

Utilização De Concreto Compactado Com Rolo - CCR Para Contenção De Barragens De Rejeitos

Frank Marcos da Silva Pereira

Diretor, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, engfrank51@yahoo.com.br

João Bosco Moreira do Carmo

Especialista, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, jboscomc70@hotmail.com

Walton Pacelli de Andrade

Consultor, Engeconsol, Belo Horizonte, Brasil, wpacelli@gmail.com

RESUMO: Após os acidentes ocorridos recentemente nas barragens a montante em Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais, o contexto da execução de obras emergenciais para proteger as regiões a jusante, foi um marco para a engenharia brasileira assim como um desafio para a mineradora VALE. A opção escolhida para a construção dessas estruturas foi a que demonstrou ser mais rápida e segura com metodologia construtiva consagrada no meio técnico, o Concreto Compactado com Rolo - CCR. Em poucos meses foi possível construir estruturas robustas e estáveis capazes de garantir a eficácia de contenção de uma eventual ruptura das barragens de rejeitos em nível crítico, mitigando o risco, protegendo a vida de uma maneira geral. Foram construídas duas Estruturas de Contenção a Jusante – ECJ em Minas Gerais. A produção de CCR nas centrais de concreto da primeira obra teve início no dia 01 de agosto de 2019 e sua conclusão se deu em 20 de novembro de 2019, com trabalhos adicionais concluídos em 18 de fevereiro de 2020, totalizando 184.212,37 m³ de concreto produzidos, sendo 148.556,90 m³ desse valor correspondente à produção de CCR. Na segunda obra o Controle Tecnológico abrangeu o período de julho de 2019 a agosto de 2021. Foram lançados 548.406,21 m³ de CCR, com recordes nacionais na produção diária e mensal de CCR. Neste trabalho serão abordados os dados do Controle Tecnológico aplicado nessas obras, análise dos resultados dos ensaios do concreto fresco e endurecido, assim como a campanha de carotagens e investigações posteriores à construção, com aval positivo após a conclusão dessas obras e suas implicações técnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens, Concreto, Contenção, Rejeitos.

ABSTRACT: After the recent accidents at the upstream dams in Mariana and Brumadinho in the state of Minas Gerais, the context of carrying out emergency works to protect downstream regions was a milestone for Brazilian engineering as well as a challenge for the mining company VALE. The option chosen for the construction of these structures was the one that proved to be faster and safer with a construction methodology recognized in the technical world, Roller Compacted Concrete - RCC. In just a few months it was possible to build robust and stable structures capable of guaranteeing the effectiveness of containment of an eventual rupture of tailings dams at a critical level, mitigating the risk and protecting life in general. Two Downstream Containment Structures - ECJ were built, in Minas Gerais state. The production of RCC in the concrete plants at first ECJ began on August 1, 2019 and concluded on November 20, 2019, with additional work completed on February 18, 2020, totaling 184,212.37 m³ of concrete produced, with 148,556.90 m³ of this value corresponding to the production of RCC. In the second ECJ Technological Control covered the period from July 2019 to August 2021. 548,406.21 m³ of RCC were launched, with national records in daily and monthly production of RCC. This work will cover data from the Technological Control applied in these works, analysis of the results of fresh and hardened concrete tests, as well as the coring campaign and post-construction investigations, with positive approval after the completion of these works and their technical implications.

KEYWORDS: Dams, Concrete, Containment, Tailings.

1 INTRODUÇÃO

Em ambas Estruturas de Contenção a Jusante ECJ foram definidas premissas de projeto onde prevaleceu a qualidade da construção e a segurança executiva. Para tanto, a escolha dos materiais constituintes mais apropriados foi fundamental para a obtenção de concretos que atendessem a todas as propriedades especificadas, assim como a durabilidade das estruturas, notadamente a comprovação da inibição de reações expansivas verificadas nos ensaios de Reação Álcali Agregado – RAA. As obras deveriam ser executadas em tempo recorde para garantir a proteção das cidades localizadas a jusante das barragens em nível crítico de estabilidade. Neste sentido, a primeira escolha foi a utilização do cimento CP III com teor de escória de alto de forno de 50%. Esta definição foi baseada em estudos realizados em várias obras similares e estudos tecnológicos realizados por Furnas Centrais Elétricas em seu laboratório de concreto em Goiânia-GO. A utilização de agregados oriundos de rejeitos da mineração foi benéfica devido a elevada densidade desses materiais em relação aos agregados de litologia gnaiss disponívels na região das obras. Esta decisão também foi estratégica pois propiciou ganhos de densidades do CCR 20% maiores que concretos convencionais, refletindo diretamente na redução do volume da estrutura, redução do tempo de execução da obra e consequentemente uma ação ecologicamente correta pelo reaproveitamento de rejeitos industriais. Na primeira ECJ foi aplicado o Granulado da Instalação de Concentração – GIC, proveniente da Mina de Água Limpa da Vale, um rejeito de baixo teor de ferro, porém com elevada densidade, da ordem de 3500 kg/m^3 . Em Mina de Fábrica foi aplicado o Itabirito Compacto disponibilizado pela Mineradora Herculano. Ambos agregados de rejeitos possuíam dimensão máxima característica de 50 mm e foram utilizados em sua maioria com duas faixas granulométricas, uma fração grossa retida na malha 12 mm e outra fração fina, com percentual de material passante na peneira 200 (0,075 mm) suficiente para garantir o adequado empacotamento do CCR. Os concretos convencionais foram fabricados com agregados de litologia gnaiss na dimensão máxima característica de 19 mm e areia, sendo que em Mina de Fábrica foi possível aplicar também o concreto bombeado com agregados pesados. A segregação na descarga da mistura em campo não foi significativa e não houve interferência com as curvas granulométricas teóricas, apesar de haver a descontinuidade decorrente em alguns pontos do gráfico de granulometria. Isso vem comprovar que na granulometria do CCR pode haver pequenas variações aceitáveis dos limites teóricos da curva teórica de Bolomey, já que não havendo segregação da fração graúda, assim como a falta ou excesso de finos que comprometa a uma quantidade excessiva de água unitária da dosagem, a mistura pode ser ajustada sem dificuldades. As restrições de elevada abrasão Los Angeles para agregados graúdos se restringem a estruturas de enrocamentos expostos às intempéries ou em superfícies hidráulicas expostas a elevadas velocidades. Para concretos estruturais e massivos, devidamente estudados e caracterizados para atendimento das características mecânicas, elásticas, viscoelásticas e de durabilidade, um valor elevado desse parâmetro, nesses casos, é irrelevante. O efeito de durabilidade de agregados de origem hematita, com teores de FeO_2 elevados, não compromete a vida útil do concreto. A carbonatação normalmente observada em estruturas de concreto poderá apresentar em concretos com hematita uma coloração avermelhada, porém somente provocando um efeito estético. A utilização da hematita no estado natural, sem tratamentos térmicos, não promoveria o fenômeno da oxidação da massa, pois o CCR utilizado não estará submetido a elevadas temperaturas capazes de alterar o efeito natural do fenômeno de oxidação e comprometimento da durabilidade do concreto. Na Figura 1 as imagens dos agregados especiais utilizados nos concretos.

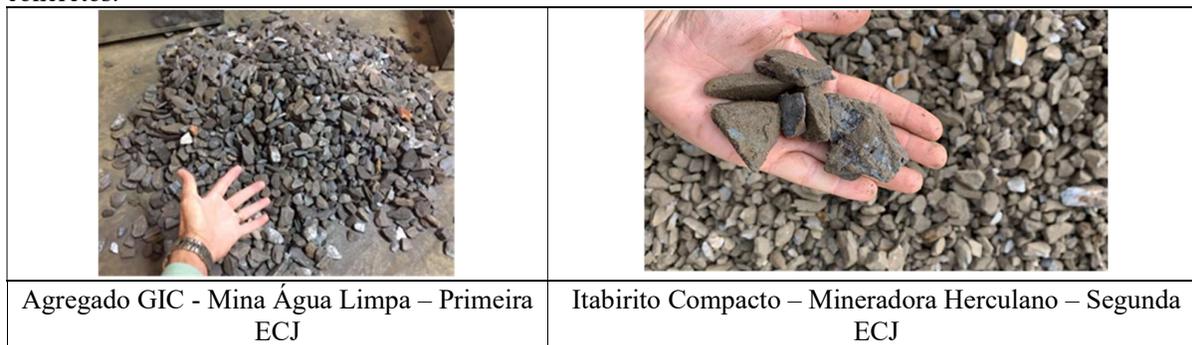


Figura 1 – Agregados de rejeitos Industriais utilizados na construção das ECJs.

2. DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CCR

Estudos de dosagens foram realizados previamente ao início da obra. O Laboratório da SOLOCAP em BH, especializado em obras rodoviárias foi adaptado para atender aos ensaios do CCR. Com a necessidade emergencial foi possível rapidamente preparar o ambiente do laboratório para realização dos ensaios de CCR no estado fresco e endurecido. O resumo dos estudos de dosagens dos concretos compostos com os agregados disponíveis na região da obra, foi realizado obedecendo o Método do Módulo de Finura. Este método foi desenvolvido em Furnas Centrais Elétricas na década de 70 para atender as principais construções de hidrelétricas no Brasil e posteriormente em diversas obras no exterior. A norma brasileira do CCR publicada em 2015 veio apresentar algumas características intrínsecas à tecnologia desenvolvida no Brasil. Vale destacar o aparelho DMA, desenvolvido no Laboratório de Concreto de Furnas em Goiânia-GO, pelos técnicos Guilherme Leroy, e Valdir Paulino de Oliveira e dos engenheiros Moacir Alexandre Souza de Andrade e Walton Pacelli de Andrade, aproveitando um dispositivo apresentado na *Designation 11, Figure 218. Apparatus for Direct Measurement of Surface, Moisture, Absorption, and Specific gravity of Aggregate PX-D-33523. (1988)*, disponibilizado no *Concrete Manual A Water Resources Technical Publication eighth Edition revised do US Bureau of Reclamation*.

Na primeira ECJ a dosagem CCR.6, foi a mais utilizada e na segunda ECJ a dosagem preponderante foi a CCR4. As dosagens mais aplicadas nas obras estão apresentadas a seguir na Tabela 1

Tabela 1 - Dosagens de CCR mais aplicadas nas obras

Barragem – ECJ		Primeira ECJ	Segunda ECJ	
Dosagem		CCR 6	CCR 4	
fck Projeto	MPa	8,0		
Idade de Controle	dias	90		
Módulo de Finura	-	5,44	4,71	
Cimento CP III	(kg/m ³)	100	100	
Água		140	155	
Areia Artificial		560	1279	
Brita 2		2152	1443	
Aditivo Polifuncional		1	1	
Relação A/C	-	1,40	1,55	
Propriedades do Concreto Fresco e Endurecido	Densidade Teórica (kg/m ³)	3012	2.958	
	Cannon Time (s)	Média	12,4	11,6
		D Padrão	2,4	2,0
	Massa Unitária - Vebê (kg/m ³)	Média	2398	2.909
		D Padrão	115	24,42
	Massa Específica - DMA (kg/m ³)	Média	2985	2.991
		D Padrão	139	21,69
	Temperatura do Concreto (°C)	Média	23,1	24,1
		D Padrão	4,0	3,6
	M. Espec. CCR Curado (kg/m ³)	Média	2835	2.888
		D. Padrão	46	42
	Média das Resistências à Compressão Axial (MPa)	3 dias	2,1	2,1
		7 dias	3,4	4,3
28 dias		6,1	9,6	
90 dias		9,5	12,1	
N. Amostras (n)	Idades de Controle	118	163	
Coeficiente "t"		0,842	0,842	
Média das Resistências à Compressão Axial na Idade de Controle (MPa)		9,5	12,1	
Desvio Padrão na idade de controle		2,1	1,96	
Coeficiente de Variação (%)		22,1	17,1%	
Fck (MPa) - Recalculado		8,0	9,9	

3. CAROTAGENS DO CCR NA PRIMEIRA ECJ

A realização da campanha de carotagem, foi programada para comprovar a qualidade do CCR aplicado e correlacionar as propriedades obtidas durante a construção da obra com as de Laboratório. Esta atividade foi acompanhada sistematicamente pela VALE e executada pela empresa GEONORTE de Goiás. Esta atividade foi programada para comprovar a expectativa de atendimento das propriedades do concreto endurecido na própria estrutura.

3.1 ASPECTO GERAL DOS CAROTES

Nas Figura 2 são mostradas algumas fotografias dos carotes extraídos na Barragem a partir da idade de 90 dias, o que ocorreu a partir de fevereiro de 2020.

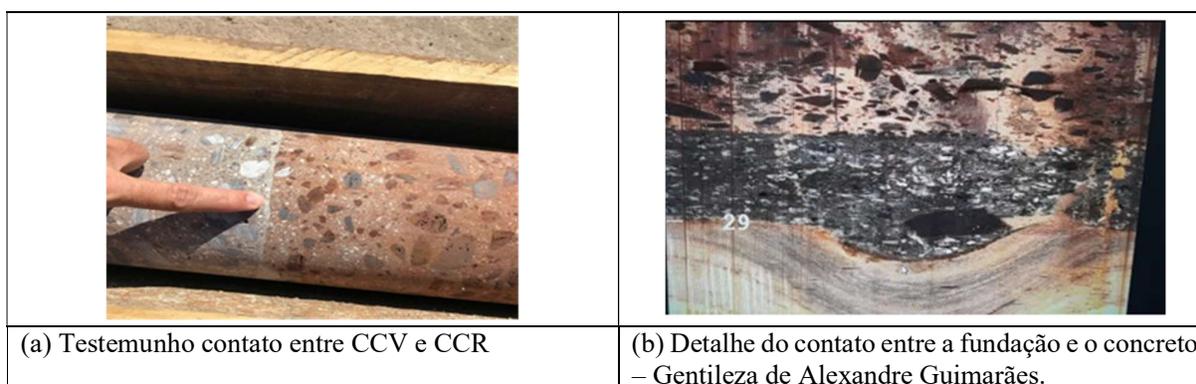


Figura 2 – Carotes extraídos nas ECJs

Durante a carotagem foram feitos televisionamentos do interior dos furos, um dos quais é mostrado na Figura 2 (b), furo SRC-01, contato do CCR/CCV/rocha de fundação – sem escala, que demonstra que as paredes dos carotes extraídos e filmados pela empresa GEOSOL, quando foi possível verificar a uniformidade das paredes completamente íntegras e fechadas, sendo descritas com vazios insignificantes e de ordem milimétrica.

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os testemunhos do CCR foram levados para o Laboratório da SOLOCAP em Belo Horizonte, onde foram preparados e identificados para realização dos ensaios de Massa Específica, Absorção, Permeabilidade, Resistência à Compressão, Módulo de Elasticidade e para a determinação da Coesão e Ângulo de Atrito entre uma junta horizontal tratada e não tratada, normalmente obtidas respectivamente com e sem inserção de argamassa de ligação, com intervalo de lançamento inferior a 24h.

3.3 RESUMO DOS RESULTADOS DOS TESTEMUNHOS NA PRIMEIRA ECJ

A seguir está apresentada a Tabela 2 está apresentado o resumo dos resultados dos ensaios com os carotes. Esses resultados não sofreram correções dos valores obtidos nos ensaios apresentados.

Tabela 2 – Resultados das médias dos ensaios executados com os testemunhos primeira ECJ.

Furo		SRC-01	SRC-02A	SRC-05	SRC-06	SRC-07
Bloco		12	11	4	2	3
Massa específica (kg/m ³)		3,094	3,148	2,953	2,924	3,043
Absorção de água (%)		5,2	4,8	5,3	5,8	4,2
Resistência compressão (MPa)		11,9	11,4	10,9	10,7	11,5
Resistência tração diametral (MPa)		1,6	1,4	1,4	1,6	1,4
Módulo Elasticidade (GPa)		13,1	14,3	19,6	14,2	8
C. Permeabilidade 10 ⁻¹¹ (m/s)		6,82	9,79	8,35	9,13	7,39
Cisalhamento direto	Laboratório	(*)/SOLOCAP	(**)/SOLOCAP	(**)/PUC-RJ	(**)/PUC-RJ	(***)/SOLOCAP
	Coessão (MPa)	0,200	0,899	0,690	0,690	0,614
	Ângulo de atrito (°)	45,0	45,3	48,4	48,4	70,1
Triaxial (****)	Coessão (MPa)	4,0				
	Ângulo de atrito (°)	51,3				
(*) Junta tratada de CCR - Equipamento em desenvolvimento; (**) Junta tratada de CCR - Equipamento normalizado; (***) CCR Junta não tratada (****) Ensaio triaxial junta CCR e CCV.						

Os resultados de cisalhamento e ângulo de atrito foram correlacionados com os testes que comprovaram a boa aderência entre as camadas e a capacidade de colagem entre as faixas compactadas estarem satisfatórias.

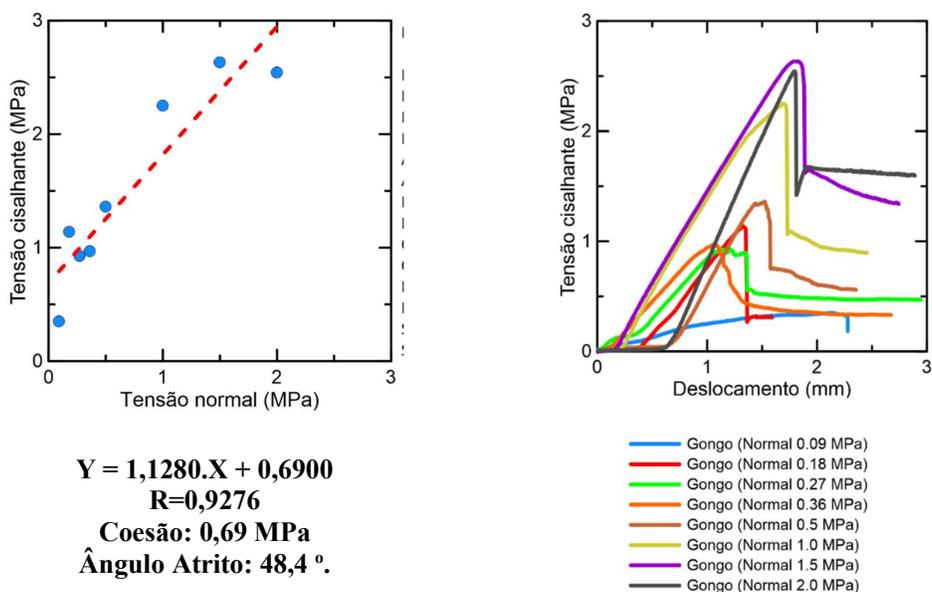


Figura 3 – Cisalhamento direto em juntas não-tratadas – PUC – RJ – Primeira ECJ - Fonte: CARMO 2023.

Foi realizado um ensaio complementar com o testemunho de CCR extraído da obra de ECJ Mina de Fábrica contemplando uma região entre o contato entre o CCV e o CCR composto de agregado itabirito compacto. Os ensaios foram realizados no Laboratório da GEOCONTROLE em Nova Lima MG e os resultados estão apresentados na Figura 4.

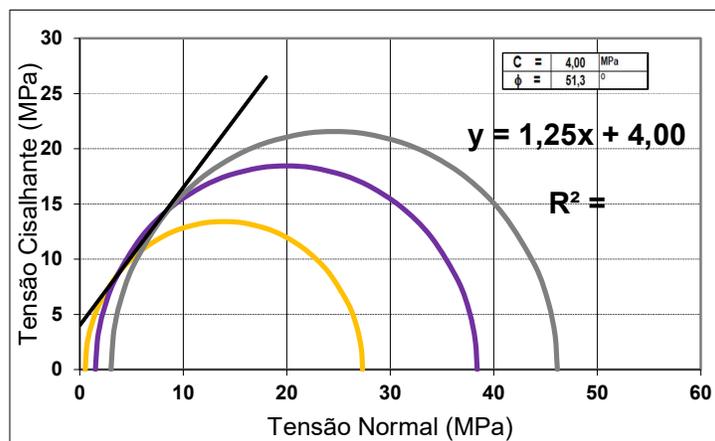


Figura 4 – Ensaio Triaxial – Gentileza da GEOCONTROLE

4. CAROTAGENS DO CCR EM FÁBRICA

Foram realizados 9 furos de sondagens nos Blocos 3, 5, 10, 11 e 15 da Estrutura de Contenção. Nos ensaios realizados com os carotes foi possível realizar a análise e comparação com os resultados obtidos durante a execução da obra pelo Controle Tecnológico. Os serviços de sondagens foram realizados pela empresa Geonorte com utilização de Sonda March 700, com Barrilhete de 8” Furos aplicando-se produtos: Gelplus/Betonita.

Tabela 7 – Estatística dos Ensaios de Carotes em Fábrica

Concreto Endurecido						
Dados Estatísticos	NBR 9778		NBR 7220	NBR 7580	NBR 8522	Permeabilidade (cm/s)
	Massa Esp. SSS (kg/m ³)	Absorção (%)	Tração Diametral (MPa)	Compressão Axial (MPa)	Módulo Elast. (GPa)	
número "n"	13	13	17,0	31	38	12
Média	2,959	6,7	1,7	12,9	16,1	7,57E-09
Sd	0,024	0,8	0,3	3,2	3,6	1,64E-09
Média + Sd	2,984	7,5	2,0	16,2	19,7	9,21E-09
Média - Sd	2,935	5,9	1,4	9,7	12,5	5,94E-09
Máximo	3,004	8,4	2,3	20,8	22,1	9,93E-09
Mínimo	2,918	5,6	1,1	8,2	7,0	5,53E-09

5. CONCLUSÕES

Estruturas em Concreto Compactado com Rolo contendo agregado de rejeito de hematita ou de Itabirito Compacto oriundos da exploração de minério de ferro, foram construídas para proteger as comunidades de uma possível ruptura das barragens de rejeitos. Os testemunhos extraídos destas contenções apresentaram em média densidade da ordem de 3.000 kg/m³, resistência à compressão de 10 MPa e absorção de água de 5,0 %, conforme especificado nos projetos. A utilização do cimento Portland com 50% de escória de alto-forno promoveu um aumento adiabático de temperatura de 5 °C, observado em amostras de laboratório, adequado para utilização deste CCR em estruturas maciças. Amostras de laboratório deste CCR da primeira e Gongo Soco apresentaram deformação total aos 90 dias em ensaio de fluência (deformação elástica mais fluência específica) de 175×10-6/MPa. O módulo de elasticidade de corpos de prova moldados variou de 12,0 GPa a

14,6 GPa. Os testemunhos extraídos da contenção apresentaram módulos elásticos entre 8 GPa e 19 GPa, assim como resistência diametral à compressão de 1,4 MPa a 1,6 MPa e coeficiente de permeabilidade entre 6×10^{-11} e 10×10^{-11} m/s. No ensaio de cisalhamento direto, as juntas tratadas com argamassa apresentaram coesão entre 0,7 MPa e 0,9 MPa e ângulos de atrito entre 40° e 48° . Estes resultados demonstraram que o uso deste CCR foi adequado para construção das contenções de Congo Soco e Fábrica. As construções foram rápidas e eficientes, com uma média de lançamento e compactação de concreto de 70.000 m³/mês, e não foram detectados problemas devido ao uso de agregado de rejeitos de hematita. A utilização de rejeitos de hematita se mostrou adequada para aplicação em outras obras em CCR com finalidades semelhantes em estruturas maciças de concreto, especialmente em obras emergenciais.

Além dessas vantagens, estudos de atenuação da radiação gama apresentados por CARMO 2023, indicaram que este CCR, por ser mais pesado, pode ser considerado para trabalhos de contenção e blindagem em estruturas massivas, estruturas emergenciais de blindagem em acidentes radiológicos, ou para tratamento de fundações de usinas nucleares. Neste estudo, a metodologia utilizada para a realização de ensaios de blindagem de amostras de concreto nos laboratórios do CDTN em Belo Horizonte, mostrou-se adequada para os objetivos que foram definidos e poderia ser adotada futuramente como padrão para futuras pesquisas e até mesmo ser considerada para um ensaio a ser normatizado.

Todos os resultados dos materiais utilizados na obra para a fabricação do CCR (cimento, agregados, aditivos químicos e água) foram controlados estatisticamente e atenderam aos limites estabelecidos pelas normas vigentes para sua aplicação para as duas obras. Os resultados desses materiais constituintes foram compatíveis aos obtidos em outras obras de CCR. Segundo a norma ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) o GIC se enquadra como resíduo não perigoso, Classe II, inerte, apresentando níveis de concentração abaixo dos valores limites especificados para elementos críticos, tais como o cromo total ($<0,05$ mg/l), zinco (<5 mg/l) e chumbo ($<0,01$ mg/l).

O benefício da construção de Estruturas de Contenção a Jusante como as que a VALE vem construindo na região do Quadrilátero Ferrífero, para evitar novas tragédias de ruptura de barragens a montante como as de Brumadinho e Mariana, é imensurável. Após as chuvas de janeiro 2022 na região de Minas Gerais, as barragens de contenção construídas pela VALE cumpriram seu papel de proteger as cidades a jusante. Houve grande volume de chuvas, com vazões próximas às máximas de projeto, com grande aporte de água nas regiões de Nova Lima, Barão de Cocais e Mariana, porém sem registros de acidentes de rupturas das barragens de propriedade da VALE. A boa interação durante a construção entre a VALE, as Projetistas WALM e DF+ , assim como o Consórcio Construtor CMM, resultou na construção das duas estruturas robustas com estratégia de construção adequada, coerente com as necessidades emergenciais desses importantes Projetos.

AGRADECIMENTOS

A VALE S.A. por não ter medido esforços para construção dessas obras emergenciais em caráter de urgência, mobilizando os recursos necessários para a realização das Estruturas de Contenção a Jusante.

A todas as empresas que participaram dessas obras e dos profissionais que com espírito de colaboração e determinação se voltaram para obtenção de um objetivo único que trouxe maior segurança e garantia de qualidade das obras executadas sob um rigoroso controle construtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Relatório Consultor Walton Pacelli de Andrade - ECS-005-2020-R0 – Controle Tecnológico do Concreto Compactado com Rolo aplicado em Gongo Soco.

Relatório RL-1850DD-X-17625 Rev. A. *Detailed Design Utilities / Sul Superior Dam RCC Dam Structure Stability Analysis – Fondation of ECJ Second Subsoil Investigation – Technical Report.*

- Relatório Emitido pela GEOCONTOLE – Rochas – Determinação da Resistência à Compressão Triaxial – ASTM D 2664 – 95 (Obra n°:10817/Sondagem n°: TRA-01 / Lote: 1/ Amostra n°: 12838 - 1) Mina Gongo Soco
- Relatório PUC – RJ - RCC – Studies in Laboratory - Preliminary Results for Gongo Soco – *Dam Restraint - RCC – Studies in Results Laboratory Projeto – Dec 01-20*. Determinação da resistência ao cisalhamento de interfaces concreto – rocha Referente: DEC 01-20 Cliente: Consórcio Minas Mais Relatório Final - Prof. Eurípedes, do Amaral Vargas Jr, Bruno Pinheiro Pires, Victor Nogueira Lima.
- Relatório Consolidado de Controle Tecnológico -Controle Tecnológico do Concreto e Geotécnia Gongo Soco (Contrato n°: 5500060296/ REL-GS-CT- 0003/2020/ Data: 06/04/2020)
- Relatório Técnico - Descomissionamento da Barragem Sul Superior – S4195-F4 - Projeto detalhado utilidades – Barragem Sul Superior Estrutura de Contenção Jusante – CCR - Avaliação do uso de coesão no contato concreto com a fundação.
- Relatório de José Marques Filho - 0GH_20200519RH – Barragens ECJ-CCR – Comentários ao Relatório da RIZZO intitulado “*Review of Laboratory Data and Stability Analysis RCC Backup Dam Gongo Soco Mine*”
- Relatório de José Marques Filho – Comentários ao Relatório “*Review of Laboratory Data and Stability Analysis RCC Backup Dam Gongo Soco Mine*” – 25/05/2020.
- Relatório Emitido pelo CMM - REL-GS-CT-003/2020, emitido em 06/04/2020.
- Relatório REL-MF-CT-0013-2021 - Controle Tecnológico abrangendo o período de julho de 2019 a agosto de 2021, na execução da estrutura de Contenção em Concreto Compactado com Rolo (CCR) da Mina de Fábrica, para o descomissionamento das Barragens Forquilha I, II, III, IV e Grupo.
- Relatório Emitido por Walton Pacelli de Andrade - Obra de Gongo Soco – Vale - CMM GS-CT-003 2020 R0 Abril 2020 Projetista DF+ e Vale Muro de Contenção à Jusante Forquilhas Comentários sobre Carotagens Itabirito-MG ECS-022-2021-R0 17/08/2021 28/09/2021.
- CARMO, J. B. M., Avaliação do Concreto Compactado com Rolo – CCR – Composto com Rejeito de Hematita para Estruturas Massivas – Comissão Nacional de Energia Nuclear – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais – Tese de Doutorado - Belo Horizonte/MG – 2023.