

Dique Reforçado com Geogrelha de PVA na Ampliação de Área de Deposição de Rejeitos Quimicamente Agressivos

André Estêvão F. Silva

Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, andre@huesker.com.br

Cristina F. Schmidt

Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, cristina@huesker.com.br

Leandro Moura Costa Filho

LPS Consultoria e Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, leandro@lps.com.br

Geraldo Paes

Alcoa América Latina, Poços de Caldas, Brasil, geraldo.paes@alcoa.com.br

Leonardo Becker

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, leonardobecker@poli.ufrj.br

RESUMO: Com o objetivo de reduzir o movimento de terra necessário para construção da Área de Disposição de Resíduo de Bauxita número 7 (ARB 7) na fábrica da Alcoa Alumínio em Poços de Caldas, MG, e minimizar os impactos ambientais da obra, foi adotada a solução de aterro reforçado com geossintéticos para alteamento adicional da barragem, acima do dique de terra já existente, em uma extensão de 1.700m. Devido às propriedades agressivas dos rejeitos a serem depositados (sólidos contaminados com soda cáustica, com pH elevado), foi indicado o uso de geogrelhas de PVA com elevada resistência química. Essas geogrelhas apresentam ainda alta rigidez e elevada resistência à tração. Durante a execução, foram adotados rigorosos controles de qualidade na entrega e instalação destes materiais. Nos quatro anos seguintes à sua conclusão, a obra apresentou deformações mínimas nas duas seções instrumentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Reforçado, Geogrelha, PVA, Alta Rigidez, Resistência Química.

1 INTRODUÇÃO

Na refinaria de alumina da fábrica da Alcoa, em Poços de Caldas, MG, as recentes Áreas de Disposição de Resíduo de Bauxita (ARBs) vêm sendo construídas utilizando-se diques perimetrais de aterro compactado com taludes internos de inclinação 1V: 2,5H, taludes externos de inclinação 1V: 2H e bermas intermediárias a cada desnível de 10m. O material para execução dos diques é escavado da área interna delimitada por eles e a geometria para cada ARB é condicionada pela otimização do balanço entre corte e aterro da obra. O fundo e as laterais das áreas de deposição de rejeitos são impermeabilizados por uma geomembrana de PVC com 0,8mm de espessura, aplicada sobre uma camada de 0,4m

de espessura de solo argiloso compactado. O resíduo depositado consta de um lodo silto-argiloso, contaminado com soda cáustica, com pH elevado, de 12 a 13.

As ARBs em operação ocupam áreas de relevo muito montanhoso, com desníveis de 40m e 50m dos topos de encosta em relação aos fundos de vale adjacentes. Pelas características do relevo local, taludes muito extensos podem proporcionar riscos ambientais ao serem locados muito próximos à planície de inundação de um córrego adjacente. Em função disto, e para garantir um balanço econômico entre corte e aterro, para a implantação da ARB 7 foi estudada uma solução de alteamento final do dique perimetral em solo reforçado com face bastante verticalizada, reforçado com geogrelhas de alto módulo de rigidez. A

descrição completa deste projeto é apresentada em Paes et al. (2006).

Em função da característica do lodo depositado, com elevado grau de contaminação por soda cáustica, geogrelhas de PVA foram utilizadas a fim de garantir-se a resistência química do material de reforço, sua durabilidade, em um eventual contato direto com o resíduo contaminado.

2 GEOGRELHAS DE PVA

O PVA (poliálcool vinílico ou álcool de polivinila) é produto da hidrólise do acetato de polivinila em meio básico. Este polímero sintético é usado na indústria para produção de filmes, emulsões, adesivos, fibras e filamentos. Os filamentos de PVA apresentam duas características marcantes: elevada tenacidade e elevada estabilidade química.

As geogrelhas de PVA disponíveis no mercado são ideais em aplicações com solos granulares e solos residuais lateríticos compactados, pois atinge seu pico de resistência a uma deformação de 5%, compatível com as deformações típicas desses tipos de solo (3% a 5%) (McGown, 2000). Assim, mobilizam grande porcentagem de sua resistência máxima nos níveis típicos de deformação de trabalho do solo compactado, resultando em estruturas reforçadas com baixo nível de deformação. Em outras palavras, apresentam grande compatibilidade de deformações com o solo compactado, conforme ilustrado na Figura 1 a seguir:

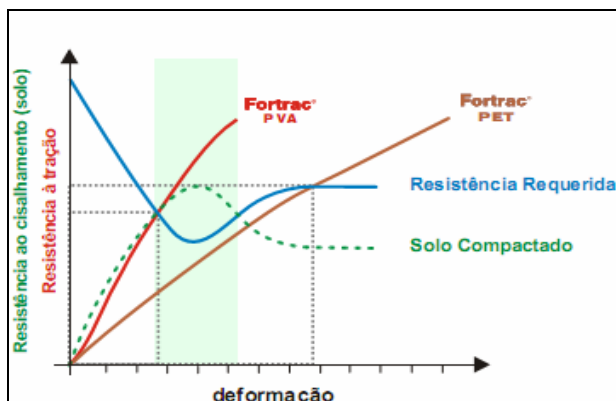


Figura 1: Ilustração esquemática do conceito de compatibilidade de deformações da geogrelha de PVA com o solo.

As geogrelhas de PVA possuem módulo de rigidez aproximadamente duas vezes maior que as geogrelhas de poliéster de alta tenacidade (PET) mais tradicionais. Ou seja, para um mesmo nível de carregamento, as geogrelhas de PVA apresentam em torno da metade da deformação obtida para geogrelhas de PET. Esta característica é particularmente interessante em projetos onde exista uma limitação mais rigorosa quanto às deformações admissíveis.

A Figura 2 apresenta curvas de caracterização mecânica (tensão x deformação) de duas geogrelhas, uma de poliéster (PET) e outra de poliálcool vinílico (PVA).

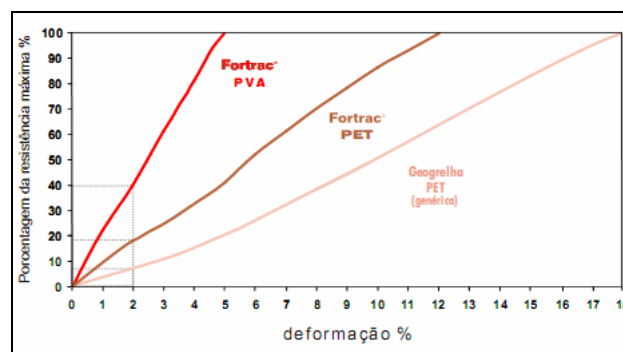


Figura 2. Comparação entre curvas resistência x deformação de geogrelhas PVA com geogrelhas PET.

O comportamento de longo prazo de geogrelhas de PVA é bastante satisfatório. A suscetibilidade à fluência é baixa. Em geral assemelha-se ao de geogrelhas de poliéster.

A Figura 3 mostra as curvas isócronas das geogrelhas FORTRAC MP. Para esta linha de geogrelhas a resistência cai para 65% da resistência máxima inicial após 120 anos de solicitação permanente. A deformação por fluência é também muito baixa, inferior a 1,0% nos mesmos 120 anos.

Da mesma forma que filamentos de PVA apresentam baixa suscetibilidade à fluência, o mesmo ocorre quanto à fadiga por cargas dinâmicas.

Outro aspecto que chama a atenção nas geogrelhas de PVA é sua alta resistência química. O PVA é praticamente inerte em ambientes altamente básicos, o que garante a possibilidade de uso de geogrelhas produzidas a partir deste polímero em ambientes com pH

variando de 2 a 13.

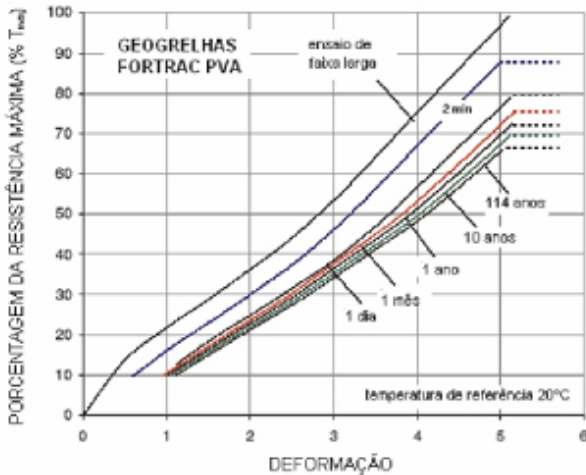


Figura 3. Curvas isócronas das geogrelhas de PVA FORTRAC MP (TRI, 2002).

Em geral, filamentos de PVA apresentam elevada resistência e elevada estabilidade a longo prazo contra o ataque químico de solventes e óleos orgânicos, substâncias com origem petroquímica, álcalis. São também resistentes à hidrólise e à oxidação, mesmo em elevada temperatura.

A Figura 4 apresenta a variação da resistência máxima de filamentos de PVA após imersão em solução básica com pH 13. Destaca-se o fato de que após 25 meses de imersão permanente não houve redução da resistência à tração dos filamentos de PVA.

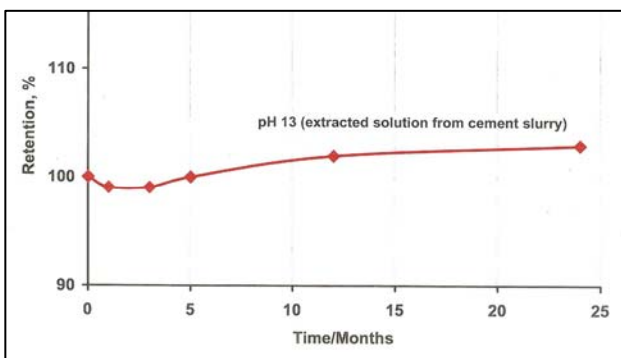


Figura 4. Resistência química a álcalis de filamentos de PVA.

Por todos estes aspectos, geogrelhas de PVA configuram-se como o reforço ideal para aterros reforçados, dentre os materiais disponíveis atualmente no mercado de geossintéticos. Isto é especialmente verdade no caso de ambientes contaminados ou com presença de substâncias que alterem o pH normalmente neutro do solo.

3 O PROJETO

As premissas básicas do projeto da ARB 7 precisavam atender às seguintes condições:

- Capacidade de armazenamento do reservatório de cerca de 1.480.000m³.
- Geossintéticos de reforço constituídos de polímeros resistentes à soda cáustica.
- Altura do muro em solo reforçado de 5m e talude externo com inclinação de 5V:1H.

A configuração geral do dique perimetral com o topo em aterro reforçado é apresentado na Figura 5.

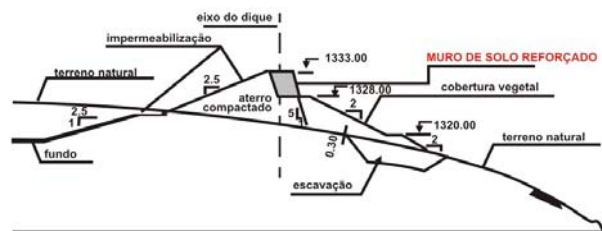


Figura 5. Seção transversal tipo do dique superior.

Pela Figura 5, verifica-se a grande extensão necessária para a implantação do talude externo, caso o alteamento do dique fosse feito em aterro com inclinação convencional.

A escolha da geogrelha partiu não só da premissa de resistência química à soda cáustica, mas também de critérios de otimização de custos e da qualidade da obra. Dentre as geogrelhas compatíveis com os requisitos de resistência química (as geogrelhas de poliéster mais tradicionais foram descartadas por esta razão), as geogrelhas de PVA se mostraram a melhor opção por apresentarem adequada condição mecânica e baixo fator de redução por fluência.

Estas características possibilitaram a otimização dos espaçamentos entre camadas, de 0,4 a 0,6m. O dimensionamento levou à adoção de um muro com geogrelhas de PVA com resistências nominais de 35kN/m e 55kN/m.

A otimização do dimensionamento levou à especificação de painéis de geogrelha com resistência nominal de 55kN/m nas 6 camadas inferiores e de geogrelhas com resistência nominal de 35kN/m nas 3 camadas superiores (Figura 6). A proteção externa da face consiste em bolsas de solo orgânico com sementes,

envelopadas com as geogrelhas, e uma biomanta para controle da erosão, que cobre toda a superfície, posteriormente hidrossemeada. O comprimento total da contenção é de 1.700m, com altura de 5m em toda a extensão.

4 EXECUÇÃO DA CONTENÇÃO

O alteamento do dique em aterro reforçado precisou ser parcelado em duas etapas de execução, durante os períodos de seca de 2001 e 2002. Isso foi necessário devido ao grande volume de movimento de terra frente ao período sem chuvas relativamente curto na região.

Para a execução do aterro reforçado, utilizou-se solo residual de sienito nefelínico, silto-argiloso, com porcentagem de finos (passantes na peneira #200) de 74,2% e índice de plasticidade de 22,5% (Becker, 2006).

Durante toda a execução do aterro reforçado foram adotados controles rigorosos de geometria, através de medições topográficas, e de compactação. Pelo menos uma amostra de solo para verificação das condições de compactação em campo foi retirada diariamente ou a cada 500m³ de aterro executado.

A Figura 7 apresenta de forma ilustrativa e genérica o procedimento construtivo adotado na execução da contenção.

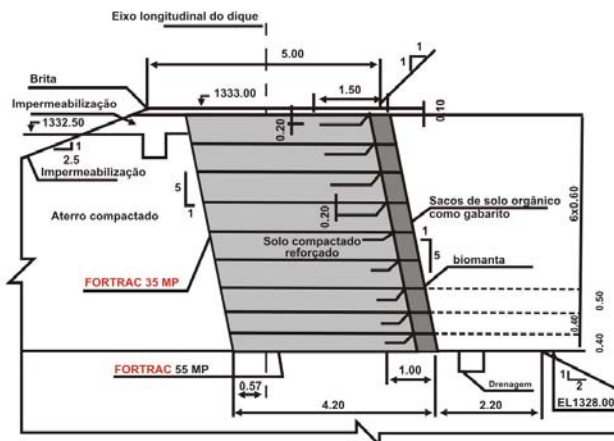


Figura 6. Seção transversal tipo do aterro reforçado.

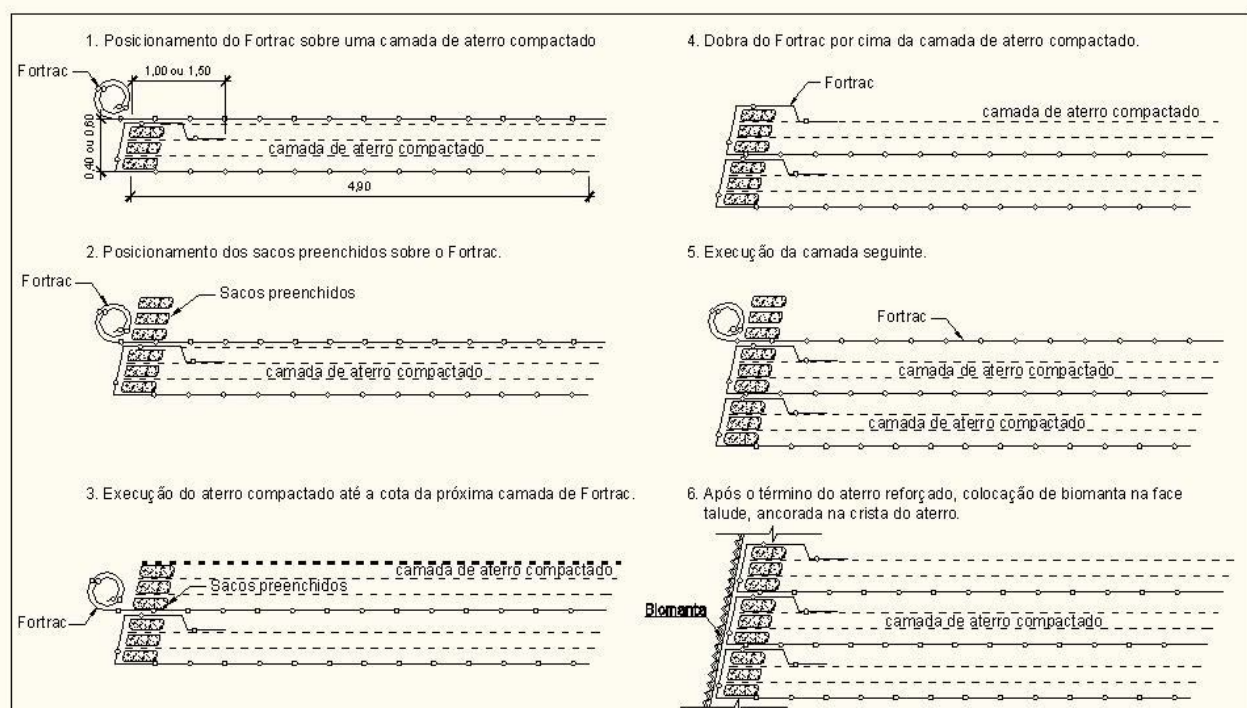


Figura 7. Procedimento construtivo da contenção no alteamento do dique perimetral da ARB 7.

Devido ao grande número de operações subsequentes durante a construção da ARB 7, das quais a construção do aterro reforçado foi uma das mais críticas, especial atenção foi dada ao planejamento cuidadoso de cada etapa,

incluindo ajustes nos procedimentos de execução, de forma a manter a produtividade e o cronograma da obra. Na primeira fase da obra, obteve-se uma produtividade em torno de 115m³ de aterro reforçado por dia. Depois de

alguns ajustes e já com mais experiência, o uso de duas equipes independentes de trabalho a produtividade média subiu para 260m³ por dia, com picos de 300m³ por dia, durante a segunda fase da obra, no ano seguinte (Paes, 2006).

5 CONTROLE DE QUALIDADE E GARANTIA DAS GEOGRELHAS

Procedimentos de controle de qualidade e garantia das geogrelhas foram adotados durante sua fabricação e instalação. Neste sentido, foram exigidos do fornecedor a apresentação dos seguintes documentos:

- Certificados de qualidade assegurada de fabricação e controle de qualidade da empresa fornecedora;
- Laudos de conformidade com as especificações das geogrelhas através de ensaios em laboratório independente, durante a licitação, com a determinação da resistência e do módulo de rigidez à longo prazo;
- Resultados dos ensaios de resistência à tração das geogrelhas depois de sua imersão em líquidos cáusticos com pH=13;
- Resultados de testes de controle de qualidade, com resistência à tração a curto prazo para cada lote de geogrelha produzido e entregue na obra (ensaios de recebimento). As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo dos valores médios deste controle.

A instalação cuidadosa das geogrelhas em campo também foi uma preocupação, com atenção ao comprimento e sobreposição dos painéis. O correto posicionamento, dos painéis bem esticados foi garantido pelo piqueteamento dos mesmos assim que eram instalados. O cuidado no posicionamento do gabarito frontal também foi uma preocupação. Estes procedimentos de controle permitiram uma avaliação de perdas do corte das bobinas, de sobreposição e de danos de instalação, iguais respectivamente a 1,5%, 1,7% e 4,2% da quantidade total de geogrelhas entregues. O total de 7,4% de perdas reais aproximou-se bastante do valor previsto, de 7%.

Tabela 1. Resumo dos valores médios do controle de qualidade das geogrelhas Fortrac 35/20 MP entregues (Paes, 2006).

Propriedade (longitudinal)	Valor nominal especificado	Lote 1	Lote 2
Força de tração (kN/m)	≥ 35	37,4	37,4
Deformação (%)	≤ 5,0	4,5	4,5
Módulo de rigidez na tensão máxima (kN/m)	≥ 700	831	831

Tabela 2. Resumo dos valores médios do controle de qualidade das geogrelhas Fortrac 55/30 MP entregues (Paes, 2006).

Propriedade (longitudinal)	Valor nominal especificado	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Força de tração (kN/m)	≥ 55	58,1	60,2	60,5
Deformação (%)	≤ 5,0	4,8	5,0	5,0
Módulo de rigidez na tensão máxima (kN/m)	≥ 1100	1210	1204	1210

6 DESEMPENHO DA CONTENÇÃO EM ATERRO REFORÇADO

Para avaliação do desempenho da solução, foram instrumentadas duas seções da obra (estacas E20+15 e E33+12) (Becker, 2006). A instrumentação instalada em cada seção constava de:

- *Tell-tales* nas camadas de geogrelhas localizadas a 40cm, 190cm e 370cm de altura, para avaliação dos deslocamentos horizontais no material.
- Marcos superficiais na face da contenção para medição de deslocamentos verticais e horizontais externos da estrutura, através de levantamento topográfico de precisão.
- Caixas suecas na base da contenção, para instrumentação dos deslocamentos verticais (recalques).

A Figura 8 apresenta esquematicamente a

posição da instrumentação na seção transversal.

As caixas suecas mediram recalques da ordem de 40mm na seção da estaca E20+15 e de cerca de 10mm na seção da estaca E33+12. Não foram observados recalques diferenciais entre os pontos de medição na base das seções.

Os resultados apresentados pelos *tell-tales* mostram o aumento dos deslocamentos horizontais com o alteamento da contenção, com o crescimento das deformações à medida em que as geogrelhas foram entrando em carga. Os deslocamentos horizontais medidos nos *tell-tales* próximos à face são bastante similares aos valores medidos pelos marcos topográficos instalados em alturas semelhantes.

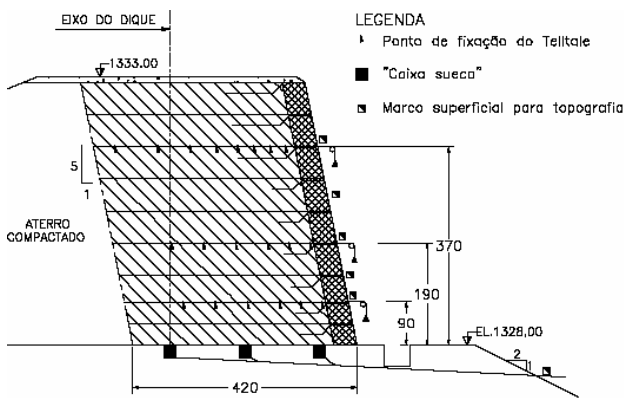


Figura 8. Seção transversal instrumentada (Becker, 2006).

Os máximos deslocamentos horizontais medidos através de marcos topográficos ocorreram a uma altura de 2m da contenção, registrando-se os valores da ordem de 25mm e 50mm, representando 1,25% da altura total construída. Os deslocamentos horizontais considerados confiáveis, nas duas seções instrumentadas, e a proposta de curva de ajuste para os dados são apresentados na Figura 9.

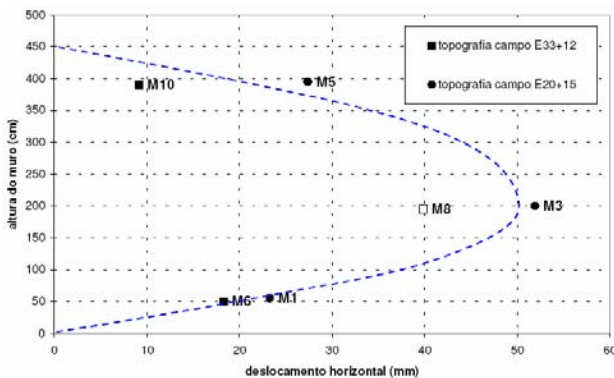


Figura 9. Deslocamentos horizontais da face obtidos por topografia, nas duas seções instrumentadas (Becker, 2006).

2006).

Adicionalmente, foi realizado um teste de carregamento nas seções instrumentadas, utilizando-se um caminhão fortemente carregado, com peso total estimado de 380kN, equivalente a uma sobrecarga aproximada de 20kN/m². Ao final de 12 horas de teste, constatou-se que a instrumentação instalada não indicou nenhuma movimentação significativa na face da contenção. Interpreta-se que isso ocorreu porque, provavelmente, as tensões equivalentes aplicadas pelos equipamentos de compactação foram da ordem de 100kPa, em média cinco vezes maiores que aquelas devidas ao carregamento do teste de sobrecarga. Este exemplo evidencia os efeitos benéficos da compactação no desempenho pós construtivo da estrutura de solo reforçado com reforços de alta rigidez.

O desempenho geral da obra ao longo de 4 anos após sua implantação foi muito bom, sem sinais de algum tipo de comportamento indesejado.

Os pequenos deslocamentos observados durante a construção e as movimentações insignificantes na fase de operação foram condicionados pela alta rigidez das geogrelhas de PVA utilizadas, associada à baixa deformabilidade do solo compactado, características garantidas pelo controle de qualidade na fabricação das geogrelhas e na execução da obra.

7 CONCLUSÕES

A solução em aterro reforçado com geogrelha para alteamento de 5,0m da ARB 7 mostrou-se altamente satisfatória para a ocupação de um terreno montanhoso, com significativa redução do volume de terraplenagem e do impacto ambiental na implantação da obra. Outra consequência direta da solução adotada foi a redução nos prazos de obra.

O comportamento da contenção durante sua execução e nos quatro anos seguintes à conclusão da obra foi muito bom. Este desempenho deve-se em grande parte ao rigoroso controle de qualidade adotado no processo.

O uso das geogrelhas de PVA foi adequado

a este projeto pela sua elevada estabilidade química mesmo em ambientes com pH extremamente elevado, o que definitivamente foi um fator decisivo para o êxito do projeto. O elevado módulo de rigidez, a baixa deformabilidade das geogrelhas de PVA utilizadas garantiram que o comportamento geral da contenção, pelos levantamentos efetuados em duas seções monitoradas, esteja compatível com as previsões feitas em período de projeto e dentro dos limites considerados adequados.

Conforme percebido no ensaio de sobrecarga, as deformações pós construtivas foram muito reduzidas, devido à compactação enérgica do solo reforçado. Cabe ressaltar que tal compactação somente é possível com o emprego de reforços com alto módulo de rigidez, tendo em vista a compatibilidade de deformações (Figura 1).

O sucesso desta solução condicionou a adoção de uma solução similar na ARB 8, atualmente em construção, com 6m de altura.

A Figura 10 mostra a instalação dos painéis de geogrelhas, as Figuras 11 e 12 mostram vistas panorâmicas da obra em diferentes estágios e a Figura 13 apresenta uma vista aérea da ARB 7 em operação.

A solução adotada de alteamento dos diques perimetrais, com mínima movimentação de terra adicional e sem maior ocupação de espaço, garantiu o aumento da capacidade de armazenamento de resíduo de 200.000m³ (e um aumento de vida útil da ARB 7 em 15%).



Figura 10. Detalhe da instalação dos painéis de geogrelhas de PVA.



Figura 11. Vista panorâmica da execução do aterro reforçado.



Figura 12. Vista frontal do aterro reforçado durante os trabalhos de hidrossemeadura da face.



Figura 13. Área de Resíduo de Bauxita #7 em operação

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Alcoa Alumínio S.A. pela autorização para publicar as informações sobre a construção da ARB 7.

REFERÊNCIAS

- Becker, L. (2006). *Comportamento de Geogrelhas em Muro de Solo Reforçado e em Ensaios de Arrancamento*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 322 p..
- McGown, A. (2000) The Behaviour of Geosynthetic Reinforced Soil Systems in Various Geotechnical Applications. *EuroGeo 2000, Bologna*. Italy, pp. 2-23.
- Paes Jr., G., Costa Filho, L. M., Pacheco, E., Silva, A. E. F. (2006) Case history: PVA geogrid reinforced wall for a residue deposit facility, *8th International Conference on Geosynthetics (8ICG)*. Yokohama, Japão. Pp1097-1100
- TRI (2002) “Creep and Creep Rupture Behavior of Fortrac M (PVA) Geogrids (Huesker internal report)”, USA.