

Influência do Grau de Compactação nas Propriedades do Concreto Compactado com Rolo

N. G. Graça⁽¹⁾; H.S. Mendes⁽¹⁾; Rubens M. Bittencourt⁽¹⁾; Reynaldo M. Bittencourt⁽¹⁾;
V. E. S. Borges⁽¹⁾; Dr. Oswaldo Cascudo⁽²⁾

I. INTRODUÇÃO

Resumo - A execução do concreto compactado com rolo (CCR) no Brasil tem sido marcada por uma grande evolução nos últimos 20 anos. No entanto, um aspecto importante para operação normal da estrutura refere-se ao grau de compactação com que o concreto é executado e, manifestações patológicas têm sido associadas à menor compactação, com maior porosidade no concreto.

Isto se deve à dosagem, deficiências no equipamento de compactação e também à forma de controle desta compactação.

Os resultados deste estudo foram obtidos em uma pesquisa realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS, na pista experimental de CCR, Figura 1, onde se buscou correlacionar as propriedades do CCR com diferentes graus de compactação (94%, 96% e 98%) para uma dosagem de CCR com agregados do tipo litológico granito e consumo de cimento de 70 kg/m³. Este estudo foi feito em corpos de prova (cp's) cortados dos testemunhos extraídos das pistas experimentais moldadas em Laboratório.

Em barragens de CCR têm sido observadas percolações pelas juntas de construção entre camadas consecutivas. Isto decorre principalmente pelo tempo de espera para lançamento da camada sobrejacente e pela conseqüente exposição da junta entre as duas camadas.

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos em um estudo de CCR realizado na pista experimental do Laboratório de Concreto de FURNAS em Goiânia onde são correlacionadas as propriedades das juntas de construção do CCR em corpos de prova moldados e em testemunhos extraídos com diferentes tempos de exposição de junta, na Figura 2 são apresentadas pistas no período de cura em câmara úmida.

Tais propriedades estão relacionadas a seguir: permeabilidade à água; resistência à tração na compressão diametral; resistência à tração simples no dispositivo Leroy; coesão e ângulo de atrito obtidos em ensaio de cisalhamento direto e; resistência à compressão axial simples.

Palavras-chave - Concreto Compactado com Rolo – Grau de Compactação – Junta - Controle.

Muitos dos problemas ocorridos em barragens de CCR têm sido atribuídos às juntas de construção ou em falhas de execução em juntas de contração especialmente no envolvimento de vedajuntas. No entanto, a água que percola pelo maciço pode encontrar um caminho preferencial através do próprio concreto, em função da baixa energia de compactação empregada. A fixação do número de passadas não deve ser um fator preponderante para garantir que o CCR tenha sido compactado corretamente. Um mal funcionamento dos equipamentos de compactação, espessuras de camadas elevadas e controle deficiente podem resultar em concretos porosos.

O uso de densímetro nuclear para controle da densidade do CCR “in situ” e por conseguinte seu grau de compactação tem sido o método que melhor garante que o CCR está sendo aplicado com os requisitos necessários ao adequado desempenho da estrutura. O método do densímetro nuclear consiste na execução de um furo no concreto recém compactado com o uso de uma haste sobre um gabarito, ficando o furo com o diâmetro de 25mm e profundidade de 300mm. Retira-se então a haste e o gabarito posicionando o densímetro nuclear e a haste do equipamento sobre o local. Em seguida, a haste vai sendo introduzida em diferentes profundidades, e em cada uma delas aciona-se o equipamento para determinação da densidade, umidade e teor de água, sendo a média dos valores de densidade adotada para determinação do GC do CCR.

Todavia, outros métodos de controle da densidade têm sido utilizados, como a membrana plástica e o frasco de areia, onde se abre uma cava tronco-cônica ou cônica invertida com diâmetro de 30cm e na profundidade da camada, sendo o material retirado de dentro da cava e pesado, e, no caso da membrana plástica, se coloca um plástico que é preenchido por água dentro de um gabarito circunscrito à cava, gabarito este onde se determinou o volume inicial com o mesmo plástico, porém entre a superfície do CCR e o topo do gabarito. A diferença entre o volume final e o volume inicial corresponde ao volume do furo. Para o caso do frasco de areia o volume é determinado preenchendo-se com areia o furo e determinando-se o volume de areia utilizado o que corresponde ao volume do furo.

Para este dois casos através da quantidade de CCR pesada retirada da cava e o volume desta, determina-se a densidade do CCR após compactação.

Trata-se de uma metodologia muito aplicada em geotecnia, principalmente para controle de aterros de

Agradecimentos a ANEEL pelo apoio financeiro despendido para este trabalho e à equipe de técnicos e engenheiros do Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., que colaboraram para o desenvolvimento da pesquisa.

(1) Engenheiros - FURNAS Centrais Elétricas.

(2) Professor da Universidade Federal de Goiás - UFG

materiais granulares, e este tem sido um método consagrado para este fim.

No entanto, para o CCR, principalmente para valores de consistência medida através do “Cannon Time” abaixo de 25 segundos, o que se observou é que há um fechamento das paredes da cava devido à plasticidade do concreto o que resulta em uma redução do volume da cava, e como consequência, um aumento na densidade do CCR após compactado, falseando este resultado. Este fato foi comprovado durante a construção das ensecadeiras galgáveis de Serra da Mesa, em 1988.

Uma das maiores dificuldades que persiste em barragens executadas com concreto compactado com rolo (CCR) refere-se ao tempo em que as juntas de construção entre as camadas podem ficar expostas sem que seja necessário aplicar qualquer tipo de tratamento.

Para prevenir possíveis percolações pelas juntas de construção tem sido aplicada sistematicamente a argamassa de ligação entre as camadas, uma vez que o intervalo de tempo de lançamento entre duas camadas consecutivas era normalmente da ordem de, no mínimo, 12 horas, o que naturalmente resultava na secagem superficial da camada inferior levando à necessidade de tratamento.

Foram então extraídos testemunhos das pistas experimentais para os diversos tempos de exposição objetivando o estudo das juntas de construção assim como foram moldados corpos de prova cilíndricos de 15cm x 30cm, corpos de prova estes que simularam as juntas de construção, os quais foram submetidos à mesma exposição.

II. METODOLOGIA APLICADA

Para verificar os aspectos anteriormente abordados, foram moldadas pistas experimentais no Laboratório de FURNAS em Goiânia, em escala de verdadeira grandeza, para graus de compactação de 94%, 96% e 98%.

Todos os concretos das pistas foram produzidos com a mesma dosagem, tendo sido utilizado um cimento CP III com teor de 50% de escória, agregados graúdos de Dmáx 50mm e 25mm e areia artificial contendo 12% de agregado pulverizado, todos estes agregados produzidos a partir da britagem da rocha granito, e um aditivo polifuncional. As principais características do cimento são mostradas na Tabela 1, dos agregados na Tabela 2 e da dosagem na Tabela 3.

Tabela 1 – Dados resultantes da caracterização do cimento.

PROPRIEDADES	CP III-32	Limite NBR 5735/91
Massa específica (g/cm³)	2,98	---
Área específica (cm²/g)	4,190	---
Resistência à		
3 dias	16,0	≥ 10,0
Compressão		
7 dias	24,5	≥ 20,0
28 dias	35,5	≥ 32,0 / ≤ 49,0
perda ao fogo	1,49	≤ 4,5
resíduo insolúvel	0,78	≤ 1,5
tróxido de enxofre (SO ₂)	1,69	≤ 4,0
óxido de magnésio (MgO)	4,53	---
dióxido de silício (SiO ₂)	26,66	---
óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,28	---
óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	10,61	---
Químicos (%)		
óxido de cálcio (CaO)	50,32	---
óxido de cálcio livre (CaO)	0,90	---
óxido de sódio (Na ₂ O)	0,21	---
Alcalis Totais		
óxido de potássio (K ₂ O)	0,48	---
Equiv. alcalino	0,53	---
sulfato de cálcio (CaSO ₄)	2,87	---
Teor de Escória	48	---

Tabela 2 – Dados resultantes da caracterização dos agregados.

Propriedades	Método	Areia Artificial	Brita 25 mm	Brita 50 mm
Absorção (%)	NBR NM 3001	0,2	—	—
Absorção (%)	NBR 9937/87	—	0,4	0,4
Teor de Material Pulverizado (%)	NBR 7219/87	14,3	—	—
Módulo de Finura	NBR 7217/87	2,44	7,12	8,02
Massa Específica – Chapman (g/cm³)	NBR 9776/87	2,69	—	—
Massa Específica SSS (g/cm³)	NBR 9937/87	—	2,68	2,68

Tabela 3 – Composição da dosagem.

	(MPa)	6
fck		
Idade de Controle	(dia)	90
Dmáx	(mm)	50
Relação A/C		1,929
Cimento		70
Água		135
Areia Artificial sem Lavar		1125
Brita 25 mm	(kg/m³)	669
Brita 50 mm		447
Aditivo Super. Retar. Pega		1,050

Para cada grau de compactação, foram realizados ensaios para determinação das propriedades do CCR no estado fresco e também para controle da compactação, com o uso do densímetro nuclear. As propriedades determinadas no estado fresco foram:

- ✓ Concreto Compactado com Rolo (CCR) – Determinação do tempo de vibração “Cannon Time” e massa específica – Procedimento FURNAS: 001.006.011;
- ✓ Concreto Compactado com Rolo (CCR) – Determinação da água unitária massa unitária no estado fresco – Procedimento FURNAS: 001.006.027.

A orientação de extração dos testemunhos foi de tal forma que possibilitasse o estudo do comportamento do CCR em camadas verticais, em camadas horizontais, em juntas verticais e em juntas horizontais em função da condição em que se desejava para cada uma das propriedades. Estes testemunhos foram então serrados em segmentos de 30cm de comprimento para realização dos ensaios com concreto endurecido que foram:

- ✓ Resistência à Compressão Axial Simples – NBR 5739/94 e Procedimento FURNAS N° 01.007.001;
- ✓ Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral em Corpos de Prova Cilíndricos – Procedimento FURNAS N° 01.007.002;
- ✓ Determinação da Resistência à Tração Simples do Concreto Dispositivo Leroy - Procedimento FURNAS N° 01.007.011;
- ✓ Concreto Endurecido – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade à Água – NBR 10786/89 e Procedimento FURNAS N° 01.011.001;
- ✓ Ensaio de Perda d’Água sob Pressão em Sondagem Rotativa – Procedimento FURNAS N° 03.011.001;
- ✓ Cisalhamento – Procedimento FURNAS N° 04.007.06;
- ✓ Absorção por Imersão e Fervura – NBR 9779/95 Procedimento FURNAS N° 01.002.071.



1 - Compactação do CCR.



Figura 2 - Cura das Pistas de CCR.

III. RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios com o CCR no Estado Fresco para as pistas são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades Médias do Concreto Fresco para as Pistas.

Propriedade	Pista GC=94%	Pista GC=96%	Pista GC=98%
Unidade Integral (%)	6,16	6,52	6,03
Unidade Peneirado (%)	8,07	8,15	8,23
Unidade Densímetro (%)	4,64	5,24	4,90
Canon Tíme Após mistura (s)	12	13,00	15,00
Massa Específica VEBE (kg/dm ³)	2380	2423	2403
Massa Específica DMA (kg/dm ³)	2444	2432	2462
Massa Específica Densímetro Nuclear (kg/dm ³)	2321	2374	2427
Grau de Compactação (%)	94,2	96,3	98,4

A apresentação dos resultados será feita sempre considerando corpos de prova moldados durante a execução das 3 pistas com cada diferente grau de compactação e os relativos aos testemunhos extraídos tanto na vertical como na horizontal também para as 3 pistas.

Nas Figuras 3 a 5 são mostrados respectivamente, os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

simples, resistência à tração simples e resistência à tração na compressão diametral.

Para a resistência à compressão foram determinadas as resistências na idade de 182 dias para os testemunhos extraídos de camadas verticais e camadas horizontais, enquanto que para os corpos de prova moldados durante a dosagem das pistas os ensaios foram realizados na idade de 182 dias e após intervalo de 2h da dosagem, para as idades de 91 e 182 dias.

Figura

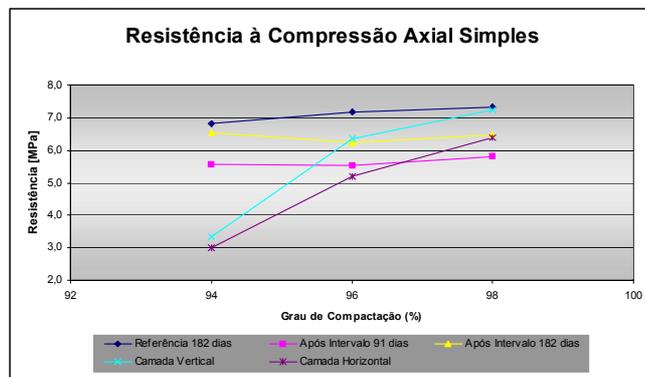


Figura 3 – Resultados de resistência à compressão axial simples.

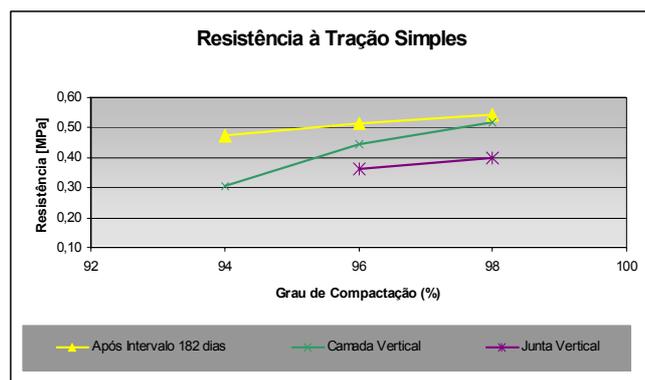


Figura 4 – Resultados de resistência à tração simples.

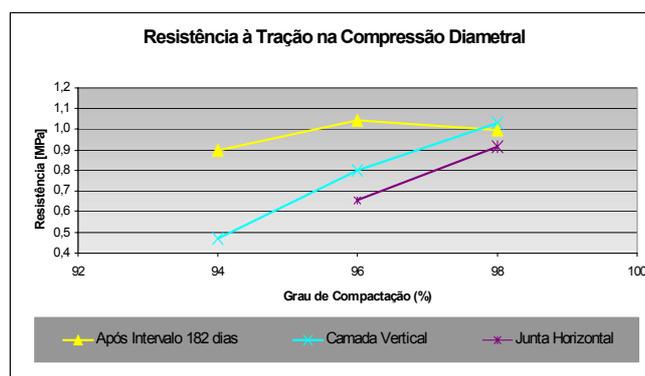


Figura 5 – Resultados de resistência à tração na compressão diametral.

Verifica-se que um valor próximo às referências (moldados) somente é encontrado para um GC=98%, enquanto que para o GC=96% este valor decresce em 10% e, para GC=94%, os valores de resistência são 50% menores.

Para a resistência à tração simples, foram realizados ensaios em cp's moldados após intervalo de 2 horas e em

cp's extraídos de camadas verticais e de juntas verticais, onde se buscou também verificar a influência do GC no desempenho das juntas de construção entre camadas. Os resultados mostram que, para os testemunhos da camada vertical há um comportamento similar ao da resistência à compressão, porém para as juntas verticais não foi possível extrair testemunhos uma vez que os mesmos rompiam na junta durante o processo de extração.

Para a resistência à tração, observa-se o mesmo comportamento da propriedade anterior tanto com relação à camada vertical como com relação à junta, neste caso horizontal, mostrando a forte influência do GC.

Na Figura 8 é mostrado o comportamento do CCR no ensaio de permeabilidade à água, onde observa-se que para os GC's de 96% e 98% não houveram alterações nos resultados, exceto para os testemunhos de camadas verticais de GC=96% que apresentaram, de forma não esperada, valores de permeabilidade inferiores aos dos testemunhos de GC=98%. Este fato está levando à se repetir os ensaios tendo sido moldada uma nova pista, e cujos resultados serão divulgados posteriormente. No que diz respeito aos testemunhos extraídos da pista com GC=94% não foi possível a realização do ensaio devido à ruptura dos 5 cp's submetidos ao ensaio no ato da aplicação da pressão de ensaio. Em função deste fato, o que já era previsível durante a extração foram realizados ensaios de perda d'água, como mostram as Figuras 6 e 7.



Figura 6 - Acompanhamento ensaio de perda d'água.



Figura 7 - Ensaio de perda d'água em execução.

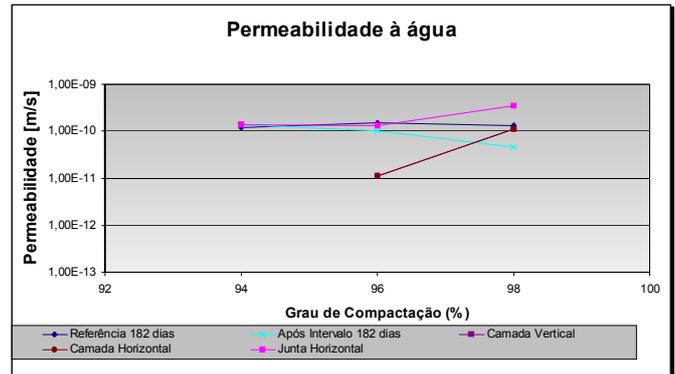


Figura 8 - Resultados de permeabilidade à água.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados, respectivamente, resultados de ângulo de atrito e coesão obtidos através do ensaio de cisalhamento direto para tensões confinantes de 0,5, 1,0 e 2,0 MPa, os quais mostraram que o ângulo de atrito manteve-se inalterado independente do GC, quando compara-se os resultados dos cp's molda dos com os dos testemunhos extraídos, exceto os de junta vertical para o GC=98%, que apresentaram valores inferiores. Quanto à coesão, há uma clara evidência da melhoria desta propriedade para os GC mais elevados quando comparados com o GC de 94%.

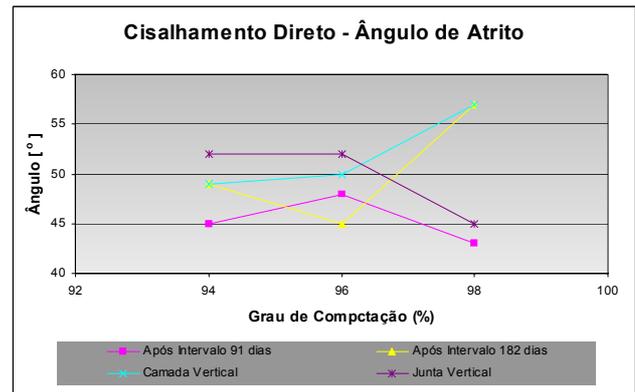


Figura 9 – Cisalhamento – Ângulo de atrito.

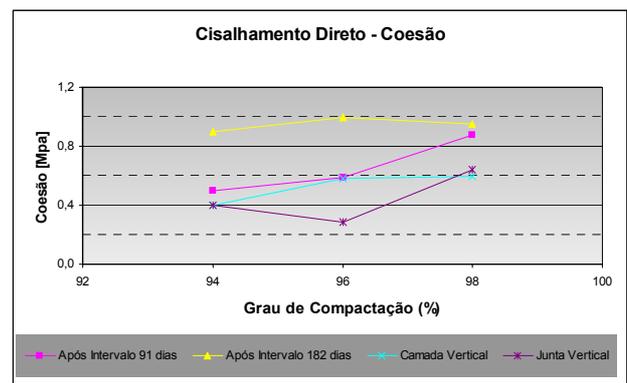


Figura 10 – Cisalhamento – Coesão.

Na Figura 11 são mostrados os resultados de absorção por imersão e fervura, os quais mostram uma influência quase que linear do GC nesta propriedade, onde o CCR com GC=94% apresenta absorção respectivamente 14 e 27% superior aos GC de 96% e 98%.

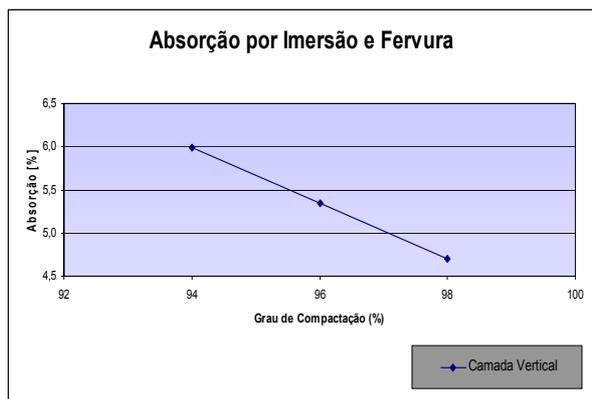


Figura 11 – Resultados de absorção por imersão e fervura.



Figura 12 - Aspecto da pista com GC=94%.



Figura 13 – Aspecto da pista com GC=98%.



Figura 14 – Aspecto dos testemunhos da pista com GC=96%.

Os ensaios mostram que há uma diferença de resistência entre os cp's moldados e os testemunhos extraídos, sendo estes últimos inferiores o que pode ser esperado, conforme pode ser observado nas Figuras 15 e 16.

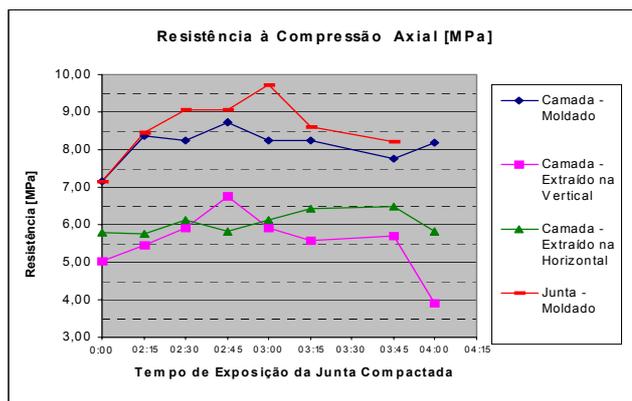


Figura 15 - Gráfico –Tempo de Exposição x Resistência à Compressão Axial Simples.

O ensaio de Tração na Compressão Diametral mostra haver uma tendência de queda do valor da resistência com o aumento do tempo de exposição da junta, conforme pode ser visto na Figura 16 onde se correlacionam o tempo de exposição com a relação entre os ensaios realizados com testemunhos da junta extraída com os da camada extraída.

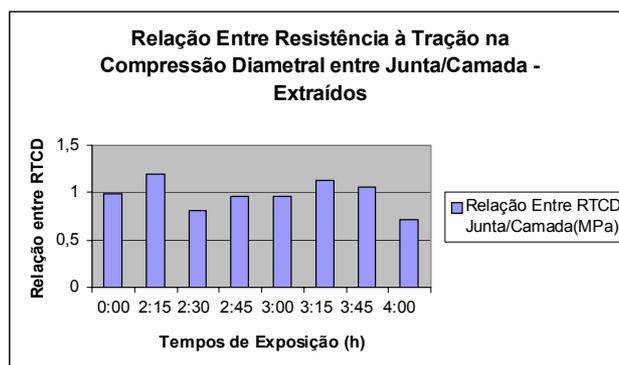


Figura 16 – Gráfico –Tempo de Exposição x Relação entre a Resistência à Tração na Compressão Diametral (RTCD) de Juntas e Camadas em Testemunhos Extraídos.

A coesão no ensaio de Cisalhamento Direto, apesar da dispersão, indica uma tendência de queda da coesão com o aumento do tempo de exposição, conforme pode ser visto na Figura 17, onde se correlacionam o tempo de exposição com a relação entre os ensaios realizados com testemunhos da junta extraída com os da camada extraída.

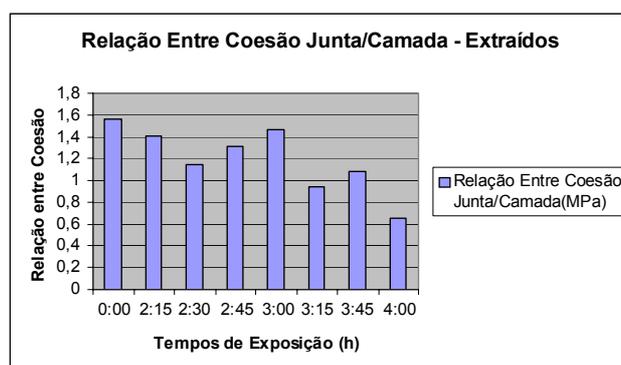


Figura 17 – Gráfico –Tempo de Exposição x Relação entre Coesão de Juntas e de Camadas de Testemunhos Extraídos.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa mostram que o GC tem importante influência nas propriedades do CCR e consequentemente nas estruturas construídas com este material, geralmente estruturas hidráulicas como barragens: GC de 94% res ulta em CCR poroso, permeável e de baixa resistência o que o torna susceptível tanto a deformações não previstas em projeto como a entrada de agentes agressivos que afetem a sua durabilidade e a vida útil da estrutura.

O estudo mostrou ainda que um menor GC no CCR afeta não somente as propriedades da camada de CCR, mas também a das juntas entre camadas, podendo levar também a percolações por estes caminhos preferenciais naturais de percolação.

Uma outra conclusão é que o GC=96% pode ser entendido como um limite inferior estatístico para o controle da compactação de barragens de CCR uma vez que as propriedades para este GC mostraram-se inferiores, porém dentro de limites mínimos aceitáveis.

É importante então, empregar-se métodos confiáveis de controle do GC em barragens, como o uso do densímetro nuclear, e métodos como membrana plástica ou frasco de areia devem ser vistos com a devida reserva.

Em caso da impossibilidade do uso de densímetro, deve-se buscar uma correlação confiável entre este e o método a ser utilizado considerando a mesma dosagem de CCR e suas propriedades no estado fresco.

Das propriedades pesquisadas e relativas ao que se espera do comportamento das juntas, se pode observar que apenas duas, Resistência à Tração na Compressão Diametral e Coesão apresentam tendência de redução de valores com os tempos de exposição. Em função dos resultados obtidos e de modo a confirmar a tendência até então verificada, foram moldadas novas pistas para tempos de exposição das juntas superiores à 4:00 horas (5, 6 e 8 horas), uma vez que os resultados até então obtidos indicam ser este o tempo imediatamente posterior ao tempo limite de exposição, considerando que nele já há perdas em algumas das propriedades do CCR.

A investigação do CCR de baixo consumo apesar de rico em pasta em função dos finos presentes na areia artificial (materiais pulverizados), para verificar o seu comportamento através de testemunhos extraídos é de extrema complexidade, dada a possibilidade de se modificar as propriedades durante a extração.