

Estudo de Envoltória de Resistência entre Camadas de CCR

J. Marques Filho, UFPR/COPEL ; M. A. Traboulsi, FURNAS; V. A. Paulon, UNICAMP e D. C. C. Dal Molin, UFRGS

Resumo—O Concreto Compactado com Rolo - CCR é uma técnica construtiva que utiliza intensivamente equipamentos usualmente empregados em obras de aterro/enrocamento para colocação e compactação do concreto, gerando um processo industrial e eficiente com baixa incidência de mão-de-obra por volume. Sua utilização em barragens é uma evolução natural do emprego do concreto convencional, porém suas características de consistência muito seca aliada a um número de juntas horizontais de construção muito maior que nas barragens de concreto geraram dúvidas quanto à caracterização dos parâmetros da envoltória de resistência entre camadas de concretagem e quanto à representatividade dos métodos convencionais para previsão de parâmetros e dosagens. O presente trabalho apresenta a metodologia para análise dos parâmetros da envoltória de resistência, utilizando ensaios em pistas experimentais executadas em laboratório, e simulando várias condições de campo. Para avaliação do processo foram usados os materiais utilizados na construção e os resultados do controle de qualidade da UHE Dona Francisca, localizada no Rio Grande do Sul. Os ensaios realizados no Laboratório de CCR do Laboratório de FURNAS em Goiânia mostram que é possível a obtenção de correlações confiáveis antes do início dos trabalhos de campo.

Palavras-chave—CCR – Maciços Experimentais - Cisalhamento-Aderência-

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho procura mostrar a metodologia para caracterização da envoltória de resistência em laboratório de concreto compactado com rolo, doravante denominado CCR, focando basicamente seu emprego em obras de aproveitamentos hidráulicos. Entende-se por envoltória de resistência a curva que engloba a capacidade do material resistir às solicitações tangenciais, sob diferentes tensões normais na seção, considerando a ruptura por deslizamento sob um estado múltiplo de tensões. Considera-se que o concreto possa ser adequadamente caracterizado através de envoltórias de Mo-

hr-Coulomb, linear e definida através da coesão, valor de tensão tangencial sob esforço normal nulo; e do ângulo de atrito, correspondente ao coeficiente angular da reta que caracteriza a envoltória.

O CCR é uma técnica construtiva, com peculiaridade de uso extensivo de equipamentos tipicamente empregados em obras de terra/enrocamento, utilizando um material conhecido que é o concreto, procurando obter um máximo desempenho no quesito velocidade de lançamento, aliado a custos e teores de cimento relativamente baixos.

Em barragens convencionais, as juntas horizontais sempre representaram grande preocupação dos engenheiros, tanto pela possibilidade de criação de caminho preferencial de percolação, como pelas atividades executivas que garantissem uma adequada ligação entre as camadas de lançamento, e, conseqüentemente, a envoltória de resistência necessária às solicitações estruturais. Enquanto barragens utilizando concreto massa tinham camadas cuja espessura variava em geral entre 1,5 m e 2,5 m, o método construtivo utilizando o CCR impunha valores entre 0,25 e 0,50 m, aumentando consideravelmente a quantidade de juntas horizontais ao longo de toda a barragem [1]. Além deste fato, a consistência extremamente seca necessária à compactação, associada à imagem de fragilidade e fraqueza na ligação entre camadas, também gerou expectativas e insegurança entre projetistas e construtores que obstruíram inicialmente a aplicação em grande escala de soluções utilizando o CCR.

Desde o início do desenvolvimento do CCR, várias dúvidas conceituais foram levantadas, geradas principalmente pela grande quantidade de juntas horizontais [2] [3].

- Que parâmetros de resistência o material apresenta?
- Envoltória de resistência entre camadas.
- A grande quantidade de juntas subhorizontais de construção somadas a utilização de concreto extremamente seco criou dúvida quanto aos parâmetros de resistência nas interfaces horizontais e se as mesmas constituem um caminho preferencial de percolação.
- Influência das condições ambientais locais.
- A utilização de teores de água relativamente baixos, aliados a grande dependência que os mesmos têm do grau de compactação, exige um controle rigoroso da água em todo o ciclo produtivo. As condições de trabalhabilidade variam durante os períodos do dia ou sazonalmente.
- Como o grau de compactação influi diretamente nas propriedades mecânicas do concreto, o con-

Os autores agradecem ao apoio de FURNAS Centrais Elétricas S.A. e à ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica que patrocinam este projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, bem como à COPEL – Companhia Paranaense de Energia e à Universidade Federal do Paraná pelo apoio em viagens e custeio necessários ao desenvolvimento dos trabalhos.

J. Marques Filho trabalha na COPEL – Companhia Paranaense de Energia e é professor da UFPR - Universidade Federal do Paraná (e-mail: jmarques@copel.com)

M.A. Traboulsi trabalha no Laboratório de Concreto de Furnas - Centrais Elétricas S.A. (e-mail: maurice@furnas.br).

V.A. Paulon é professor da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas (email: paulon@fec.unicamp.br)

D. C. C. Dal Molin é professora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (email: dalmolin@cpgec.ufrgs.br)

trole no campo adequado é importante para evitar não conformidades ou retrabalhos

- g) As juntas podem gerar caminhos preferenciais de percolação, devendo ser analisado o controle de permeabilidade da estrutura.
- h) Qual a compatibilidade de deformação entre os diferentes materiais?
- i) Como evitar que as obras obrigatórias, como galerias, drenagem, vedajuntas interfiram na automação e velocidade do processo?

II. MACIÇOS EXPERIMENTAIS

A consistência seca e o processo construtivo com adensamento mecânico através de rolo compactador indicam a dificuldade de adaptabilidade dos ensaios convencionais à realidade do campo. Além destas dificuldades naturais, existe uma grande variabilidade de equipamentos disponíveis no mercado, com eficiência própria que exige misturas diferentes para garantir os parâmetros necessários ao projeto e à obra.

A necessidade de adaptação aos materiais disponíveis no local da obra faz com que cada empreendimento específico seja único, e as influências do clima local e suas variações ao longo do tempo têm influência significativa nas dosagens, controle de qualidade e acertos de centrais na obra. Todos os fatores mencionados devem ser ponderados durante o processo de escolha da solução a ser adotada para empreendimentos hidráulicos e os estudos de dosagem devem procurar levá-los em conta, prevendo os parâmetros necessários a trabalhabilidade, segurança, durabilidade e ao correto desempenho da estrutura durante sua vida útil.

Nas obras de terra as condições de compactação sempre foram modeladas por ensaios correlacionando a compactação, e conseqüente densidade, com o grau de umidade do material. As obras de enrocamento seguem ensaios similares para definição granulométrica e balizam os mesmos através de aterros experimentais no campo. Estes últimos procuravam obter o grau adequado de compactação com os diversos equipamentos utilizados, determinando, também, a espessura de camada adequada ao local e aos seus materiais disponíveis. Nestes casos, a densidade passa a ser o parâmetro mais importante de decisão, correlacionando-se as demais propriedades desejadas com o mesmo.

Apesar das diferenças conceituais importantes no dimensionamento de peças compostas por materiais soltos daquelas construídas em concreto, a idéia de execução de aterros ou maciços experimentais pode ser perfeitamente estendida às últimas. A execução do maciço experimental permite uma avaliação do comportamento das propriedades do concreto com as condições e equipamentos locais, constituindo-se de ferramenta de decisão importante em obras de CCR, pavimentando o caminho para a determinação prévia dos parâmetros físicos procurados.

A execução de maciços experimentais no campo é de fundamental importância para verificação da adaptabilidade dos processos previstos na dosagem e nos estudos de laboratório. Neste tipo de ensaio, são testados as condições e proce-

dimentos executivos reais, utilizando os equipamentos, materiais, centrais de produção e mão-de-obra que efetivamente desenvolverão o empreendimento. Para serem efetivos, os maciços experimentais devem ser executados preferencialmente após as centrais de britagem e de concreto estarem aferidas, e devem permitir que ensaios do concreto resultante possam ser executados para comparar com os obtidos com os de corpos de prova moldados. Como o CCR pode apresentar pequenas resistências nas primeiras idades, a obtenção de testemunhos só é possível em idades avançadas, o que pressiona o cronograma de execução da obra.

A execução de maciços experimentais na obra, em época muito posterior aos estudos de dosagem, gera insegurança inicial sobre o processo e dificulta o processo de otimização de dosagens e a confiança no dimensionamento das peças. Uma alternativa para o processo seria a execução de maciços experimentais em laboratório com a finalidade de simular as condições de execução no campo, técnica inicialmente tentada no Japão, com a criação de simulador de compactação, hoje desativado. Para suprir a necessidade de simulação experimental, o Laboratório de Concreto de FURNAS, em Goiânia, inaugurou laboratório para execução de corpos de prova compactados, com possibilidade de variação da frequência e energia de vibração do rolo, e velocidade de percurso [4][5][6].

A. Descrição do Equipamento

O equipamento para ensaios de compactação em laboratório consiste de um sistema de trilhos onde o rolo de compactação se move. Como mostrado nas Figuras 1 e 2, vistas gerais do equipamento, na linha central sob o eixo dos trilhos está construído um poço onde é fixado molde metálico para a compactação do concreto. Este molde fornece a necessária contenção para garantir a eficiência da compactação, bem como permite o manuseio do corpo de prova via ponte rolante, ver Figura 3, cujas dimensões máximas estão descritas na Figura 4 a seguir.

O equipamento, totalmente informatizado, permite a aplicação de várias configurações de carregamentos tanto estáticos quanto dinâmicos, simulando os vários equipamentos disponíveis no mercado. Durante o processo, monitora a compactação da camada e permite a visualização em tempo real das condições de execução do maciço. A Figura 5 mostra o processo de compactação em laboratório.

Além das simulações de aplicação de carregamentos, os maciços experimentais permitem simular facilmente várias condições de campo, tais como tipos de tratamento de camada, temperatura de exposição, intervalos de lançamento; bem como permitem um manuseio simples e várias possibilidades de obtenção de testemunhos, que seriam impossíveis no protótipo.

As vantagens de utilização deste tipo de simulação podem ser elencadas:

- Verificação do grau de compactação potencial das misturas.
- Avaliação da capacidade de compactação com equipamentos convencionais.

- Avaliação de vários tipos de mistura, podendo ser variada a granulometria, teor de material cimentícios e finos, utilização de aditivos entre outros.



Figura 1. Vista lateral superior do equipamento



Figura 2. Vista Frontal do Equipamento



Figura 3. Maciço Experimental sendo transportado para a Câmara Úmida

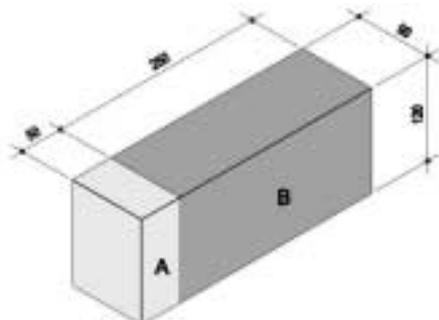


Figura 4. Tamanho Máximo do Maciço Experimental



Figura 5. Vista do equipamento de compactação em funcionamento

- Simulação da execução das faces impermeáveis, ou do acabamento das faces.
- Simulação das condições de ligação entre camadas, podendo se variar tempo entre camadas sucessivas, bem como simular condições ambientais diversas.
- Avaliação do potencial de resistência, de envoltórias de resistência entre camadas e de outros parâmetros físicos de interesse.

B. Ensaios

Para que sejam validados os resultados de pesquisa e o dimensionamento do traço e sua otimização utilizando maciços experimentais em laboratório, é imperioso que se confirme que a simulação possa reproduzir resultados conhecidos do campo. Para tal, são comparados os resultados obtidos durante os controle de qualidade da obra da UHE Dona Francisca com àqueles obtidos durante a execução dos maciços experimentais.

Ensaios sobre o maciço podem ser realizados facilmente através da obtenção de testemunhos, que após usinagem podem ser ensaiados. A obtenção de testemunhos via sondagem rotativa é mais simples que em condições de campo, conforme exibido na Figura 6, podendo ser executados, também, a obtenção de corpos de prova prismático, utilizando serra de fita, vide Figuras 7 e 8.

Sobre os corpos de prova obtidos dos testemunhos podem ser realizados vários ensaios de caracterização, seguindo a Normalização vigente, tais como permeabilidade, resistência à compressão, massa específica, absorção, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, resistência à tração direta, resistência à tração por compressão diametral e ensaios de cisalhamento direto. Para efeito deste documento, estes últimos ensaios foram realizados utilizando prensa triaxial servo-controlada, com controle e aquisição digital de dados, mostrada na Figura 9. Para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb são realizados três ensaios de cisalhamento direto usando para as tensões de confinamento de 900 kPa, 1800 kPa e 2700 kPa.



Figura 6. Extração de testemunhos

Apesar das pistas experimentais criarem condições que permitam várias simulações das condições de campo, é claro que não é possível a modelagem real dos diversos equipamentos, nem de sua variabilidade e mudanças causadas pelo uso durante a vida útil. Mesmo assim, as pistas experimentais em laboratório criam condições para a obtenção do grau de compactação adequado da mistura e de dados precisos sobre as propriedades mecânicas potenciais do material.

A execução de pistas em laboratório não exclui a necessidade de maciços experimentais no campo, com as condições exatas de início de obra, ou muito próximo destas.

A previsão de valores dos parâmetros a controlar e a verificação da satisfação das propriedades especificadas no campo fazem parte dos processos construtivos envolvendo concreto. Pela grande responsabilidade das barragens de concreto, as análises de segurança devem ser precisas e a garantia de qualidade do processo é fundamental.



Figura 7 Corte dos testemunhos prismáticos com serra de fita



Figura 8 Testemunhos Prismáticos e cilíndricos



Figura 9 Equipamento servo controlado para Ensaio de Cisalhamento Direto

III. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A envoltória de resistência na seção entre camadas horizontais de concretagem depende de fatores internos, tais como processos executivos, processos de obtenção dos corpos de prova e dosagem, e de fatores externos que são função basicamente do meio ambiente. Para manter o experimento consistente são utilizados os mesmos materiais e dosagem efetivamente aplicados na construção da UHE Dona Francisca, mantendo a altura de camada em 0,30 m, o Canon Time no valor 25 ± 5 s, a utilização de aditivo plastificante, o consumo de cimento em 90 kg/m^3 e o grau de compactação mínimo de 98%.

Para determinação da matriz experimental foram consideradas fatores controláveis: o tratamento da superfície antes da colocação da próxima camada, o intervalo de tempo entre lançamentos sucessivos, a utilização de argamassa de ligação e a temperatura ambiente. Como variável controlada, temos a umidade do ar que sempre será tomada igual a 100%. A pesquisa inicial contempla um projeto fatorial completo, e a Tabela I mostra os fatores controláveis e os intervalos de pesquisa assumidos. Nesta definição, devido ao novo processo de lançamento de CCR rampado que minimiza o intervalo de lançamento entre camadas, adotou-se valores que possam indicar o intervalo limítrofe para que com segurança permita a dispensa da argamassa de ligação

TABELA I
FATORES CONTROLÁVEIS

Fatores Controláveis	Valores Pesquisados
Tratamento da Superfície	Limpeza com ar comprimido Jato de Alta Pressão
Uso de Argamassa de Ligação	Com; Sem
Intervalo de Lançamento	
Sem argamassa	0h, 4h, 8h e 12h
Com argamassa	8h, 12h, 24h e 48h
Temperatura Ambiente	25°C e 45°C

A pesquisa foi executada em 10 maciços experimentais com quatro camadas de lançamento, sendo a primeira com espessura de 0,20 m e as demais com 0,30 m, cujas superfícies foram tratadas com a combinação dos diversos tratamentos Tabela I.

De modo a avaliar os possíveis ruídos do processo gerados pelo processo de obtenção de testemunhos, são propostas duas pesquisas complementares.

A primeira pesquisa complementar considera a execução de pista com quatro camadas com todas as juntas com 4h de intervalo de lançamento, sem utilização de argamassa, tratamento de superfície apenas com limpeza com ar comprimido e temperatura ambiente de 25°C. Nesta pesquisa os testemunhos são obtidos por sondagem rotativa nos dois sentidos perpendiculares às camadas de concretagem, de modo a avaliar a influência da posição relativa dos corpos de prova ao longo da altura de perfuração.

A extração de testemunhos é por si só um processo traumático, podendo gerar um pré-fissuramento dos testemunhos, que aliado ao processo de usinagem para obtenção dos corpos de prova tendem a gerar dispersão de resultados. Para tentar avaliar este efeito, são propostas 6 pistas experimentais com duas camadas de concretagem, de modo a permitir a obtenção de testemunhos prismáticos através de serra com fio diamantado, para três condições de tratamento da superfície, com 4h e 8h de intervalo de lançamento sem argamassa de ligação e 24h com utilização de argamassa de ligação, todos os casos sob temperatura ambiente de 25°C.

IV.RESULTADOS OBTIDOS

C. Programa Experimental Aderência entre Camadas

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos testemunhos são apresentados na Tabela II a seguir.

TABELA II - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS TESTEMUNHOS

Grandeza		Idade de Controle		
		120 dias	180 dias	365 dias
Resistência à Compressão	Média (Mpa)	6,65	7,73	8,78
	Desvio Padrão (Mpa)	1,31	1,26	2,05
	Coef. Variação (%)	20%	16%	23%
	núm. ensaios	44	45	14
Massa Específica	Média (kg/m ³)	2517	2519	2513
	Desvio Padrão (kg/m ³)	17	40	43
	Coef. Variação (%)	1%	2%	2%
	núm. ensaios	46	37	20
Resistência à Tração por Compr.Diametral	Média (Mpa)	1,23	1,07	1,00
	Desvio Padrão (Mpa)	0,31	0,3	0,29
	Coef. Variação (%)	25%	28%	29%
	núm. ensaios	11	12	3
Resistência à Tração Direta	Média (Mpa)	0,74	0,6	0,48
	Desvio Padrão (Mpa)	0,26	0,2	0,25
	Coef. Variação (%)	35%	34%	53%
	núm. ensaios	15	17	8
Módulo de Elasticidade	Média (Mpa)	12,13	13,00	12,15
	Desvio Padrão (Mpa)	3,6	4,59	4,9
	Coef. Variação (%)	30%	35%	40%
	núm. ensaios	40	37	14
Permeabilidade	Média (m/s)	2,23E-10		
	Desvio Padrão (m/s)	1,85E-10		
	Coef. Variação (%)	86%		
	núm. ensaios	99		

Os resultados dos ensaios de cisalhamento estão apresentados nas Figuras 9 a 12, todos para idade de 120 dias após o término da concretagem, onde estão apresentadas as envoltórias de Mohr-Coulomb para cada caso, obtidas através de regressões lineares dos dados. As figuras iniciais apresentam os resultados para uma mesma idade e tratamento de camada e para uma mesma temperatura ambiente, permitindo analisar a variação do comportamento com o intervalo de lançamento.

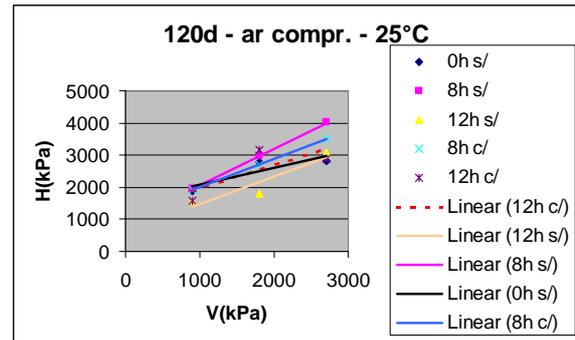


Figura 9. Envoltórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Ar Comprimido e Temperatura de 25°C

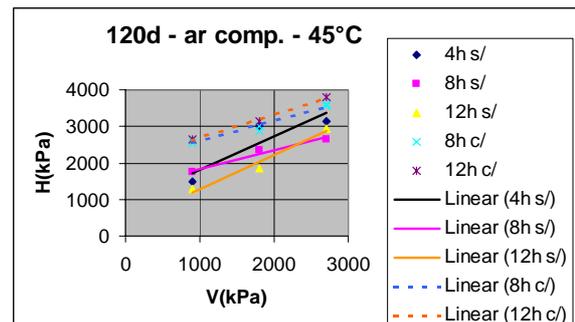


Figura 10. Envoltórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Ar Comprimido e Temperatura de 45°C

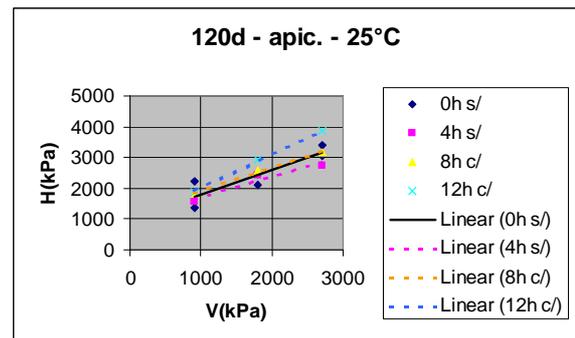


Figura 11. Envoltórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Jato de Alta Pressão e Temperatura de 25°C

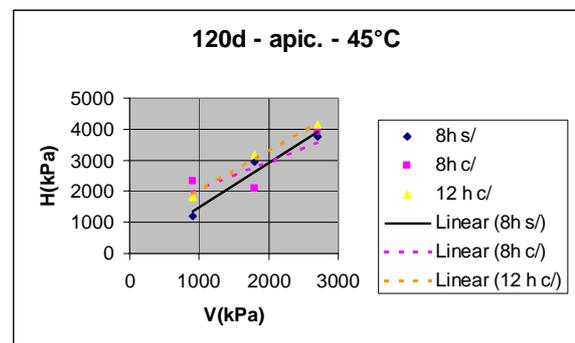


Figura 12. Envoltórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Jato de Alta Pressão e Temperatura de 45°C

Para intervalos de lançamento entre camadas superior a 12h, foi considerada a presença de argamassa de ligação. As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados para simulações ao 120 dias, para cada tratamento, com temperatura de 25°C para as diversas idades sempre considerando a utilização de argamassa de ligação entre camadas.

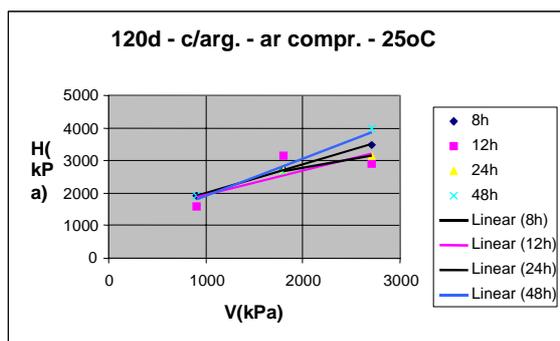


Figura 13. Envolvórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Ar Comprimido e Temperatura de 25°C, utilizando Argamassa de Ligação

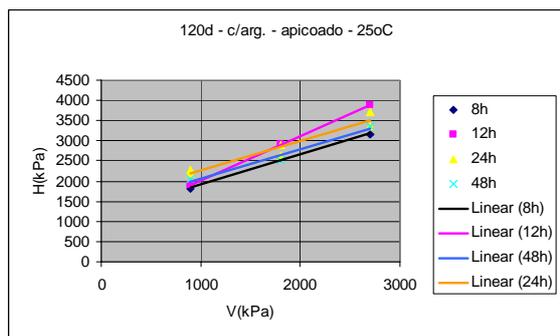


Figura 14. Envolvórias de Resistência aos 120 dias para Limpeza com Jato de Alta Pressão e Temperatura de 25°C, utilizando Argamassa de Ligação

D. Análise da Posição Relativa na Camada – Primeira Pesquisa Complementar

Com o intuito de verificar a influência do posicionamento relativo das camadas nos resultados do ensaio, foram realizados ensaios com metade dos testemunhos obtidos posicionando a sonda sobre o topo (a partir de agora denominado de sentido 1), e a outra metade girando o maciço experimental em 180° com relação ao seu eixo longitudinal e apoiando a sonda rotativa sobre o fundo (a partir de agora denominado sentido 2). As tabelas III e IV mostram a caracterização física dos testemunhos.

TABELA III
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS TESTEMUNHOS
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POR CAMADA

	Resistência à Compressão (Mpa)	Massa Específica (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (Mpa)
SENTIDO 1			
II	Média	8,2	2550,8
	Desvio Padrão	0,31	11,00
	Coef. Variação	4%	0%
III	Média	8,8	2544,5
	Desvio Padrão	0,32	15,60
	Coef. Variação	4%	1%
IV	Média	9,2	2550,5
	Desvio Padrão	0,45	18,34
	Coef. Variação	5%	1%
SENTIDO 2			
II	Média	8,5	2550,3
	Desvio Padrão	0,63	7,26
	Coef. Variação	7%	0%
III	Média	8,8	2546,4
	Desvio Padrão	0,29	8,62
	Coef. Variação	3%	0%
IV	Média	8,9	2542,0
	Desvio Padrão	0,31	11,35
	Coef. Variação	3%	0%

TABELA IV
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS TESTEMUNHOS
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA

Resistência à Tração Direta (MPa)			
SENTIDO 1		SENTIDO 2	
I/II	Média	0,5	0,5
	Desvio Padrão	0,09	0,06
	Coef. Variação	17%	13%
II/III	Média	0,4	0,5
	Desvio Padrão	0,15	0,07
	Coef. Variação	39%	13%
III/IV	Média	0,6	0,5
	Desvio Padrão	0,04	0,12
	Coef. Variação	7%	23%

Os resultados ensaios de cisalhamento direto estão apresentados via suas envoltórias de Mohr-Coulomb na Figura 15, cujas retas foram obtidos via regressão linear simples.

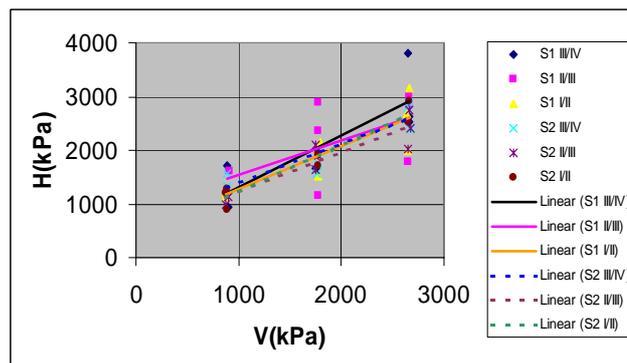


Figura 15. Envolvórias de Resistência da Primeira Pesquisa Complementar

E. Testemunhos Prismáticos

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto com suas respectivas envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb obtidas a partir de regressões lineares simples estão apresentados na Figura 16.

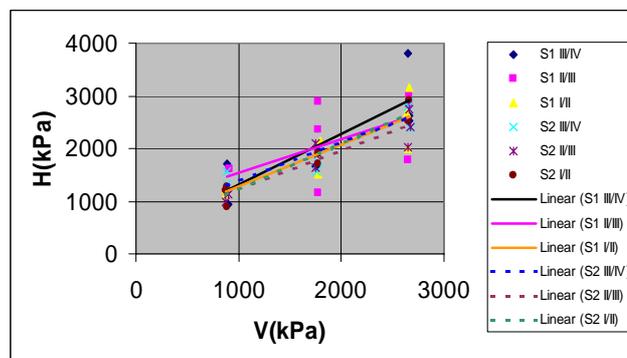


Figura 16. Envolvória de Resistência – Testemunhos Prismáticos

F. Comparação de Resultados

Com os dados resumidos nos itens anteriores, podemos efetuar comparações de modo a verificar as possíveis correlações existentes. Para validar o processo, torna-se importante comparar os resultados obtidos no controle de qualidade da obra[7][8], com aqueles obtidos durante a moldagem dos vários maciços experimentais. A Tabela V apresenta um resumo com os resultados de resistência à compressão obtidos dos corpos de prova moldados durante a execução do projeto experimental e durante a execução da obra para o mesmo traço. Neste figura, denomina-se como Testemunho-Pistas os resultados dos ensaios nos testemunhos do progra-

ma experimental, Testemunhos-Pista 14 aos resultados obtidos na análise do efeito da posição relativa na camada.

TABELA V
COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à Compressão (mPa)		PROGRAMA EXPERIMENTAL			OBRA
		CQ	Testemunhos Pistas	Testemunhos Pista 14	CQ Obra
7	Média	2,33			2,5
	Desvio Padrão	0,24			0,29
	Coef. Variação	10%			11%
28	Média	4,53			4,8
	Desvio Padrão	0,76			0,40
	Coef. Variação	17%			8%
90	Média	8,15			8,6
	Desvio Padrão	0,66			1,02
	Coef. Variação	8%			12%
120	Média	9,9	6,65		
	Desvio Padrão	2,08	1,31		
	Coef. Variação	21%	20		
180	Média	10,38	7,73	8,7	11,2
	Desvio Padrão	1,23	1,26	0,5	1,29
	Coef. Variação	12%	16%	6%	12%
365	Média		8,78		
	Desvio Padrão		2,05		
	Coef. Variação		23%		

Os resultados mostram-se compatíveis tanto no valor absoluto da resistência quanto nos desvios padrão dos diversos processos. A Tabela V mostra claramente uma perda de resistência nos testemunhos, gerada pelo traumatismo do processo de sua obtenção, de aproximadamente 30%.

A Tabela VI apresenta os resultados obtidos nos ensaios para determinação da massa específica, onde se verifica que as densidades obtidas são bastante semelhantes, obtendo-se até melhor compactação no laboratório.

TABELA VI
COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA

Massa Específica (kg/m ³)		PROGRAMA EXPERIMENTAL			OBRA
		CQ	Testemunhos Pistas	Testemunhos Pista 14	CQ Obra
7	Média	2524			
	Desvio Padrão	17			
	Coef. Variação	1%			
28	Média	2542			
	Desvio Padrão	14			
	Coef. Variação	1%			
90	Média	2538			
	Desvio Padrão	15			
	Coef. Variação	1%			
120	Média	2525	2517		
	Desvio Padrão	8	17		
	Coef. Variação	0%	1		
180	Média	2539	2519	2547	2512(*)
	Desvio Padrão	25	40	12	18,00
	Coef. Variação	1%	2%	0%	1%
365	Média		2513		
	Desvio Padrão		43		
	Coef. Variação		2%		

(*) Resumo de resultado dos ensaios nas várias idades

As Figuras 17 e a 19 compara os diversos resultados obtidos, colocando num mesmo gráfico as envoltórias de resistência para , corpos de prova moldados, prismáticos e testemunhos obtidos durante a execução das pistas para o segundo programa complementar visando a obtenção de primas; e,

as envoltórias dos ensaios em testemunhos dos programa de aderência, denominados pista no gráfico.

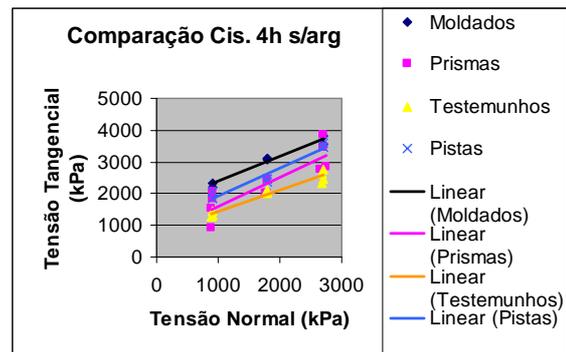


Figura 17. Comparação de Envoltórias de Resistência – Prismáticos e Estudo de Aderência, Intervalo de Tempo de 4 horas, sem Argamassa de Ligação

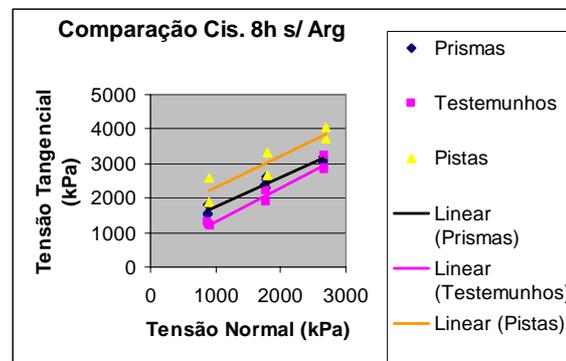


Figura 18. Comparação de Envoltórias de Resistência – Prismáticos e Estudo de Aderência, Intervalo de Tempo de 8 horas, sem Argamassa de Ligação

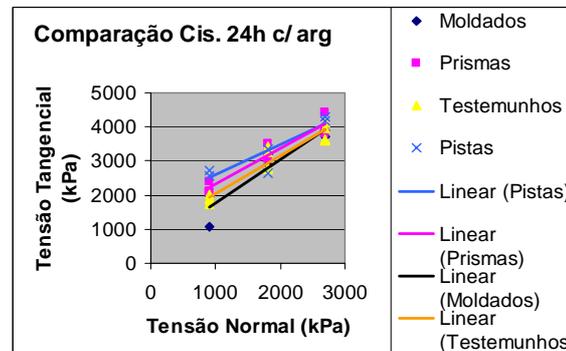


Figura 17. Comparação de Envoltórias de Resistência – Prismáticos e Estudo de Aderência, Intervalo de Tempo de 24 horas, com Argamassa de Ligação

Analisando os dados verifica-se que as curvas tem uma tendência ao paralelismo, mostrando a influência do ângulo de atrito e que as diferenças maiores ocorrem com a determinação da coesão, que é muito mais suscetível ao manuseio dos corpos de prova. Verifica-se, também o efeito positivo da argamassa de ligação que homogeneiza os resultados para as diferentes situações e também para as diferentes idades, como mostrado nas Figuras 13, 14 e 19.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou os principais resultado de

pesquisa visando o estudo dos principais fatores que influem na envoltória de resistência entre camadas de concretagem em obras hidráulicas de Concreto Compactado com Rolo, CCR. Os estudos utilizaram os materiais e dosagens aplicados na execução da obra da UHE Dona Francisca, o que permite a aferição dos resultados da simulação em laboratório.

Com os resultados, verifica-se que a simulação em laboratório reproduz os ensaios de campo, indicando que a execução de maciços experimentais em laboratório é uma ferramenta útil, podendo ser utilizada para a otimização de dosagens, para a previsão da parâmetros de projeto e para a simulação de situações que seriam de execução complicada no campo.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto permitem que se conclua sobre as envoltórias de resistência obtidas:

- Os resultados das envoltórias de resistência mostram que em todos os casos os resultados são muito superiores aos de envoltória de resistência de Mohr-Coulomb com coesão nula e ângulo de atrito de 45°.
- Os resultados sem utilização de argamassa apresentam maior dispersão que aqueles em que houve ao emprego de argamassa de ligação entre camadas.
- A utilização de argamassa uniformiza os resultados, obtendo envoltórias de resistência muito semelhantes, para variações do intervalo de tempo de lançamento entre 8 e 48 horas.
- No caso de tratamento de junta sem utilização de argamassa, não há diferença considerável entre os resultados de envoltórias com intervalos de lançamento de 4 horas e de 8 horas, resultado que é muito positivo quando da utilização do método de colocação rampado (ou chinês), criando maior conforto quanto ao tempo de espera entre camadas e permitindo futuros ganhos de custo, pela diminuição do consumo da argamassa entre camadas.
- Há uma diminuição considerável dos resultados da envoltória de resistência para intervalo de lançamento de 12 horas sem aplicação de argamassa de ligação.
- Nos casos estudados, as envoltórias de resistência dos corpos de prova prismáticos são superiores àquelas dos ensaios com testemunhos obtidos por sondagem rotativa, porém não há significância estatística na diferença entre os valores. De qualquer modo, a possibilidade de obtenção de corpos de prova prismáticos permite a execução de pesquisas para avaliação do efeito do tamanho do corpo de prova em ensaios de cisalhamento direto em CCR.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do Dr. Paulo Monteiro, da Universidade de Berkeley e do Sr. Rubens Bittencourt, de Furnas – Centrais Elétricas S. A., recebidas durante o desenvolvimento da pesquisa que gerou este documento, e,

especialmente, ao Sr Walton Pacelli de Andrade, cuja inspiração e aconselhamento foram fundamentais ao desenvolvimento dos trabalhos. Os autores agradecem, também, ao Eng^o Joaquim Franco Filho, do Consórcio Fornecedor da UHE Dona Francisca por seu caráter inovador, e a DFESA - Dona Francisca Energética S.A. pelo apoio à esta pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, W. P. de, -“Concretos - Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades” -Equipe de FURNAS -Laboratório de Concreto, ed. PINI-S.Paulo, 1997
- [2] ANDRADE, W. P. de; ANDRIOLO, F. R., -“Dosagem do CCR: Alta Pasta?; RCD?; Pobre? Ou Adequado Teor de Finos”, anais-III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- [3] ANDRIOLO, F. R., -“The Use of Roller Compacted Concrete” - Oficina de Textos, São Paulo-1998
- [4] MARQUES FILHO J.; ANDRADE, W. P. de; STEFFEN, R. D.; MARINO, M. A.; LEVIS, P., -“Execução de Aterros Experimentais de CCR em Laboratório, Programa de Ensaios”, anais, -III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- [5]] GALLEGO, A. R.; GONÇALVES JR, J. A.; SOUZA, M. A. de; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. de, -“Equipamentos para Executar Pista Experimental de Concreto Compactado Com Rolo em Laboratório”, anais, -III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba-1998
- [6] GALLEGO, A.R.; GONÇALVES JUNIOR, J., ANDRADE, M. A. S. de; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. de-“Equipamento para produção de pista experimental de concreto compactado com rolo em laboratório”, anais 41^a REUNIÃO ANUAL do IBRACON-Salvador 1999.
- [7] MOSER, D.; STEFFEN, R. D.; CESCA, R. J.; FERREIRA, W. S.; GARCIA A. de J., -“Controle da Qualidade do Concreto CCV e CCR da UHE Dona Francisca”, anais 43^a REUNIÃO ANUAL do IBRACON, Foz do Iguaçu, 2001
- [8] MOSER, D. E.; STEFFEN, R. D.; BRITO, C.; MUSSI, J. M. P. – “Quality control RCC of Dona Francisca Dam”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete, Madrid, Spain, 2003