		35		100,0	101,3	101,0		44,7	45,2	43,9
LEGENDA										

"FILLER" - MATERIAL <# 200 PROVENIENTE DA BRITAGEM DO META-ARENITO DE CAPANDA

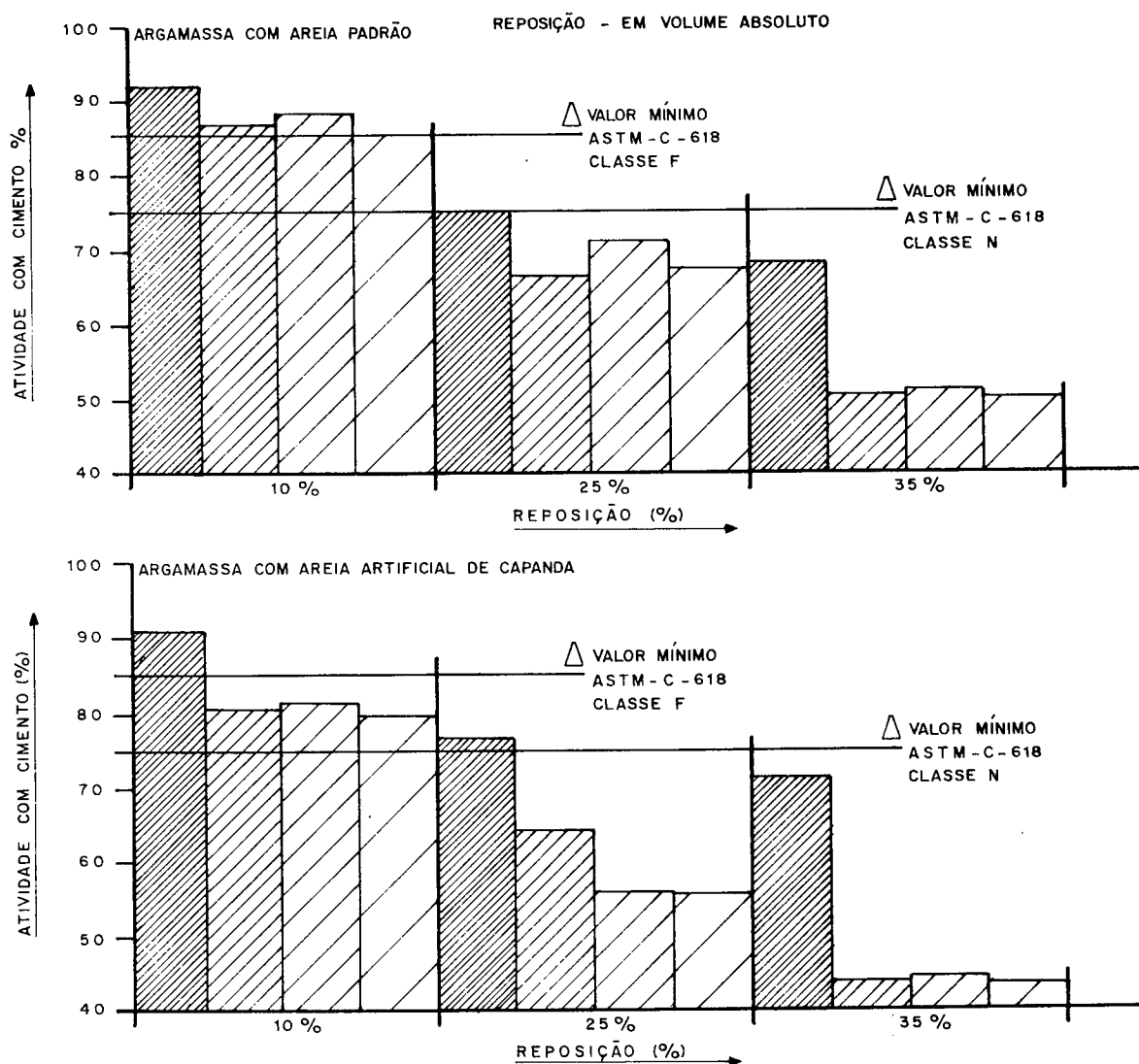


FIGURA 10 - Atividades pozolânicas com cimento.

IDADE (DIAS)	EXPANSÃO (%)				
	TEOR DE FINO ($\leq 0,075$ mm) NA AREIA ARTIFICIAL				
	0 %	5 %	10 %	20 %	40 %
1 DIA	0,010	0,012	0,015	0,017	0,018
2 DIAS	0,020	0,026	0,029	0,033	0,034
3 DIAS	0,034	0,042	0,045	0,049	0,046
7 DIAS	0,137	0,133	0,133	0,125	0,091
9 DIAS	0,185	0,173	0,164	0,150	0,104
12 DIAS	0,230	0,213	0,198	0,177	0,126
LEGENDA	°——°	°-----°	°.....°	°-.-.-.-°	°.....°

GRANULOMETRIA DA AREIA					
PENEIRA Nº	% RETIRADA				
4	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7
8	31,5	29,9	28,4	25,2	18,9
16	19,1	18,1	17,2	15,3	11,5
30	14,6	13,9	13,1	11,7	8,8
50	11,2	10,6	10,1	9,0	6,7
100	11,2	10,6	10,1	9,0	6,7
200	11,2	10,6	10,1	9,0	6,7
< 200	0,0	5	10	20	40

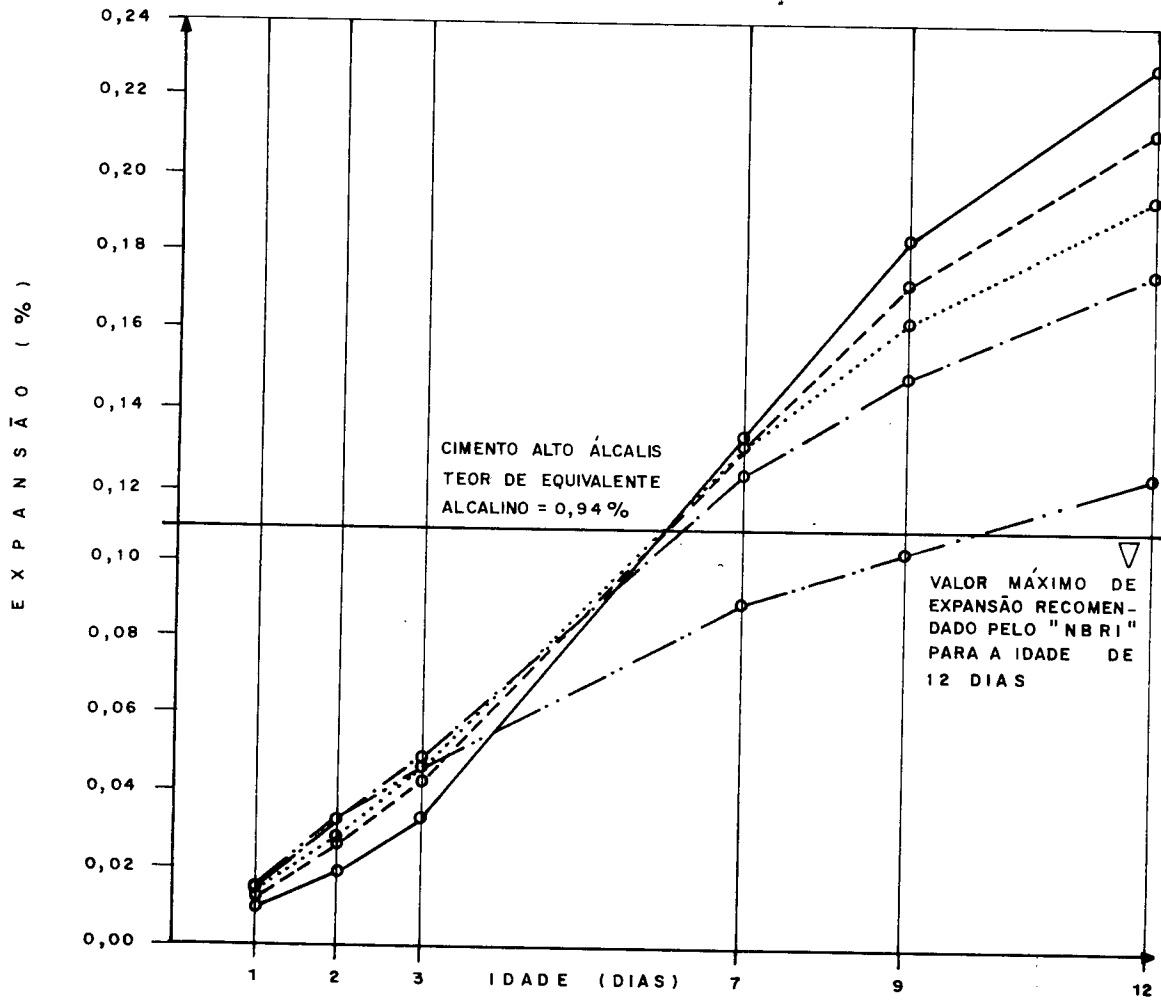


FIGURA 11 - Influência da quantidade de finos na areia com relação à reatividade com os álcalis do cimento.

4.2 Cimento

As amostras do cimento Portland Cimangola, produzidos em Luanda (Angola), se comportaram com valores nos intervalos mostrados na Figura 12.

FINURA	PENEIRA Nº 200 (0,075 mm)		(% RETIDA)	3,4 - 14,6
	PENEIRA Nº 325 (0,044 mm)		(% RETIDA)	21,8 - 41,1
	SUP. ESPECÍFICA (BLAINE)		(cm ² /g)	2857 - 4050
	SUP. ESPECÍFICA (WAGNER)		(cm ² /g)	-
DENSIDADE	APARENTE		(g/cm ³)	-
	ABSOLUTA		(g/cm ³)	3,06 - 3,14
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA PASTA			(g)	-
			(%)	22,4 - 23,4
INÍCIO DE PEGA			(h : mim.)	1:35 - 2:50
EXPANSÃO EM AUTOCLAVE			(%)	0,03 - 0,40
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA		(g)	-
			(A/C)	0,48
	FLOW		(mm)	-
	DATA DA MOLDAGEM		()	-
	TENSÃO	3 DIAS	(kg/cm ²)	134 - 274
		7 DIAS	(kg/cm ²)	190 - 371
		28 DIAS	(kg/cm ²)	316 - 399
		90 DIAS	(kg/cm ²)	339 - 447
CALOR DE HIDRATAÇÃO		7 DIAS	(cal/g)	56,0 - 78,2
		28 DIAS	(cal/g)	70,0 - 90,0
ANÁLISE QUÍMICA	PERDA AO FOGO		(%)	1,22 - 3,02
	INSOLÚVEIS		(%)	0,20 - 0,71
	SiO ₂		(%)	19,03 - 20,6
	Fe ₂ O ₃		(%)	3,34 - 4,46
	Al ₂ O ₃		(%)	3,72 - 5,05
	CaO		(%)	62,6 - 65,2
	MgO		(%)	0,43 - 1,92
	SO ₃		(%)	1,22 - 2,51
	Na ₂ O		(%)	0,20 - 0,42
	K ₂ O		(%)	0,54 - 0,70
	EQUIV. ALCALINO EM Na ₂ O		(%)	0,58 - 0,81
	CAL LIVRE EM CaO		(%)	1,12 - 2,74
COMPOSTOS DE BOGUE	C ₃ S		(%)	40,0 - 68,6
	C ₂ S		(%)	14,2 - 26,0
	C ₃ A		(%)	4,3 - 11,9
	C ₄ AF		(%)	4,3 - 12,8

FIGURA 12 - Cimentos Cimangola usados nos estudos de concreto estrutural, massa e rolado.

4.3 Clinquer

Com intuito de se avaliar uma eventual otimização na qualidade do cimento disponível, foi executado um estudo de finura variável utilizando o clinquer Cimangola com adição de gesso (3%). Os valores são mostrados na Figura 13.

A M O S T R A				CLINQUER E GESSO MOÍDOS			
FINURA	RESÍDUO RETIDO	PENEIRA Nº 200 (0,075 mm) (%)		13,2	8,0	4,8	3,2
		PENEIRA Nº 325 (0,044 mm) (%)		35,5	26,2	17,8	13,1
	SUP. ESPECÍFICA (BLAINE)		(cm ² /g)	2540	3080	3590	4050
MASSA ESPECÍFICA			(g/cm ³)	3,14	3,12	3,12	3,12
PASTA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA		(%)	22,8	23,2	23,4	23,6
	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA		(minutos)	220	200	145	135
	EXPANSÃO EM AUTOCLAVE		(%)	0,26	0,18	0,17	0,15
ARGAMASSA (A B N T)	RELAÇÃO A/C		()	0,48	0,48	0,48	0,48
	TENSÃO DE COMPRESSÃO	3 DIAS	(kg/cm ²)	150	175	193	200
		7 DIAS	(kg/cm ²)	221	269	275	310
		28 DIAS	(kg/cm ²)	316	360	371	392
		90 DIAS	(kg/cm ²)	340	390	406	390
CALOR DE HIDRATAÇÃO		3 DIAS	(cal/g)	45	48	54	54
		7 DIAS	(cal/g)	66	68	75	76
		15 DIAS	(cal/g)	72	75	77	78
		28 DIAS	(cal/g)	83	82	87	87
ANÁLISE QUÍMICA	PERDA AO FOGO		(%)	1,54			
	RESÍDUO INSOLÚVEL EM HCL		(%)	0,37			
	SiO ₂		(%)	21,6			
	Fe ₂ O ₃		(%)	3,08			
	Al ₂ O ₃		(%)	5,62			
	CaO		(%)	63,9			
	MgO		(%)	1,53			
	SO ₃		(%)	1,56			
	Na ₂ O		(%)	0,33			
	K ₂ O		(%)	0,62			
	CAL LIVRE		(%)	1,79			
EQUIV. ALCALINO EM Na ₂ O			(%)	0,74			
COMPOS- TOS DE BOGUE	C ₃ S		(%)	41,8			
	C ₂ S		(%)	40,5			
	C ₃ A		(%)	9,68			
	C ₄ AF		(%)	9,4			

Figura 13 - Ensaio sobre clínquer - finura variável.

4.4 Aditivos

Os estudos de aditivos [3] para concreto foram efetuados com intuito de caracterizar técnica e economicamente os diversos aditivos disponíveis no mercado brasileiro. Entretanto, não propiciam interesse maior para apresentação neste texto.

4.5 Manta de PVC

Os estudos para desenvolvimento de uma manta de P.V.C. são amplamente descritos na referência [4].

5. CONCRETOS - CONVENCIONAIS E ROLADO

5.1 Proporcionamentos

Os estudos objetivando a otimização da dosagem dos concretos convencionais foram executados de acordo com o método adotado no Laboratório de Itaipu, baseado no método SP-46-6 do American Concrete Institute.

A combinação dos agregados graúdos foi efetuada através do critério preconizado pela U.S. Army - Corps of Engineers, de modo a apresentar a menor porcentagem de vazios e, conseqüentemente, a menor quantidade de argamassa.

Após determinada a melhor combinação dos agregados graúdos, efetuaram-se as dosagens experimentais para verificação das quantidades de água e agregado miúdo para atender aos parâmetros básicos (Figura 14).

MISTURA	ϕ MÁX (mm)	SLUMP (cm)	AR (%)	TEMPERATURA(°C)	CIMENTO (kg/m³)	INCORPORADOR	RETARD PLAST.
I-300-A	19	6 ± 0,5	1 ± 0,5	16 a 17	300	NÃO	SIM
I-400-B	19	6 ± 0,5	1 ± 0,5	16 a 17	400	NÃO	SIM
II-300-A	38	5 ± 0,5	1 ± 0,5	16 a 17	300	NÃO	SIM
II-400-A	38	5 ± 0,5	1 ± 0,5	16 a 17	400	NÃO	SIM
II-170-C	38	5 ± 0,5	4 ± 0,5	16 a 17	170	SIM	SIM
II-250-D	38	5 ± 0,5	4 ± 0,5	16 a 17	250	SIM	SIM
III-150-A	76	4 ± 0,5	6 ± 0,5	16 a 17	150	SIM	SIM
III-200-B	76	4 ± 0,5	6 ± 0,5	16 a 17	200	SIM	SIM
IV-100-A	152	4 ± 0,5	7 ± 0,5	16 a 17	100	SIM	SIM
IV-150-B	152	4 ± 0,5	7 ± 0,5	16 a 17	150	SIM	SIM

FIGURA 14 - Parâmetros básicos para estudo de dosagem e caracterização das misturas de concretos convencionais para o Projeto Capanda.

Para a composição dos agregados do concreto rolado, as gamas granulométricas foram proporcionadas para atender uma curva tipo $P = \sqrt[3]{\frac{\phi}{\phi_{(máx)}}} \times 100\%$, sendo :

ϕ = Dimensão do agregado;

ϕ máx = Tamanho máximo do agregado = 76 mm; e,

P = Percentual passante (peso).

As extremidades da curva foram ajustadas para o teor de finos (menor que 0,075 mm) adequado à mistura e para ϕ máx = 76 mm, em teor que não proporcionasse segregação.

Os parâmetros básicos para o concreto rolado estão na Figura 15.

NOMENCLATURA	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m³)	ϕ MÁX. DO AGREGADO	TEMPERATURA (°C)
RC - 60	60	76	23 ± 1
RC - 100	100	76	23 ± 1

FIGURA 15 - Parâmetros básicos para concreto rolado.

5.2 Resistência à Compressão Axial Simples

Na realização desses ensaios foi utilizado o método ASTM-C-39. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com concretos convencionais integrais e peneirados, para cada mistura e idade de ensaio. O adensamento foi feito com vibrador elétrico de imersão.

Para os concretos integrais com diâmetro máximo de 19 e 38 mm, 76 mm e 152 mm, utilizou-se espécimes cilíndricos com dimensões (diâmetro x altura) de 15x30 cm, 25x50 cm e 45x90 cm, respectivamente.

Para determinação do fator de forma (ou peneiramento), fator "q", os concretos com diâmetro máximo de 76 mm e 152 mm foram peneirados na malha de 38 mm e moldados em fôrmas cilíndricas de 15x30 cm (diâmetro x altura). O valor do fator de forma "q" é a relação entre a tensão de ruptura de concreto peneirado e a tensão de ruptura obtida com o concreto integral (sem peneiramento). Foram também moldados pares de corpos de prova prismáticos (cubos) nas dimensões de 15x15x15 cm, 20x20x20cm e 30x30x30 cm, com concretos integrais de 19 e 38 mm, 76 mm, 152 mm, respectivamente, para determinação da resistência à ruptura e da relação entre as resistências de corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

Após as moldagens, todos os corpos de prova foram mantidos na sala de dosagem (temperatura de 23 ± 2°C) por 48 horas, devidamente protegidos contra perda de umidade. A seguir foram deformados e estocados na câmara úmida do Laboratório, com temperatura controlada de 23 ± 2°C e umidade relativa de 100%, até a idade de ensaio.

A moldagem do concreto compactado a rolo foi realizada em quatro camadas, utilizando um compactador pneumático e um período de compactação de aproximadamente 50 segundos em cada camada. A Figura 16 mostra a moldagem de uma série de corpos de prova com concreto compactado a rolo.

Os resultados obtidos são vistos na Figura 17.



FIGURA 16 - Moldagem de corpos de prova (ϕ 25x50 cm) de concreto rolado (CCR), utilizando compactador pneumático, para determinação da resistência à compressão axial.

A Figura 18 mostra os parâmetros de rendimento obtidos para os concretos massa (corpos de prova ϕ 25x50 cm - concreto integral ϕ máx 76 mm) e o concreto rolado (corpos de prova ϕ 25x50, concreto rolado de ϕ máx 76 mm), em comparação com rendimentos obtidos para diversas outras obras (concreto rolado e massa convencionais) [5]. [6]. [7].

Por rendimento "n" entende-se o quociente da resistência pelo consumo de aglomerantes ($\text{kgf/cm}^2/\text{kg/m}^3$).

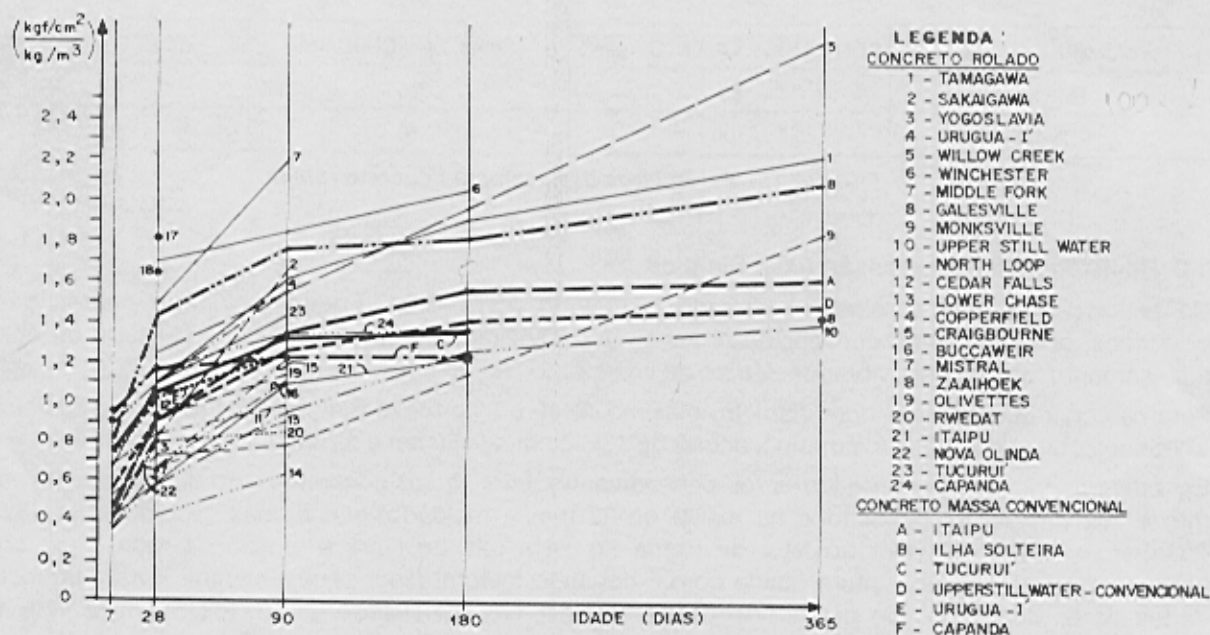


FIGURA 18 - Valores de rendimentos para o concreto rolado e concretos massa convencionais [5].

5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração dos concretos convencionais e compactados a rolo foi determinada pelo "método brasileiro", ou ASTM-C-496, através da ruptura por compressão diametral de pares de corpos de prova cilíndricos.

Os valores obtidos são vistos na Figura 17.

A Figura 19 correlaciona, em termos percentuais, a resistência à tração por compressão diametral e compressão axial simples dos concretos rolados, comparando os valores com os obtidos para outras aplicações de concreto rolado [5].

MISTURA	FORMA E DIMENSÕES DO C.P.	fcj						fcj ϕ / fcj /						q						η						E X 10 ³ (kgf/cm ²)						k (Ei/Ep)					
		IDADE - (DIAS)						IDADE - (DIAS)						IDADE - (DIAS)						IDADE - (DIAS)						IDADE - (DIAS)						IDADE - (DIAS)					
		3	7	28	90	180		3	7	28	90	180		3	7	28	90	180		3	7	28	90	180		3	7	28	90	180		3	7	28	90	180	
I-300	ϕ 15x30	210	288	366	423	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	0,96	1,22	1,41	-	-	216	292	320	346	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		383	467	475	572	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96	1,17	1,19	1,43	-	-	295	361	366	347	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II-300 A	ϕ 15x30	186	252	343	426	-	-	0,94	0,83	0,80	0,87	-	-	-	0,62	0,84	1,14	1,42	-	-	270	284	297	328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		f' 15X15	197	304	427	491	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	1,06	1,15	1,25	-	-	293	320	353	370	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II-400 B	ϕ 15x30	286	425	461	501	-	-	0,97	1,19	0,92	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		f' 15X15	296	357	500	536	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II-170 C	ϕ 15x30	72	114	157	171	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,67	0,92	1,00	-	-	151	202	244	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II-250 D	ϕ 15x30	131	202	251	301	-	-	-	-	-	-	-	-	0,52	0,80	1,00	1,20	-	-	232	263	286	323	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III-150 A	ϕ 15x30	-	127	174	189	199	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	1,16	1,26	1,32	-	-	207	247	251	279	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		ϕ 15x30	-	241	288	319	322	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	274	252	323	365	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III-200 B	ϕ 25x50	-	183	226	248	260	-	-	0,72	0,81	0,80	0,91	1,32	1,27	1,29	1,23	-	1,60	1,61	-	-	281	240	316	373	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		f' 20X20	-	253	277	310	285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
IV-100 A	ϕ 15x30	-	82	112	139	146	-	-	-	-	-	-	-	-	0,82	1,12	1,39	1,46	-	-	182	206	264	254	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		ϕ 15x30	-	155	222	260	255	-	-	-	-	-	-	-	-	1,03	1,48	1,73	1,70	-	-	256	285	310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IV-150 B	ϕ 45x90	-	134	186	223	169	-	-	0,68	0,81	0,79	-	1,16	1,19	1,22	-	-	-	-	-	-	231	283	278	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		f' 30X30	-	198	229	271	252	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

NOTAS: 1 - ϕ e f' - SIMBOLIZAM CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS, RESPECTIVAMENTE;
2 - fcj ϕ / fcj f' - RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS DOS CPs, CILÍNDRICO PELO PRISMÁTICO, COM CONCRETO INTEGRAL;
3 - q - FATOR TAMANHO DO AGREGADO, QUE É A RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS DOS CPs DE CONCRETO PENEIRADO E CONCRETO INTEGRAL;
4 - η - EFICIÊNCIA DA DOSAGEM, QUE É A RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA E O CONSUMO DE AGLOMERANTE NO CONCRETO PENEIRADO, DADA EM kgf/cm²/kg/m³;
5 - fcj - TENSÃO OBTIDA NA COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES, DADA EM kgf/cm²
6 - Ei - MÓDULO DE ELASTICIDADE COM CONCRETO INTEGRAL;
7 - Ep - MÓDULO DE ELASTICIDADE COM CONCRETO PENEIRADO;
8 - k - RELAÇÃO ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDADE COM CONCRETO INTEGRAL E COM CONCRETO PENEIRADO.

MISTURA	COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES σ_c (kgf/cm ²)				MÓDULO DE ELASTICIDADE E (kgf/cm ²)				TRACÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL σ_t (kgf/cm ²)				MASSA ESPECÍFICA INTEGRAL γ_{ss} (kg / m ³)	ABSORÇÃO (%)
	IDADE (DIAS)				IDADE (DIAS)				IDADE (DIAS)					
	7	28	90	180	7	28	90	180	7	28	90	180		
RC - 60	51	63	73	78	55(110)	75(110)	123(110)	146(110)	6,3	6,2	6,2	8,7	2438	3,32
	109	124	156	140	152(110)	213(110)	244(110)	246(110)	13,2	15,2	-	-	2450	3,54

Figura 17 - Resultados de Ensaios de Concretos Convencionais e Rolado.

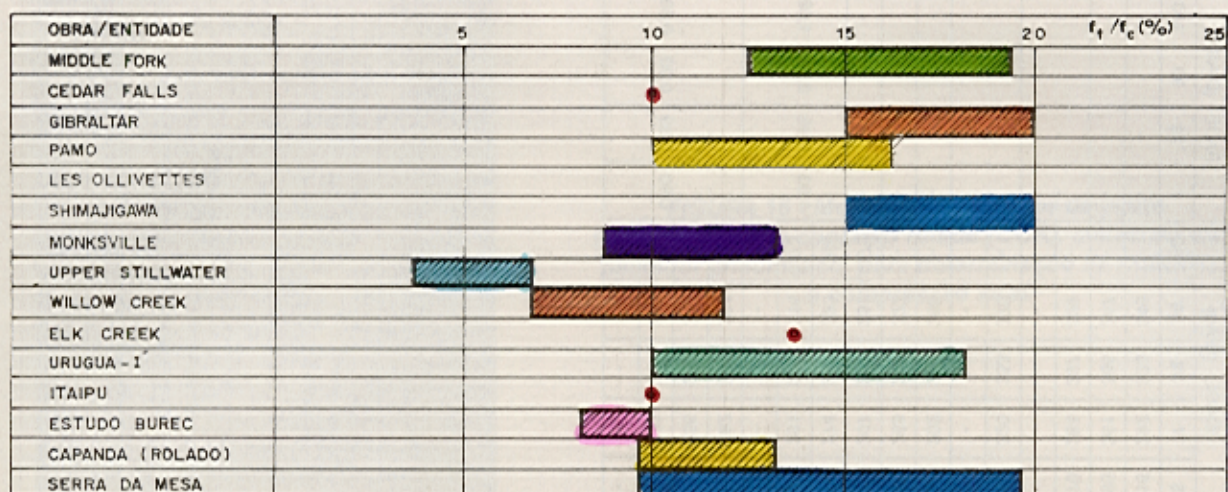


FIGURA 19 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial simples.

5.4 Módulo de (Elasticidade) Deformação

Com os mesmos corpos de prova cilíndricos do ensaio de compressão axial, e momento antes desse ensaio, foi determinado o módulo de elasticidade, seguindo o método ASTM-C-469.

Para determinação das deformações longitudinais foi utilizado um equipamento mecânico (hastes metálicas e dois relógios comparadores com precisão de 1μ). O comprimento efetivo de cada linha de medida foi sempre maior que três vezes o diâmetro máximo do agregado e menor que $2/3$ da altura do corpo de prova.

Os resultados do módulo de elasticidade obtidos com os concretos convencionais integrais e peneirados, bem como a relação (K) entre esses valores, estão sendo apresentados na Figura 17, onde também são vistos os valores de módulo de elasticidade dos concretos rolados.

A Figura 20 mostra, comparativamente, os valores de módulos de deformação de concretos convencionais e rolados de várias obras [5].

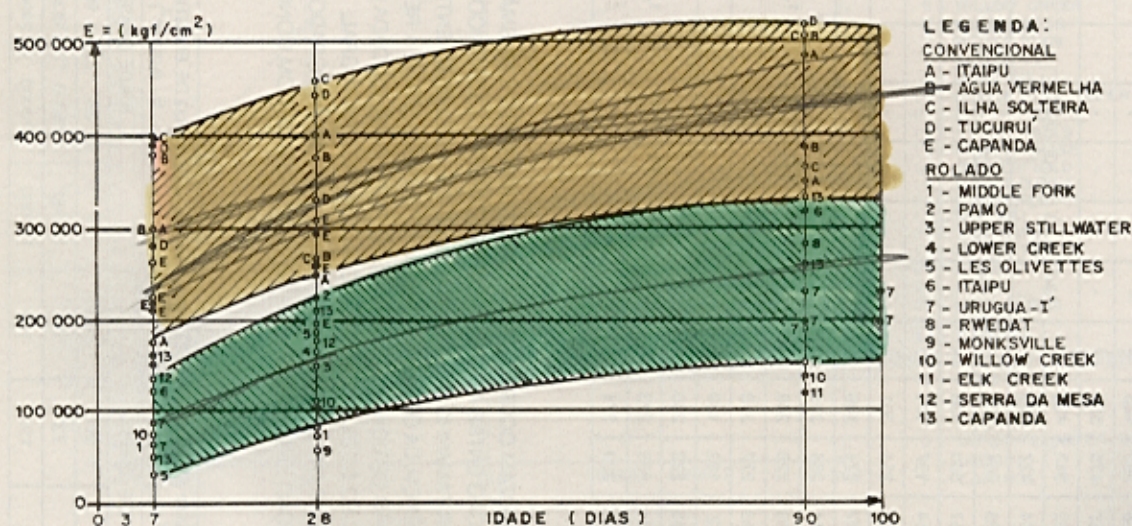


FIGURA 20 - Correlação de valores de módulo de deformação, de concretos convencionais e rolado, obtidos para a obra de Capanda e de outras obras.

5.5 Compressão Triaxial

Os ensaios de compressão triaxial tem o objetivo de determinar a coesão e o ângulo de atrito interno do concreto.

O procedimento desse ensaio, baseado no método ASTM-D-2664 e nos métodos CRD-C-93 e CRD-C-147, do Corps of Engineers, consiste, basicamente, em submeter um corpo de prova, revestido por uma membrana impermeável e flexível, à uma pressão confinante constante e uma carga axial até à ruptura. A Figura 21, esquematiza o ensaio.

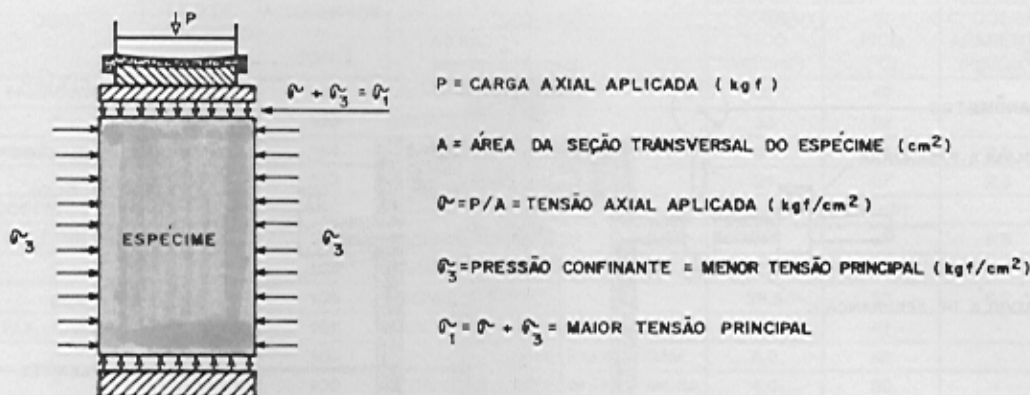


FIGURA 21 - Esquema de carregamento de um corpo de prova submetido ao ensaio de compressão triaxial.

Com as tensões principais (σ_1) de ruptura, para cada tensão confinante (σ_3), determina-se graficamente o conjunto de círculos de Mohr e, posteriormente, a envoltória, obtendo-se a coesão (C) e o ângulo de atrito interno (ϕ) do concreto, como mostra a Figura 22.

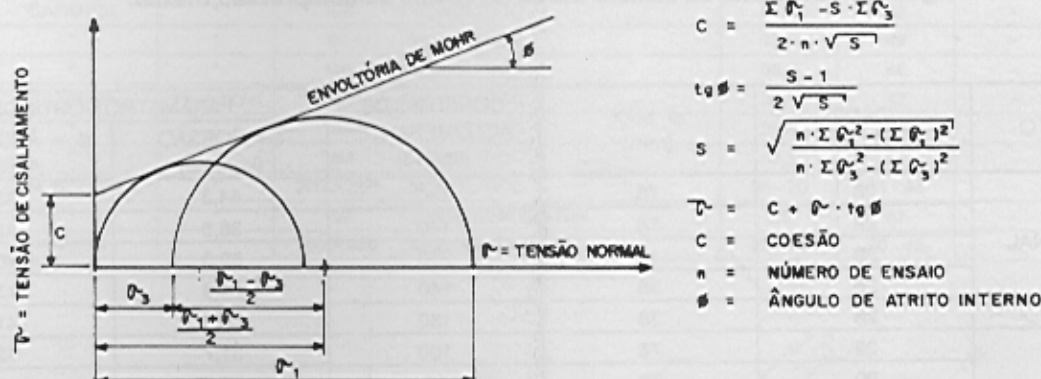


FIGURA 22 - Envoltória de Mohr e parâmetros de cisalhamento.

Os ensaios foram executados com corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm. Para os concretos de diâmetro máximo 76 mm, os corpos de prova para ensaio foram extraídos dos corpos de prova de 25x30 cm. Os corpos de prova foram regularizados com chapa de madeira e receberam um revestimento, para proteção e impermeabilização, constituído de:

- 10 camadas de plástico (vita-film) no sentido topo/base;
- 20 camadas de plástico (vita-film) no sentido longitudinal; e,
- 5 camadas de fita crepe.

Para realização do ensaio de compressão triaxial foram utilizados os equipamentos mostrados na Figura 23. A câmara triaxial utilizada é mostrada, esquematicamente, na Figura 24.

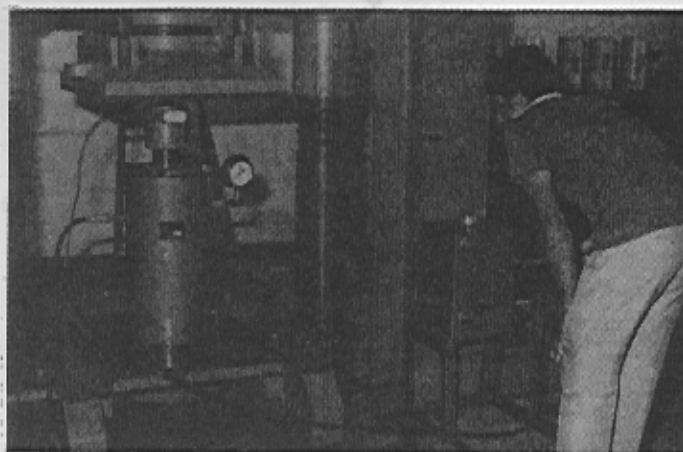


FIGURA 23 - Câmara triaxial posicionada na prensa para carga axial, sendo a carga confinante aplicada por bomba manual. A célula de carga, entre o topo da câmara e o prato da prensa, mede a carga axial.

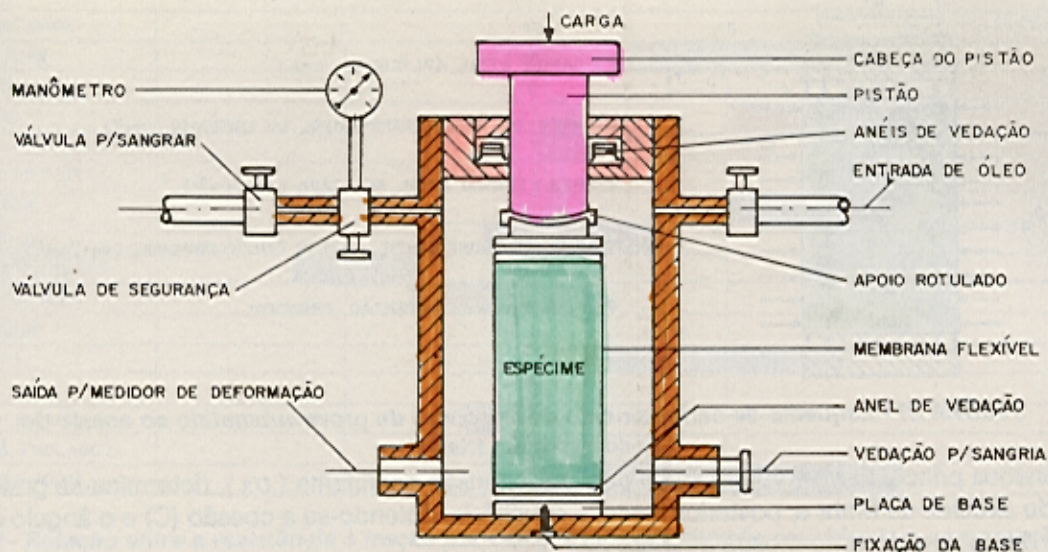


Figura 24 - Esquema da câmara usada no ensaio de compressão triaxial.

CONCRETO	IDADE (DIAS)	ϕ MÁX (mm)	CONSUMO DE AGLOMERANTE (kg/m ³)	PARÂMETROS OBTIDOS	
				C = COESÃO (kg/cm ²)	ϕ = ÂNGULO DE ATRITO
CONVENCIONAL	28	76	180	44,3	43
	28	76	140	36,5	42
	28	19	250	59,6	40
	28	38	140	29,9	43
	28	38	180	38,5	41
ROLADO	28	76	100	31,7	42
	90	76	60	15,7	49
	90	76	100	38,3	46

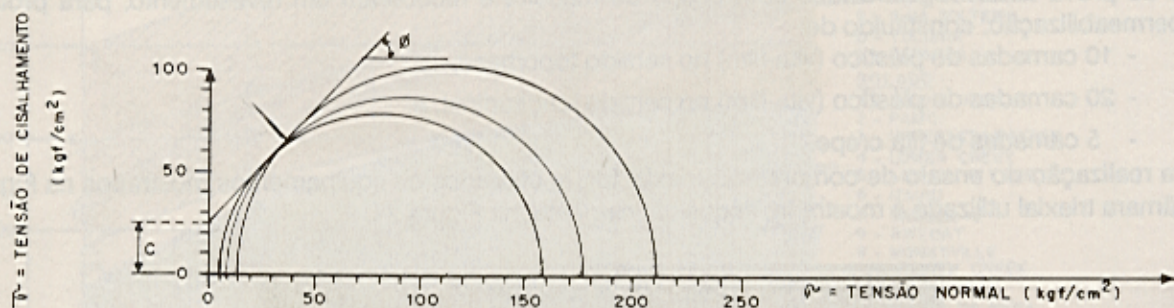


FIGURA 25 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial.

A figura 26 apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito, em comparação aos de outras obras, obtidos por ensaios e cisalhamento multiaxial, em laboratório e "in situ".

5.6 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO

A massa específica e absorção dos concretos estudados foram determinadas sobre corpos de prova de concreto endurecido e seguindo o procedimento preconizado pelo método ASTM-C-642. Os valores obtidos são também mostrados na Figura 17.

As Figuras 27 e 28 mostram correlações entre as massas específicas de concretos (rolados e convencionais) com diversos agregados de várias obras.

IDENTIFICAÇÃO	OBRA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO DE AGLOMERANTE (kg/m ³)	CONDIÇÃO	PARÂMETROS			
					C COESÃO PICO (kgf/cm ²)	φ PICO (°C)	C' COESÃO APARENTE (kgf/cm ²)	φ' APARENTE (°C)
1	TAMAGAWA	ROLADO	130	JUNTA TRATADA	30	49	-	-
2	"	"	130	MONOLÍTICO	33	52	-	-
3	UPPER STILLWATER	"	253	JUNTA SEM TRATAR	34	64	2,5	47
4	"	"	253	MONOLÍTICO	21	57	2,3	44
5	COPPERFIELD	"	110	CONJUNTO	0,2 - 1,5	46 - 51	-	-
6	GALESVILLE	"	106	JUNTAS SEM BERÇO	7,8	67	5,6	40
7	"	"	106	JUNTAS COM BERÇO	23,3	52	4,9	43
8	"	"	106	MONOLÍTICO	26,8	33	6,7	45
9	ELK - CREEK	"	106	JUNTAS SEM TRATAR	1,1	41	-	-
10	"	"	106	JUNTAS SEM TRATAR E COM ARGAM.	6,0	62	-	-
11	"	"	106	JUNTA LAVADA E COM ARGAMASSA	4,0	56	-	-
12	"	"	106	MONOLÍTICO	8,5	67	-	-
13	URUGUAÍ	"	60	JUNTAS COM BERÇO	3,8 - 4,6	54 - 59	3,2 - 3,6	40 - 47
14	"	"	60	280 °C x H - SEM BERÇO	2,9 - 3,1	40 - 44	3,3 - 3,4	36 - 40
15	"	"	60	500 °C x H - SEM BERÇO	4,2 - 4,4	33 - 37	3,6 - 3,9	30 - 36
16	"	"	60	780 °C x H - SEM BERÇO	2,5 - 2,7	39 - 42	3,6 - 3,7	32 - 37
17	"	"	60	MONOLÍTICO	24,6	48	-	-
18	SERRA DA MESA	"	200	MONOLÍTICO	22,0	58	-	-
19-1	CAPANDA	"	100	MONOLÍTICO	31,7	42	-	-
19-2	"	"	60	MONOLÍTICO	15,7	49	-	-
19-3	"	"	100	MONOLÍTICO	38,3	46	-	-
A-1	CAPANDA	CONVENIONAL	140	MONOLÍTICO	36,5	42	-	-
A-2	"	"	140	MONOLÍTICO	29,9	43	-	-
A-3	"	"	180	MONOLÍTICO	38,5	41	-	-
B-1	ILHA SOLTEIRA	"	200 À 350	MONOLÍTICO	55 - 70	31 - 44	-	-
B-2	"	"	109	JUNTA SEM TRATAR	5,5	67	-	-
C-1	ITAIPU	"	100 À 350	MONOLÍTICO	22 - 96	40 - 42	-	-

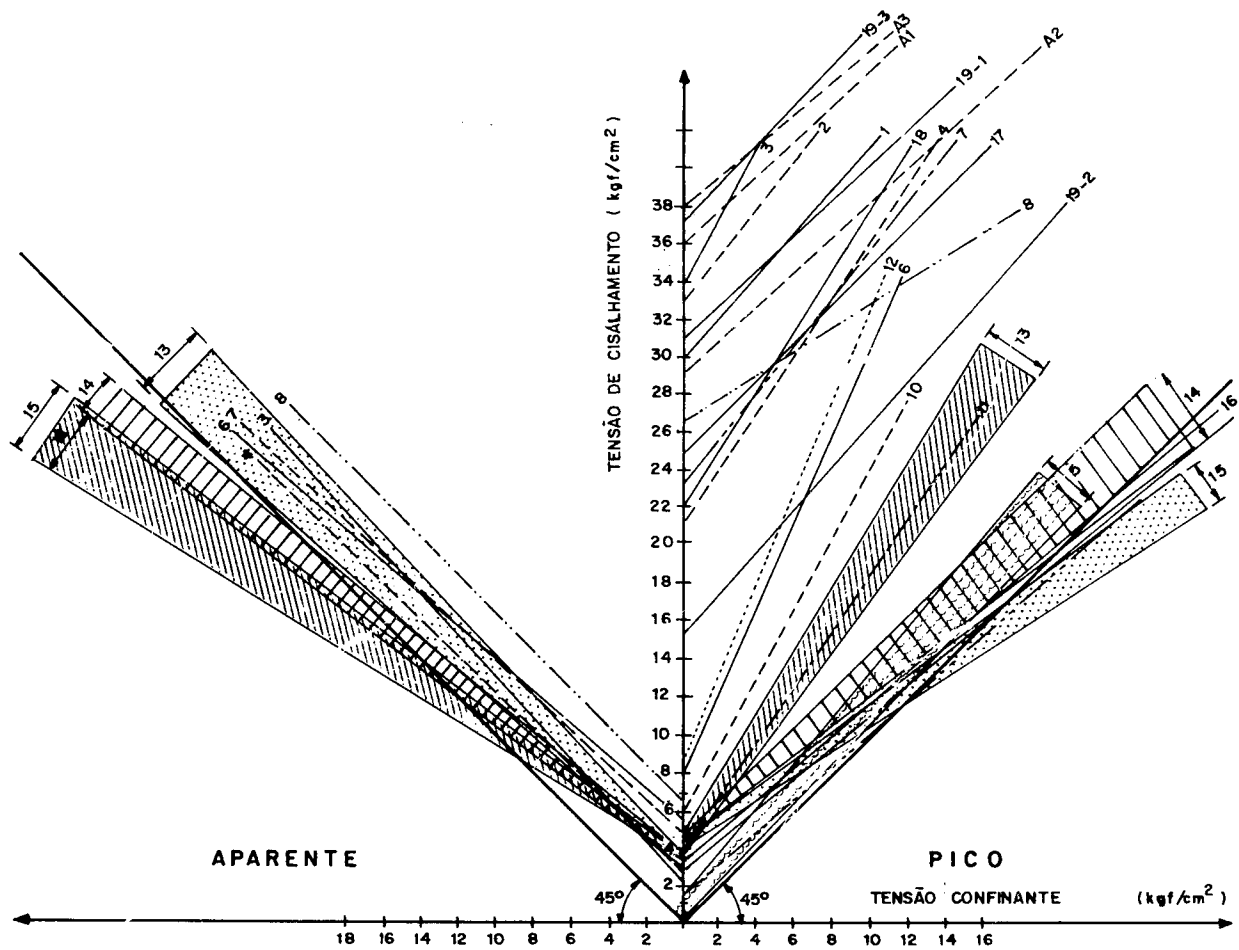


FIGURA 26 - Valores de coesão e ângulo de atrito.

APLICAÇÃO OU ESTUDO	AGREGADO		MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	
	TIPO	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	CONCRETO ROLADO	CONCRETO CONVENCIONAL
ITAIPU ✓ *	BASALTO	2900 - 2950	2507 - 2625	2605
URUGUAÍ ✓ *	BASALTO	2900 - 2950	2632 - 2694	2450
SACO NOVA OLINDA ✓ *	GRANITO-GNEISS	2744	2295 - 2365	2252 - 2350
CAPANDA ✓ **	METARENITO	2620 - 2640	2438 - 2450	2420 - 2445
TUCURUÍ	METASSEDIMENTO	2730 - 2760	2400	-
SERRA DA MESA **	GRANITO	2640	2325 - 2475	-
BOCAINA **	QUARTZITO	2950 - 3000	2418 - 2609	-

* ENSAIOS DURANTE A EXECUÇÃO

** ENSAIOS DE LABORATÓRIO

FIGURA 27 - Massa específica de agregados e concretos.

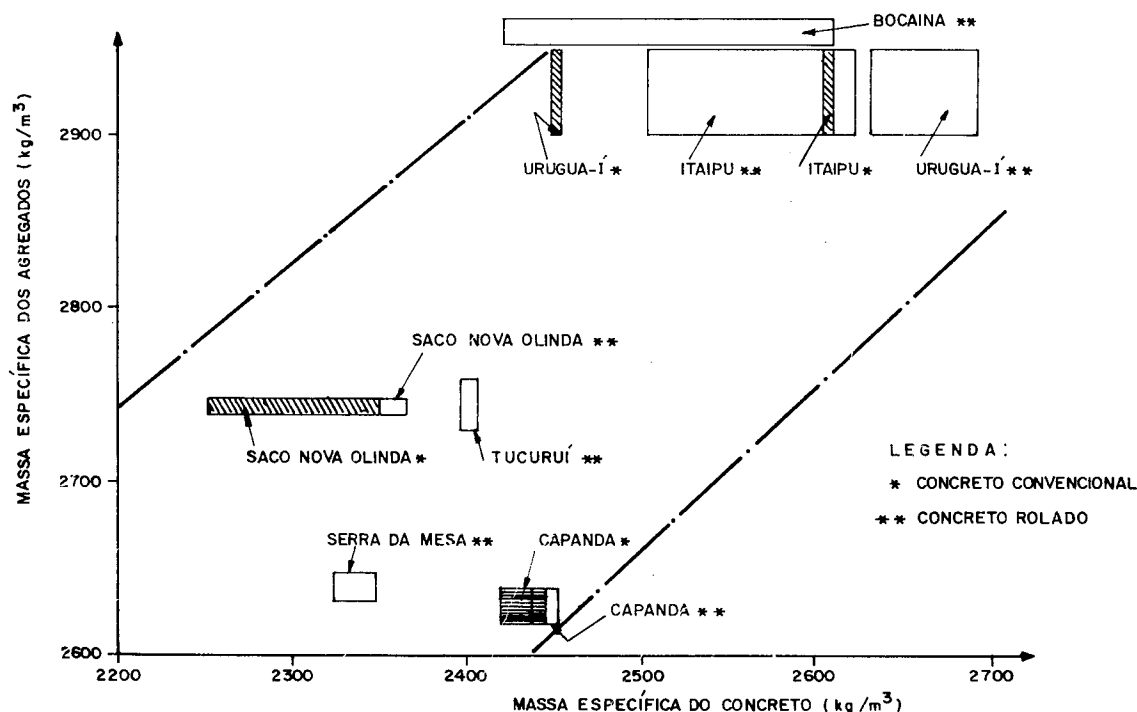


FIGURA 28 - Correlação entre massa específica de agregados e de concretos rolados e convencionais produzidos com esses agregados.

5.7 Capacidade de Alongamento à Tração

Na determinação da resistência à tração na flexão e capacidade de alongamento à tração dos concretos convencionais foi adotado o método CRD-C-16, do Corps of Engineers.

Para as medidas de deformações específicas na face tracionada, foi instalado em cada viga um deformímetro elétrico, tipo strain-meter, modelo A-10 da Carlson. O extensômetro foi instalado na face lateral da fôrma, devido a melhor qualidade da superfície do concreto nesta região. Posteriormente, através de um giro de 90° da viga desmoldada, o aparelho instalado ficou na posição de ensaio. Os extensômetros elétricos foram previamente calibrados (térmica e mecânica) e firmemente fixados às fôrmas através de fios, de modo que durante a moldagem não se deslocassem de suas posições (ver Figura 29).

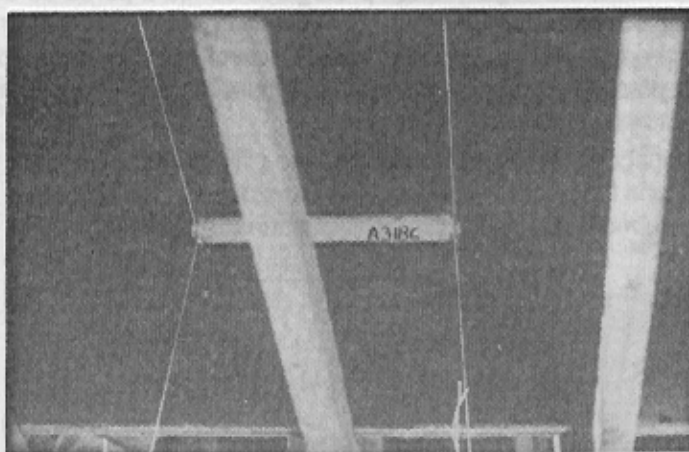


FIGURA 29 - Fixação do extensômetro elétrico no centro de uma face lateral da fôrma.

O carregamento das vigas foi efetuado de forma ascendente, visando minimizar o efeito do peso próprio nas medidas de alongamento. Para maior precisão e sensibilidade do carregamento foi utilizada uma célula de carga. A velocidade de aplicação do carregamento foi constante e igual a $0,2 \text{ kg/cm}^2/\text{minuto}$ na fibra externa tracionada.

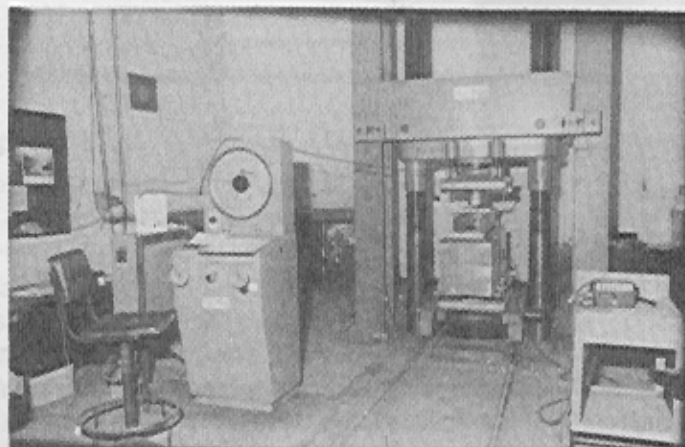


Figura 30 - Vista geral dos equipamentos para o ensaio de tração por flexão.

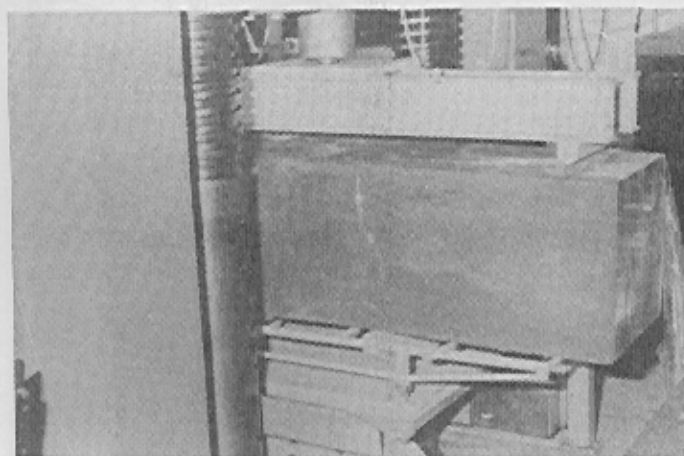


Figura 31 - Detalhes do ensaio de tração por flexão.

Observa-se na Figura 31 a proteção do espécime com plástico, a célula de carga posicionada entre o prato da prensa e o cutelo superior, o suporte de manuseio da viga e o cutelo inferior aplicador do carregamento.

A determinação da capacidade de alongamento à tração dos concretos compactado a rolo foi efetuada em corpos de prova cilíndricos de $25 \times 50 \text{ cm}$. Os espécimes tiveram seus topos serrados, para melhorar a

planicidade e paralelismo das faces, e a seguir, foram protegidos contra a perda de umidade, através do envolvimento dos mesmos com plásticos fundente, tipo "Vitafilm". Em seguida, foram coladas, utilizando-se cola epoxi, as chapas metálicas para aplicação do carregamento. Antes da colagem, os topos dos corpos de prova foram secos ao ar e as placas limpas com acetona. A Figura 32 mostra a preparação de um corpo de prova para ensaio de capacidade de deformação à tração.

Para determinação das deformações de tração, foram colados "Wire Strain-Gages", tipo A-9 da BLH (com base de medida de 165 mm), nas faces diametralmente opostas dos corpos de prova, sendo que a leitura foi efetuada por uma ponte Peekel, modelo B-105, com sensibilidade de 1μ strain.

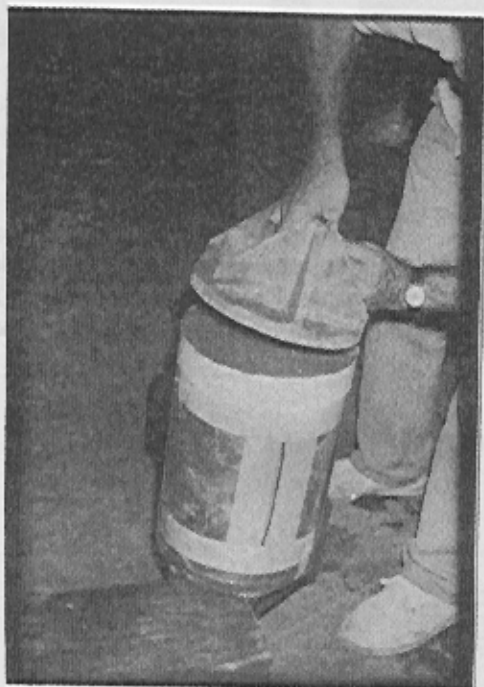


FIGURA 32 - Preparação de um corpo de prova para ensaio de capacidade de alongamento. Observa-se a colagem de uma chapa metálica, a proteção contra a perda de umidade e um extensômetro elétrico colado.

O esforço de tração foi aplicado axialmente (tração pura), com incrementos de cargas crescentes até a ruptura, a uma velocidade de $0,5 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$. Para aplicação do carregamento foi utilizado o sistema mostrado na Figura 33.

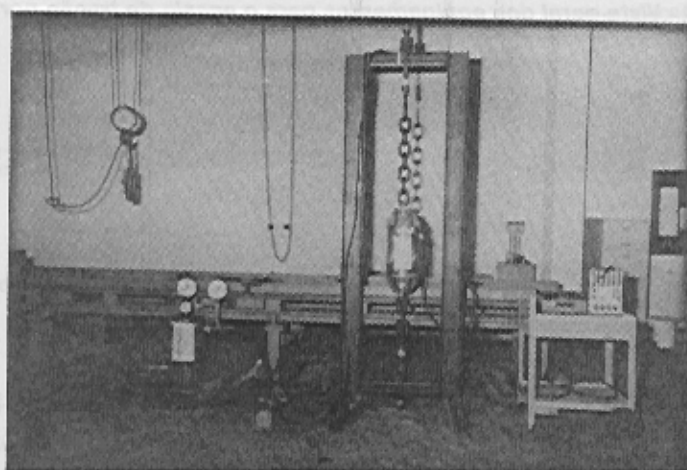


FIGURA 33 - Ensaio de capacidade de alongamento à tração do concreto compactado a rolo. Observa-se, em cima da estrutura, o macaco hidráulico acionado por pulmão-bomba equipado com manômetros de precisão (à esquerda). À direita, o conjunto para leituras de deformação.

A figura 34 mostra os valores de capacidade de alongamento de concretos rolado e convencionais, colocados em correlação com os teores de aglomerante e em comparação com concretos - rolados e convencionais - de outras obras.

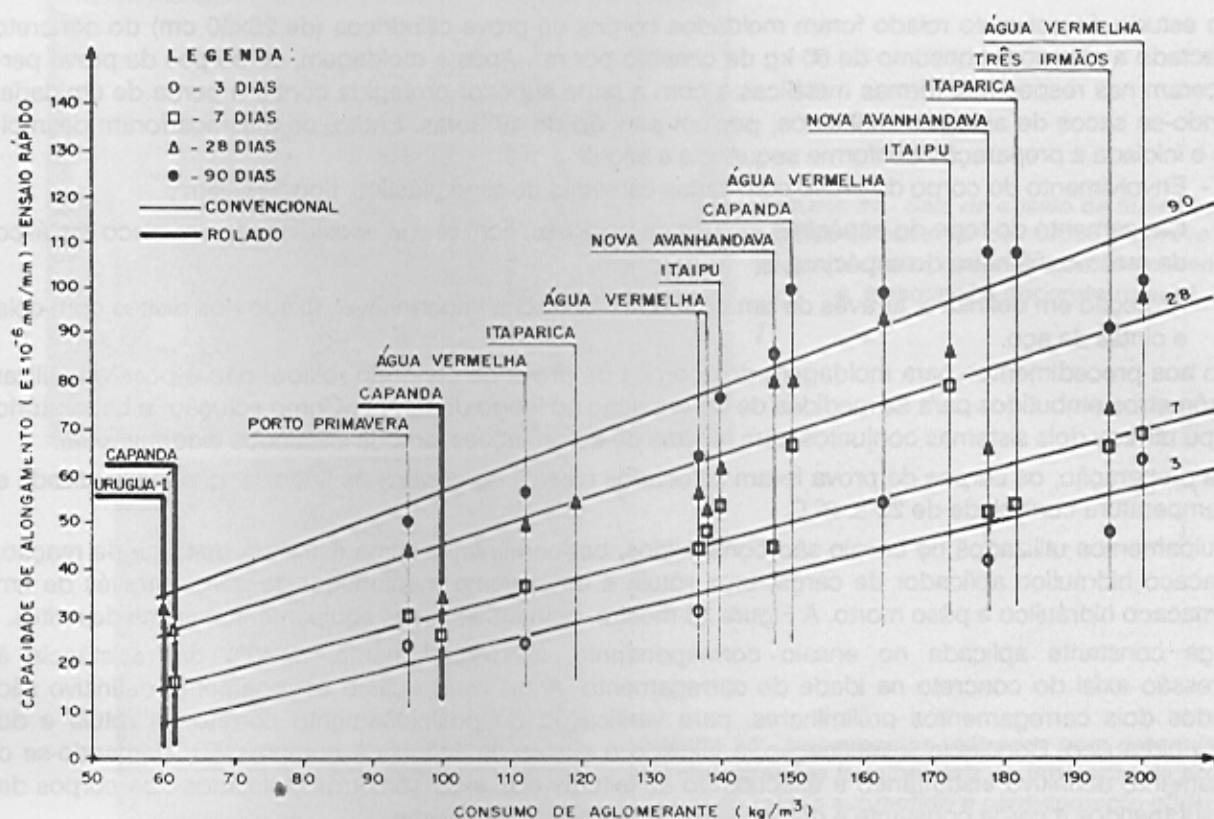


FIGURA 34 - Valores de capacidade de alongamento de concretos - rolado e convencionais.

5.8 Fluência à Compressão

A fluência à compressão consiste, basicamente, na determinação da deformação decorrente de uma solicitação constante aplicada axialmente e durante um certo período de tempo. O método de ensaio usado é baseado no CRD-C-54 - Corps of Engineers.

Para determinação das deformações ao longo do tempo, foi instalado em cada corpo de prova dos concretos convencionais, tanto no corpo de prova sob carregamento constante quanto no de variação autógena, um extensômetro elétrico, tipo strain-meter A-10 de fabricação Carlson, previamente aferido (térmica e mecânica). As leituras de deformação foram efetuadas com o indicador digital SDC-300B, da Kyowa. A fixação do aparelho foi efetuada com auxílio de fios de nylon, de uma barra de aço apoiada nas laterais do molde e de uma chapa cilíndrica de aço com um furo central, por onde se passa o cabo do extensômetro elétrico. Essa chapa cilíndrica é a base da fôrma e, após a desforma, continua fixa ao corpo de prova servindo como capeamento.

Para ensaio do concreto convencional foi utilizado um concreto massa de ϕ máx 15" mm e 150 kg/m³ de aglomerante.

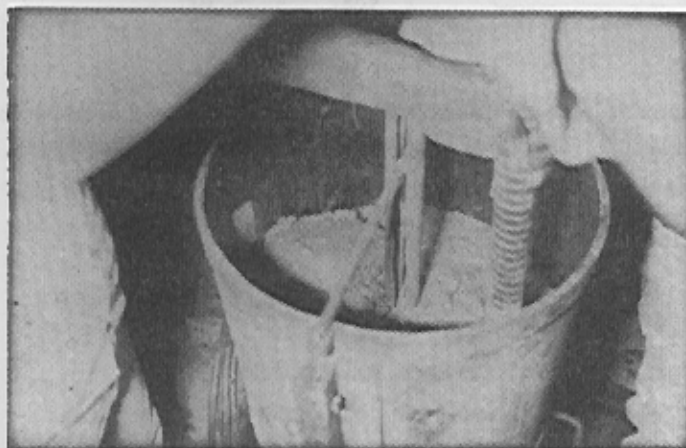


FIGURA 35 - Moldagem de um espécime para ensaio de fluência à compressão do concreto convencional. Observa-se a utilização de um tubo de PVC para proteção do deformímetro contra o contato brusco do agregado grão e/ou do vibrador de imersão.

Para o estudo do concreto rolado foram moldados corpos de prova cilíndricos (de 25x50 cm) do concreto compactado a rolo com consumo de 60 kg de cimento por m³. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nas respectivas fôrmas metálicas e com a parte superior protegida contra a perda de umidade, utilizando-se sacos de aniagem molhados, por um período de 48 horas. Então, os mesmos foram desmoldados e iniciada a preparação conforme sequência a seguir:

- Envolvimento do corpo de prova com várias camadas de filme plástico, tipo "Vita-film";
- Capeamento do topo do espécime através da colagem, com resina epoxídica, de um disco metálico de mesmo diâmetro do espécime, e;
- Proteção em definitivo, através de um cilindro de borracha impermeável, fixado nos discos com cola e cintas de aço.

Devido aos procedimentos para moldagem dos corpos de prova de concreto rolado, não é possível utilizar extensômetros embutidos para as medidas de deformação ao longo do tempo. Como solução, o Laboratório de Itaipu utilizou dois sistemas conjuntos para leituras de deformações, ambos instalados externamente.

Após a preparação, os corpos de prova foram estocados na sala de ensaios de fluência, que é climatizada e com temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ \text{C}$.

Os equipamentos utilizados no ensaio são constituídos, basicamente, de uma estrutura metálica de reação, um macaco hidráulico aplicador de carga, uma rótula e um sistema mantenedor de carga através de um outro macaco hidráulico e péso morto. A Figura 36 mostra, com detalhes, os equipamentos acima descritos.

A carga constante aplicada no ensaio correspondente, aproximadamente, a 40% da resistência à compressão axial do concreto na idade de carregamento. Antes de aplicar o carregamento definitivo são realizados dois carregamentos preliminares, para verificação do posicionamento correto da rótula e do macaco hidráulico. Concluída a verificação, é iniciado o ensaio de fluência à compressão, efetuando-se o carregamento definitivo instantâneo e executando as leituras dos extensômetros instalados nos corpos de prova submetidos à carga constante e nos de variação autóloga de volume.

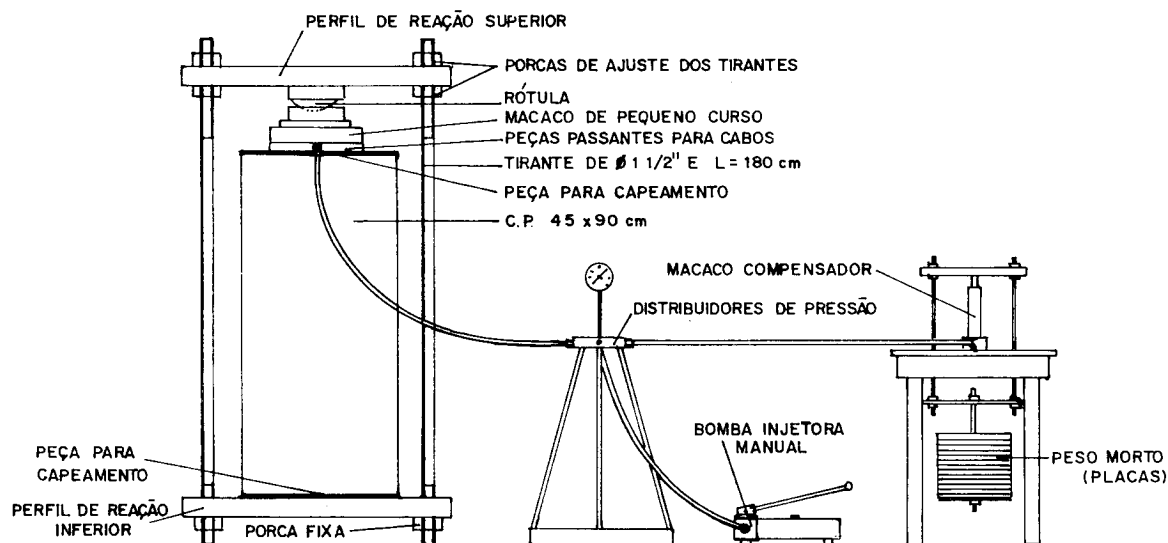


FIGURA 36 - Esquema do sistema de carregamento do ensaio de fluência à compressão.

A função de fluência utilizada é definida pela expressão:

$$e = \frac{1}{E_i} + f(k) \ln(t + 1)$$

onde:

- e = Deformação total específica por unidade de tensão;
- E_i = Módulo de elasticidade obtido logo após aplicação da carga;
- $f(k)$ = Coeficiente que representa a velocidade de fluência com o tempo; e,
- t = Tempo sob carga.

As Figuras 39 e 40 apresentam a evolução da fluência específica, acrescida da deformação elástica instantânea em relação a logaritmo neperiano do tempo sob carga mais um dia, para cada idade de carregamento.



FIGURA 37 - Sala de ensaio de fluência, onde pode se observar os corpos de prova sob carga (à direita, concreto massa convencional e, à esquerda, concreto rolado).

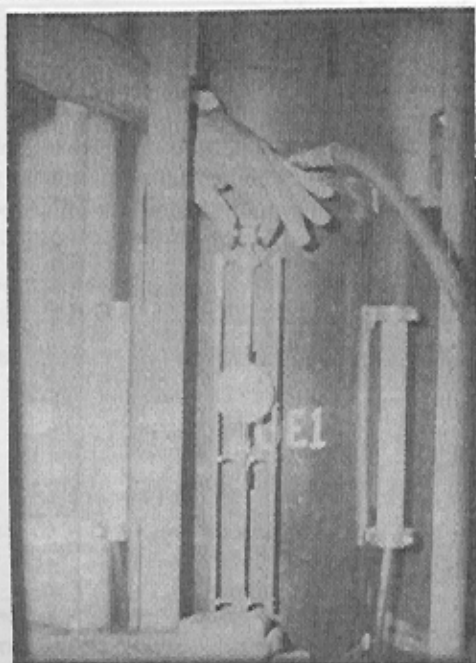


FIGURA 38 - Instrumentos utilizados para determinação das deformações longitudinais de um corpo de prova de concreto rolado submetido a carregamento constante.

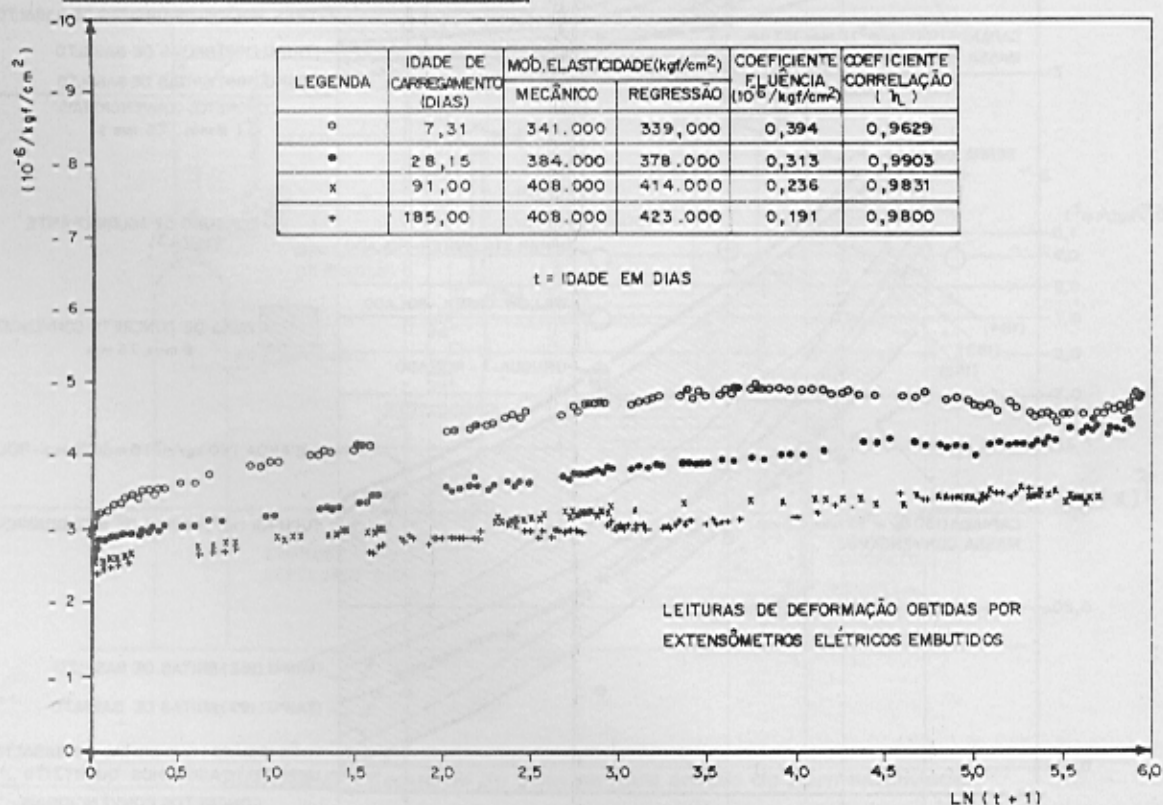
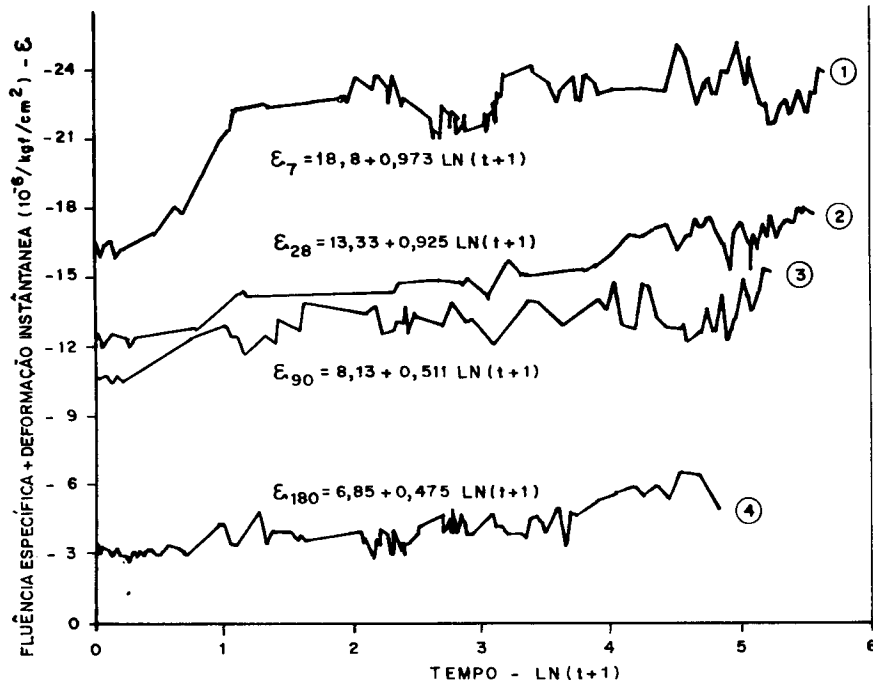


FIGURA 39 - Curvas de fluência do concreto massa convencional (ϕ máx 152 mm) com 150 kg/m³ de aglomerante.



LEGENDA:

- ① IDADE DE CARREGAMENTO 7 DIAS
- ② " " " 28 DIAS
- ③ " " " 90 DIAS
- ④ " " " 180 DIAS

OBS.: LEITURAS APARELHO MECÂNICO

$\epsilon = 1/E + F(K) \text{ LN}(t+1)$

$F(K)$ = COEFICIENTE DE FLUÊNCIA

$1/E$ = DEFORMAÇÃO INSTANTÂNEA

OBTIDA NO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

t = TEMPO SOB CARGA (DIAS)

Figura 40 - Curvas de fluência do concreto rolado (ϕ máx 76 mm) com $60 \text{ kg}/\text{m}^3$ de aglomerante.

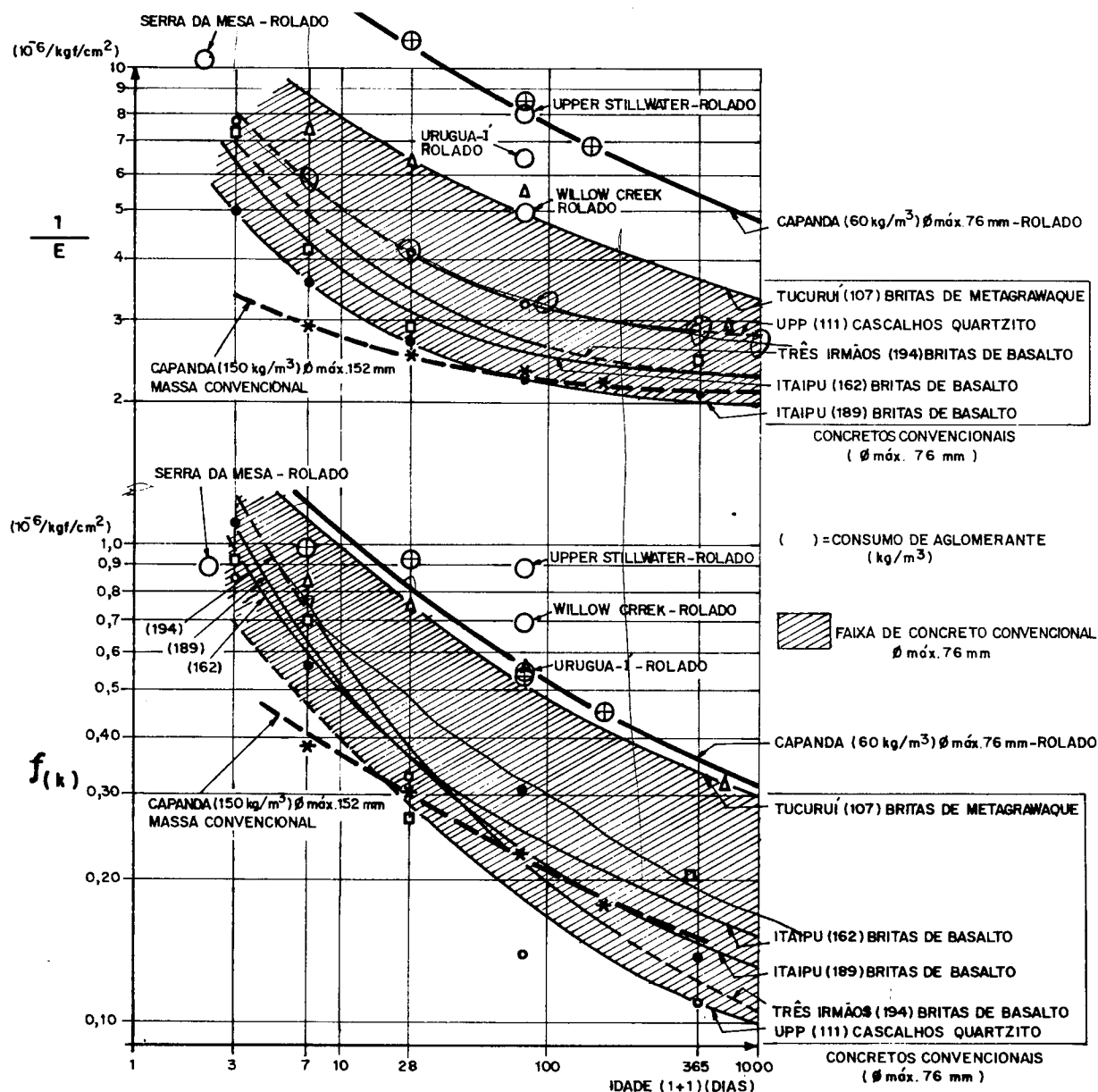


FIGURA 41 - Dados de parâmetros de fluência de diversos concretos - rolados e convencionais.

A Figura 41 coloca os parâmetros $f(k)$ e $\frac{1}{E}$, obtidos para os concretos convencionais e rolados de Capanda, em comparação com esses parâmetros de concretos de outras obras.

5.9 Permeabilidade.

A permeabilidade dos concretos estudados foi determinada através do método CRD-C-48, do Corps of Engineers, cujos cálculos do coeficiente de permeabilidade (k_c) são baseados na aplicação da lei de Darcy para um fluxo unidirecional sob pressão constante. A fórmula de cálculo é a seguinte:

$$K_c = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H}$$

Sendo:

K_c = Coeficiente de permeabilidade do concreto (cm/s)

Q = Vazão (cm³/s)

L = Comprimento do corpo de prova (cm)

A = Área da seção transversal do corpo de prova (cm²)

H = Altura da coluna d'água (cm)

Os ensaios foram executados sobre corpos de prova de concretos moldados conforme descrito no item 4.1. Para os concretos de diâmetro máximo 19 e 38 mm foram utilizados os corpos de prova de 15x30 cm. Para os concretos de diâmetro máximo 76 mm, foram utilizados corpos de prova de 25x24 cm, obtidos pelo corte, ao meio, de corpos de prova de 25x50 cm e identificando as duas metades como parte superior e inferior.

Para execução do ensaio foi utilizado o equipamento esquematizado na Figura 42. A temperatura da sala de ensaio foi mantida controlada em 23°C ± 2°C.

Os valores obtidos são vistos na Figura 43, juntamente com dados de ensaios de concretos de várias obras.

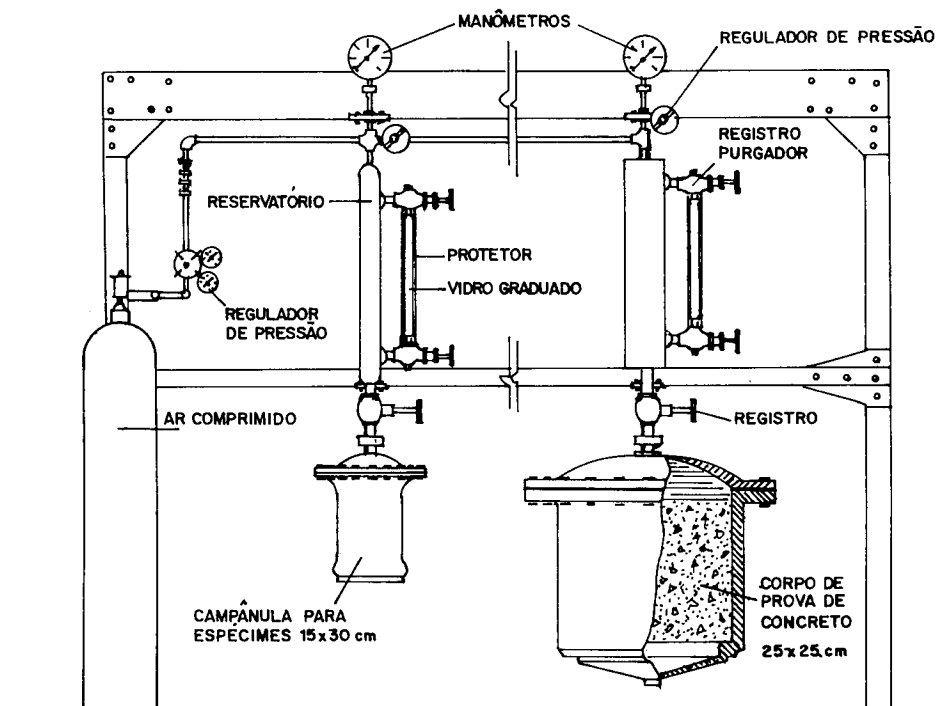


FIGURA 42 - Esquema do sistema para ensaio de permeabilidade.

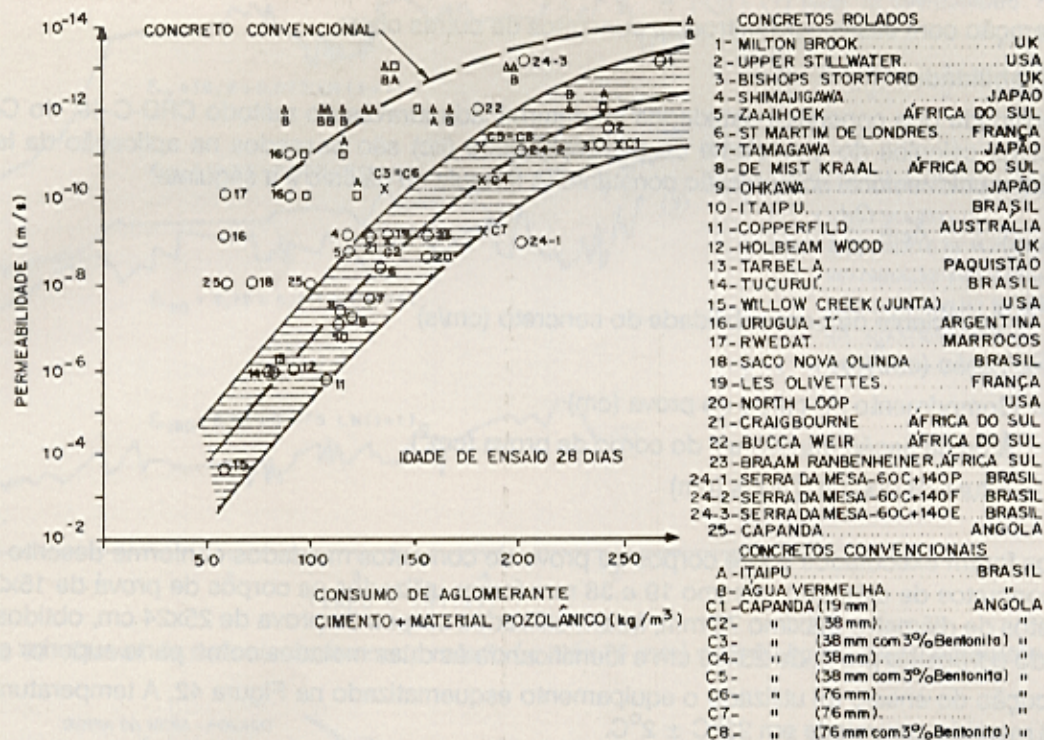


FIGURA 43 - Dados de coeficientes de permeabilidade.

5.10 Elevação Adiabática da Temperatura

O ensaio de elevação adiabática da temperatura permite verificar o desprendimento de calor de um concreto em condições adiabáticas, ou seja, sem que haja troca de calor com o exterior. Para tanto, o corpo de prova do concreto é colocado em um calorímetro adiabático com temperatura constantemente regulada e mantida igual à temperatura que existe no mesmo instante no interior do corpo de prova de concreto.

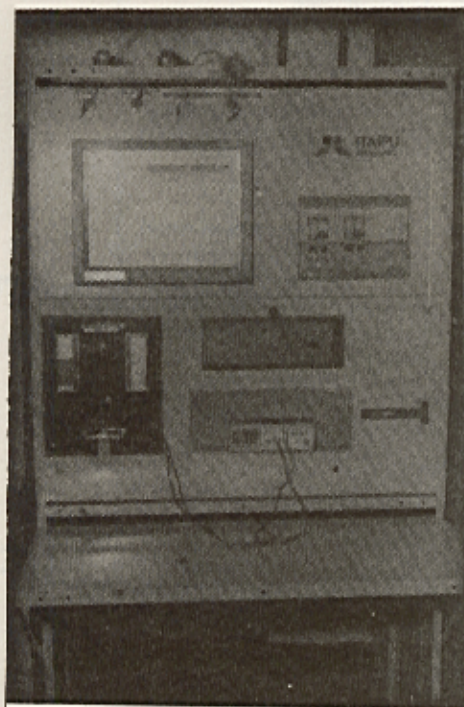


FIGURA 44 - Painel de controle e medição de temperatura do calorímetro adiabático com caixa seletora modelo NSU-22, da Kyowa, multímetro digital modelo 8050 A, da Fluke, e controles manual e automático do sistema de aquecimento/refrigeração.

O calorímetro adiabático do Laboratório de Concreto da Itaipu consiste de duas câmaras, uma externa e outra interna, construídas com paredes de poliestireno expandido e revestidas com chapas galvanizadas. A câmara interna, que é o calorímetro propriamente dito, fica localizada no centro da câmara externa. Essas câmaras estão ligadas tanto a um sistema de refrigeração, como a um sistema de aquecimento, que permitem variar a temperatura no interior das mesmas de 0°C a 70°C. Além das duas câmaras, faz parte do calorímetro adiabático, um painel de controle e medição de temperatura (Figura 44). As temperaturas são ob-

tidas através de termômetros de resistência elétrica com sensores de platina. O molde original para o ensaio de elevação adiabática da temperatura é uma fôrma cilíndrica metálica de 700x700 mm (diâmetro x altura) montada sobre uma plataforma em chapa de aço com rodízio. O isolamento externo da fôrma é feito com camadas de poliestireno expandido de 100 mm de espessura, revestido com chapa galvanizada de 2 mm de espessura. Os valores obtidos para os concretos de Capanda são mostrados na Figura 45.

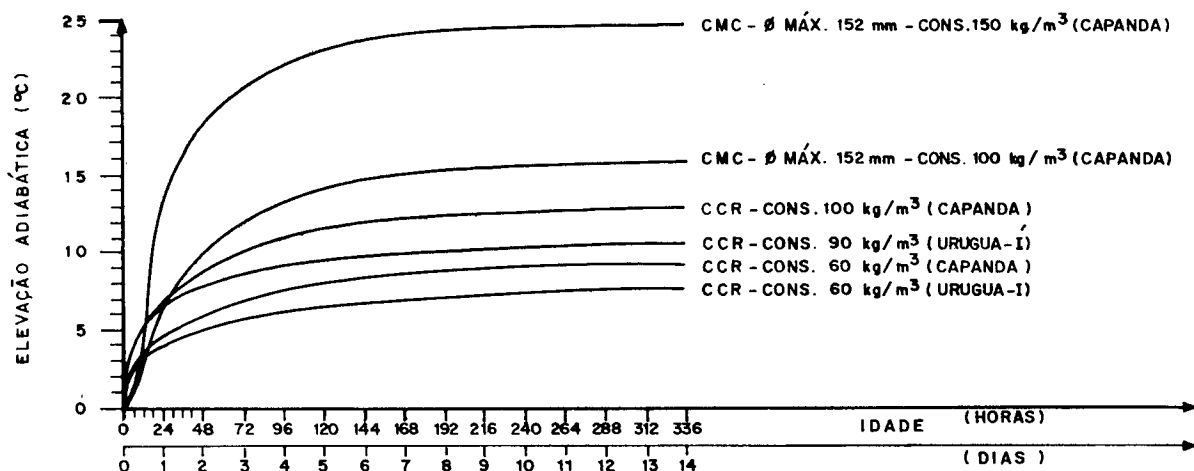


FIGURA 45 - Valores de elevação adiabática de concretos massa convencional (CMC) e compactado a rolo (CCR).

Esses valores de elevação adiabática da temperatura foram transformados em coeficientes de evolução unitária de temperatura (elevação adiabática de temperatura dividida pelo consumo de aglomerado $\rho = ^\circ\text{C}/\text{kg}/\text{m}^3$) e colocados na Figura 46 em comparação com concretos rolados de outras obras.

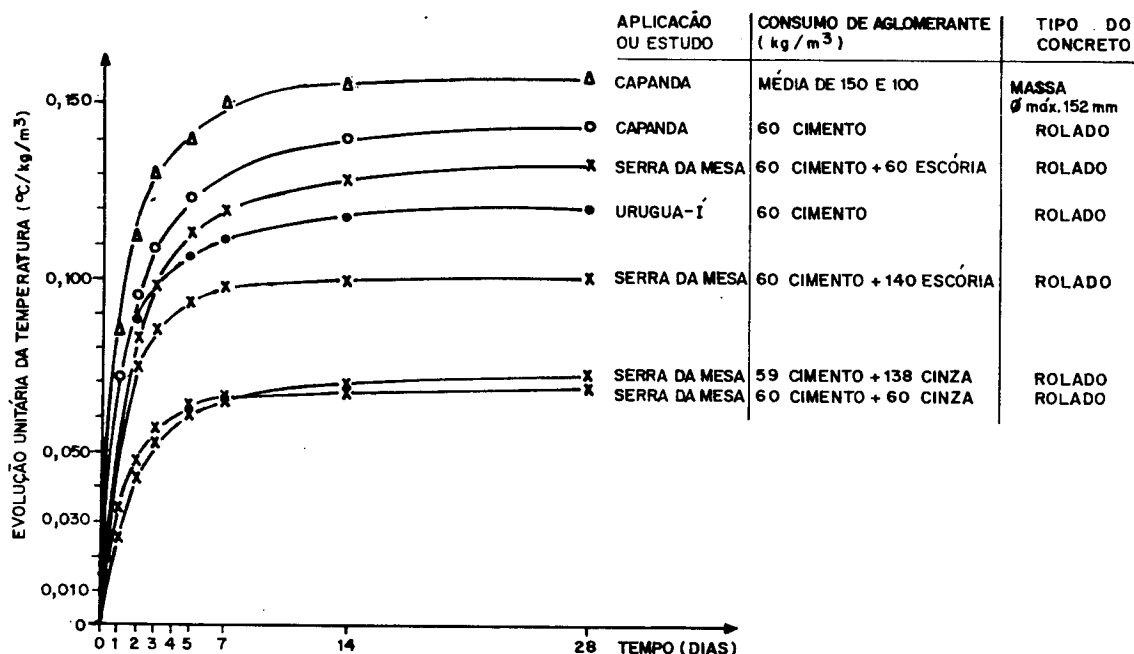


FIGURA 46 - Dados comparativos entre evoluções unitárias de temperatura.

5.11 Propriedades Térmicas.

5.11.1 Difusividade Térmica

Difusividade térmica é a relativa capacidade que um material possui em deixar trocar calor. A medida de difusividade do concreto consiste, essencialmente, em determinar a relação tempo/diferencial de temperatura entre o interior e a superfície de um corpo de prova, inicialmente à mesma temperatura, quando

se varia a temperatura na superfície.

Para medida da temperatura são usados termômetros de resistência elétrica com sensor de platina conectados ao painel de medição. O corpo de prova usado é um espécime cilíndrico de 24x40 cm (diâmetro x altura), com um furo central de 12,5 mm de diâmetro e que se estende até a meia altura do corpo de prova, onde é fixado um tubo de cobre para instalação do termômetro. Os corpos de prova ensaiados foram extraídos dos corpos de prova moldados para os ensaios de elevação adiabática. Essa extração foi feita com uma máquina elétrica para extração de testemunhos, utilizando coroa de borda diamantada de 20 cm de diâmetro, conforme mostra a Figura 47. Depois de extraídos, os corpos de prova foram cortados na altura especificada (40 cm) em uma máquina elétrica para corte de testemunhos utilizando disco de aço com borda diamantada. O furo central, para fixação do tubo de cobre, foi feito também com a máquina extratora, utilizando uma broca de aço com ponta de vídia.

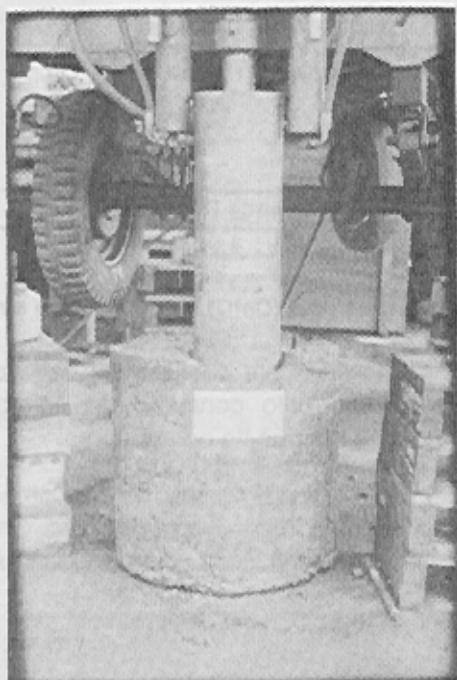
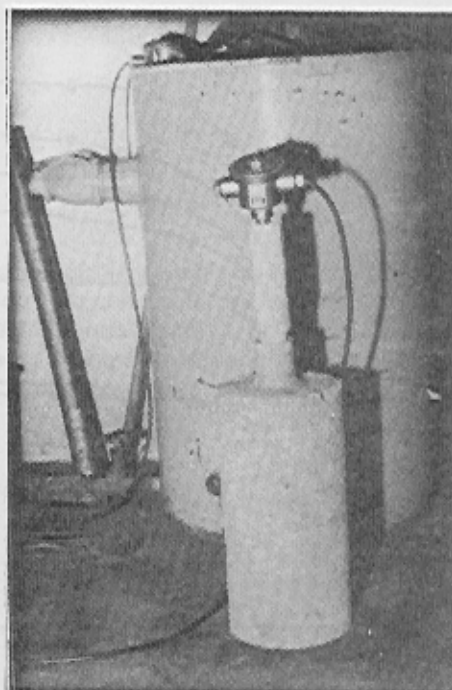


FIGURA 47 - Extração do corpo de prova de concreto rolado para ensaios de difusividade térmica.

FIGURA 48 - Corpo de prova de concreto rolado preparado para ensaio de difusividade térmica.



Para cálculo da difusividade térmica do concreto são empregadas tabelas numéricas calculadas a partir de equações matemáticas de troca de calor. As deduções dessas equações, para corpos de prova com altura igual a duas vezes o diâmetro, estão no livro "Thermal Properties of Concrete" do Bureau of Reclamation. Os

valores de difusividade térmica obtidos com as misturas ensaiadas são mostrados na Figura 49.

VALORES DE COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR DE CONCRETO ROLADO E MASSA CONVENCIONAL								
MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m³)	TIPO DE AGREGADO	COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA (10 ⁻⁶ /°C)	OBSERVAÇÕES			
PM - 60	ROLADO	60	BASALTO	7,41	CONCRETO SATURADO			
PM - 90	ROLADO	90	BASALTO	8,33	CONCRETO SATURADO			
76 - D - 04	MASSA	189	BASALTO	8,00	CONCRETO SATURADO			
76 - F - 03	MASSA	162	BASALTO	7,71	CONCRETO SATURADO			
VALORES DE CALOR ESPECÍFICO DE CONCRETOS ROLADO E MASSA CONVENCIONAL								
PROJETO	MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO DE CIMENTO (kg / m³)	TIPO DE AGREGADO	CALOR ESPECÍFICO			
					(cal / g°C)	CV (%)		
URUGUA-I	PM-60	ROLADO	60	BASALTO	0,238	1,4		
	PM-90	ROLADO	90	BASALTO	0,233	1,6		
ITAIPU	76-H-04	MASSA	140	BASALTO	0,243	1,7		
	76-F-03	MASSA	162	BASALTO	0,252	2,0		
CAPANDA	152-150-B	MASSA	150	ARENITO	0,221	0,8		
	152-100-A	MASSA	100	ARENITO	0,228	0,9		
	RC-60	ROLADO	60	ARENITO	0,230	3,1		
VALORES DE CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICA								
PROJETO	MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO DE CIMEN-TO (kg / m³)	TIPO DE AGREGADO	CONDUTIVIDADE TÉRMICA		DIFUSIVIDADE TÉRMICA	
					10 ⁻³ (cal/cms²°C)	CV (%)	10 ⁻³ (m²/dia)	CV (%)
URUGUA-I	PM-60	ROLADO	60	BASALTO	4,76	-	0,066	9,3
	PM-90	ROLADO	90	BASALTO	4,22	-	0,060	6,8
ITAIPU	76-H-04	MASSA	140	BASALTO	4,41	1,2	0,062	1,8
	76-F-03	MASSA	162	BASALTO	4,60	0,4	0,063	1,4
CAPANDA	152-150-B	MASSA	150	ARENITO	6,0	-	0,093	8,1
	152-100-A	MASSA	100	ARENITO	7,0	-	0,111	10,0
	RC-60	ROLADO	60	ARENITO	7,4	-	0,116	1,2

FIGURA 49 - Propriedades térmicas de concretos rolado e convencional.

5.11.2 Calor Específico

Calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar de um grau a temperatura da massa unitária do material. A determinação do calor específico do concreto consiste, essencialmente, em medir a quantidade de calor absorvida por um corpo de prova de concreto de massa conhecida, e termicamente isolado, ao qual é fornecido uma certa quantidade de calor.

O calorímetro utilizado no ensaio consiste, basicamente, de um tanque externo e um recipiente cilíndrico de cobre, interno, dentro do qual é colocado o corpo de prova. Entre ambos é usado um material isolante. Fazem parte ainda do aparelho: um agitador acoplado a um motor elétrico, um aquecedor de imersão e um termômetro de resistência elétrica, com sensor de platina. O fornecimento de energia e a medida dessa energia são feitos através de equipamentos (timer e wattímetro) do painel de medição e controle mostrado, juntamente com o calorímetro, na Figura 50. As medidas de temperatura são feitas através do painel de medição mostrado na Figura 50, ao qual o termômetro é conectado. Os valores obtidos são vistos na Figura 49.

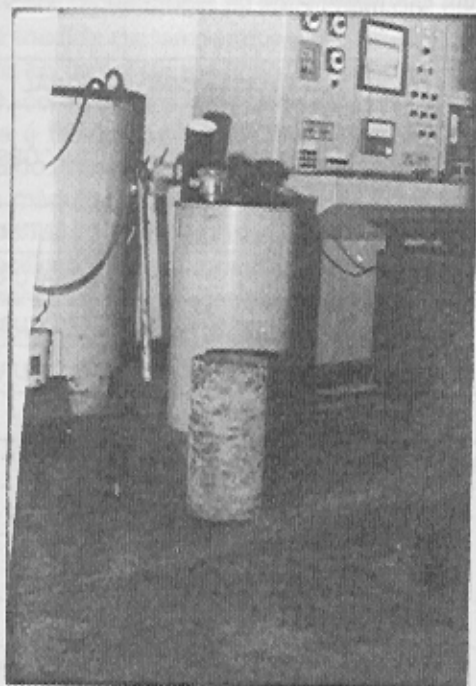


FIGURA 50 - Calorímetro, painel de medição e fornecimento de energia e corpo de prova para ensaio.

5.11.3 Coeficiente Linear de Expansão Térmica

O coeficiente linear de expansão térmica é definido como sendo a variação de um comprimento unitário, causada pela variação unitária da temperatura. O ensaio para determinação dessa característica do concreto consiste em medir a variação de comprimento, causada pela variação de temperatura, de um corpo de concreto. Para se obter a variação de temperatura são utilizadas duas câmaras térmicas, com temperaturas controladas na faixa de 4°C e 38°C, respectivamente.

Os resultados obtidos também são vistos na Figura 49.

5.11.4 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a propriedade que mede a habilidade do material conduzir calor, sendo definida como a razão de fluxo de calor para um gradiente de temperatura. A condutividade foi obtida através da equação $K = h^2 \cdot \gamma \cdot C$, sendo:

h^2 = Difusividade térmica (cm²/s)

γ = Peso específico (g/cm³)

C = Calor específico (cal/g.°C)

6. COMENTÁRIOS

Os baixos valores de absorção e de desgaste por abrasão, bem como a elevada massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, e o bom comportamento nos ensaios de sanidade mostram que o meta-arenito disponível no sítio da obra é apto para uso como agregado.

Os resultados dos ensaios de reatividade com os álcalis dos cimentos não evidenciaram preocupações quanto às expansões.

Os ensaios demonstraram a validade do emprego do "pó de pedra" com finos, visto as vantagens de aumento na resistência e inibição da reação álcalis-silica.

As propriedades mecânicas - resistência à compressão axial, compressão diametral, coesão e cisalhamento - mostram parâmetros de magnitude semelhantes para os concretos rolado e convencional de Capanda. As comparações com valores obtidos para outras obras confirmam também essa semelhança.

O módulo de (elasticidade) deformação do concreto rolado tem se apresentado pouco inferior ao dos concretos convencionais.

Como evidenciado na Figura 41, o concreto rolado apresenta parâmetros de fluência (1/E e f(K)) mais elevados que os dos concretos convencionais. Isso se explica pelo baixo valor do módulo de deformação e pelo baixo teor de argamassa.

A capacidade de alongamento sob carregamento rápido, para concretos rolado de baixo consumo, mostrou valores consistentes e similares aos dos concretos convencionais, como evidenciado na Figura 34.

Tendo em vista os parâmetros de fluência, e os dos ensaios rápidos, e considerando o exposto por Houghton, Carlson e Polivka (8) (9) (10), é de se prever que a capacidade de alongamento sob ensaio lento seja superior aos equivalentes (mesmo consumo de aglomerante) de concreto massa convencionais. Isso constitui reserva adicional quanto a resistência e absorção das solicitações térmicas.

Os valores de elevação adiabática de temperatura estão coerentes com o consumo (e tipo) de aglomerante adotado.

Chama-se atenção pelo fato de que é importante considerar, para concretos tipo massa - rolado ou convencional - o binômio = propriedades mecânicas e elevação adiabática = atingido por concretos de determinado consumo de aglomerantes.

A dispersão maior observada pelos conjuntos de valores obtidos nos ensaios de difusividade sobre concretos rolado, em comparação àquela observada para os concretos convencionais, deve ser decorrente da maior permeabilidade encontrada para o concreto rolado. Os valores médios mostram semelhança com aqueles de concretos convencionais.

Os valores observados para o calor específico, semelhantes aos dos concretos convencionais, não mostram pontos que façam jus a um comentário suplementar.

Notou-se semelhança entre os valores obtidos para o coeficiente linear de expansão térmica do concreto rolado e concretos convencionais, confeccionados com materiais de mesmas características.

A permeabilidade do concreto rolado de baixo consumo é superior à dos concretos rolados de consumo mais elevados e dos concretos convencionais. Deve ser salientado, entretanto, que o uso de "finos" de pó de pedra, subproduto da britagem, empregado no concreto rolado, mostrou valores melhores (menor coeficiente de permeabilidade) que os obtidos para concretos rolado de outras obras de consumo equivalentes.

Salienta-se dessa forma, mais uma vez [11], que o concreto rolado assemelha-se a um concreto convencional produzido com o mesmo tipo de material (agregados) e mesmo nível de consumo de aglomerante.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado com apoio da Construtora Norberto Odebrecht S/A, representada pela equipe de Engenharia de Capanda:

- Eng^o Marcus Tulio Schmitt - Responsável pela Divisão
- Eng^o Fernando Resende - Controle de Qualidade
- Eng^o Jin Tien Quin - Projetos

Os autores e colaboradores agradecem ao Gamek - Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza - pela publicação das informações contidas neste informe.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Braga, J.A. - Lacerda, S.S. - Duarte, J.D.C. - Rosário, L.C. - "Utilização de finos - Sub-produto de Britagem nos Concretos Rolado e Convencional" - XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens - Foz do Iguaçu - 1989.
- [2] Relatório - C-11/87 - "Ensaio de Materiais para o Projeto Capanda" - Itaipu Binacional.
- [3] Relatório - C-09/89 - Estudos de Aditivos para Concreto - Projeto Capanda (Angola) - Itaipu Binacional.
- [4] Braga, J.A. - Rosário, L.C. - Fernandes, F.N. - Schmidt, M.T. - Andriolo, F.R. - "Desenvolvimento de Mantas de P.V.C. - Opção Técnica e Econômica para Impermeabilidade" - XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens - Aracaju - 1991.
- [5] Andriolo, F.R. - "Contribuições para o Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado" - 1989.
- [6] Relatório C-08/89 - "Estudos de Concreto Estrutural e Massa para o Projeto Capanda" - Itaipu Binacional.
- [7] Relatório C-10/89 - "Estudos de Concreto Compactado a Rolo para o Projeto Capanda (Angola)" - Itaipu Binacional.
- [8] Houghton, Donald L. - "Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete" - A.C.I. - Journal - 75/58 December - 1976.
- [9] Houghton, Donald L. - Concrete Strain Capacity Tests: Their Economic Implications" - Proceeding Engineering Foundation - Research Conference on Economic Construction of Concrete Dams - Asilomar Conference Grounds - Califórnia - May/1974.
- [10] Carlson, Roy; Houghton, Donald; Polivka, Milos "Causes And Control of Cracking in Reinforced Mass Concrete" ACI - Journal - July/1979.
- [11] Zanella, M.R. - Braga, J.A. - Rosário, L.C. - Ayala, A.G.C. - Golik, M. - Andriolo, F.R. - "Concreto Rolado - Ensaio Especiais" - XVIII - Seminário Nacional de Grandes Barragens - Abril - 1990 - Foz do Iguaçu - PR.