

Instrumentação de estrutura de contenção em solo reforçado com paramento vegetado localizada em Aeroporto executivo – São Roque, SP

José Roberto de Campos Costa Junior

Maccaferri do Brasil – Jundiaí – São Paulo – Brasil – josecosta@maccaferri.com.br

Paulo Cesar Belesso Ferretti

Maccaferri do Brasil Ltda – Jundiaí – São Paulo – paulo@maccaferri.com.br

Emerson Mazzo

Maccaferri do Brasil Ltda – Jundiaí – São Paulo – emerson.mazzo@maccaferri.com.br

Maurício Abramento

CEG Engenharia Ltda – São Paulo – São Paulo – abramento@ceg.eng.br

RESUMO: A cidade de São Roque, mais especificamente no km 60 da Rodovia Castelo Branco, foi o local escolhido por um grupo empreendedor para implantar um Aeroporto executivo, com uma das maiores pistas de pousos e decolagens, comparada a outros aeroportos brasileiros, com cerca de 1.900m de extensão. O projeto inicial foi submetido à avaliação da ANAC para posterior detalhamento de soluções e geometrias finais. Obtendo a liberação da ANAC e realizando a compilação dos arquivos geométricos, verificou-se que a cabeceira oeste da pista de pousos e decolagens era responsável pela formação de um talude em aterro (saia de aterro) que invadiria o acesso ao aeroporto, e com este problema iniciou-se um processo de definições técnicas para a solução do mesmo. A primeira proposta de recuar o platô da pista de pouso logo foi barrada pela não aceitação de diminuição do comprimento da pista, visto que a mesma já havia sido revisada e autorizada pela ANAC. A segunda proposta seria reforçar a saia de aterro com geossintéticos, para isto foi estudada a possibilidade da aplicação de geogrelhas, compondo uma estrutura de solo envelopado, sem acabamento de face. Visto a necessidade de se indicar um acabamento frontal que possuísse a função de proteção dos geossintéticos, aumento da rigidez anterior, Integração vegetal e flexibilidade, foi proposta a solução de Terramesh Verde, constituída de malha hexagonal dupla torção, que possui face reforçada com malha eletrosoldada e geomanta de polipropileno. Para a segurança do projeto foram realizadas baterias de sondagens a percussão, análises triaxiais do solo, análises granulométricas, entre outros diversos ensaios que contribuíram para o estudo do solo local e elaboração da proposta técnica. Durante a execução da contenção em solo reforçado com face vegetada, foram realizadas também diversas instrumentações na estrutura, como extensômetro mecânico, medidor magnético de recalque, controle de deslocamento, entre outros, que contribuíram para o controle tecnológico da contenção que possuía em sua seção crítica uma altura de 30m. As instrumentações realizadas na estrutura apresentaram níveis de deslocamentos e deformações (do reforço) aceitáveis para uma contenção em solo reforçado desta amplitude, retratando assim o ótimo desempenho da solução frente a um nível de tensões e esforços elevados, atendendo plenamente a necessidade a qual foi dimensionada.

PALAVRAS-CHAVE: Contenção, Solo reforçado, Instrumentação e Geogrelhas.

1 INTRODUÇÃO

A cidade de São Roque, no interior do estado de São Paulo, mais especificamente no km 60 da Rodovia Castelo Branco, foi o local escolhido por um grupo empreendedor para implantação de um aeroporto executivo privado, com uma das maiores pistas de pousos e decolagens, quando comparado a outros aeroportos privados brasileiros, com cerca de 1.900m de extensão. São Roque é um município brasileiro do estado de São Paulo, situado na Região Metropolitana de Sorocaba, na Mesorregião Macro Metropolitana Paulista e na Microrregião de Sorocaba, com altitude de 771 metros. De acordo com os dados do IBGE, a população estimada no ano de 2014 é de 80.502 mil habitantes, distribuídos em 308,35 km² de área.

A implantação do aeroporto veio de encontro com o atendimento do grande número de centros comerciais que irão estar presentes na região juntamente com a proximidade e facilidade de acesso com a grande São Paulo. O projeto inicial foi submetido à avaliação da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), para posterior detalhamento de soluções e geometrias finais. Obtendo a liberação da ANAC e realizando a compilação dos arquivos de topografia original com a geometria de implantação verificou-se que a cabeceira oeste da pista de pousos e decolagens era responsável pela formação de um talude em aterro cuja saia invadiria o acesso ao aeroporto (Figuras 1 e 2), e com esta situação iniciou-se um processo de definições técnicas para a solução do mesmo.

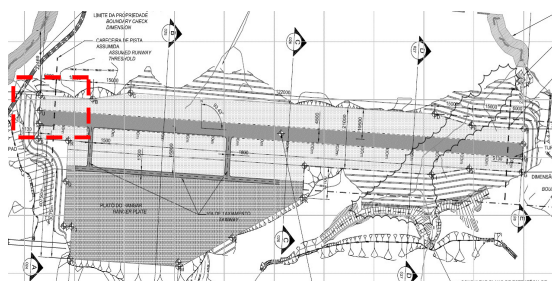


Figura 1 – Planta inicial do empreendimento, no destaque a invasão da saia do aterro no acesso local

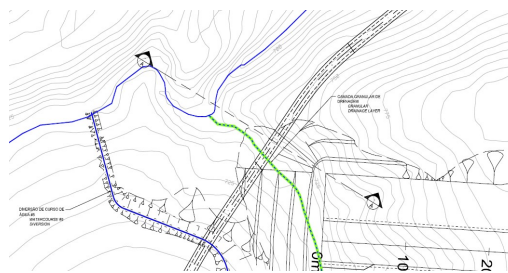


Figura 2 – Projeção da saia do aterro invadindo acesso local, planta inicial do empreendimento

A primeira proposta de recuar e consequentemente reduzir o platô da pista de pouso logo foi barrada pela não aceitação de diminuição do comprimento da pista, visto que a mesma já havia sido revisada e autorizada pela ANAC. A segunda proposta seria a de aumentar a inclinação da saia do aterro, porém reforçando a mesma com geossintéticos, e garantindo que a mesma ficasse dentro da projeção horizontal disponível em projeto (Figura 3), para isto foi estudada a possibilidade da aplicação de geogrelhas, compondo uma estrutura de solo envelopado.

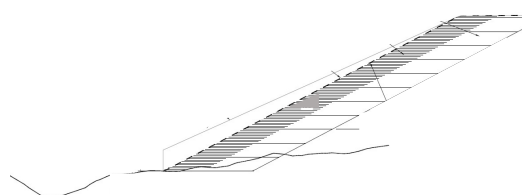


Figura 3 – Seção transversal da saia do aterro reforçado com geossintéticos, proposta inicial

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica de reforço de solo assumiu um papel importante na engenharia civil e especificamente na área geotécnica nas últimas décadas. Os projetos, aplicações e utilização dos geossintéticos como soluções práticas e eficazes tem aumentado bastante nos últimos anos, provando a grande aceitação deste tipo de material em diversas áreas da engenharia. A aplicação dos geossintéticos como elemento de reforço de solos é extraordinariamente vasta. Dentre as principais aplicações, podem-se citar: muros e taludes reforçados, aterros reforçados

sobre solos moles, reforço de cavidades subterrâneas, reforço de fundações e até para proteção e diminuição de tensões em tubulações enterradas. Em todos os casos, a utilização dos geossintéticos apresenta vantagens técnicas, econômicas além de produtivas. Como exemplo, pode-se citar a inclusão de geossintéticos resistentes a tração em aterros, que permitem a estabilização de maciços compactados com uma maior inclinação de face reduzindo assim o volume de solo utilizado, além da possibilidade de utilização dos materiais e jazidas disponíveis na própria obra, o que caracteriza uma opção economicamente muito atraente quando comparada a outras soluções que necessitam especificamente de importação de solo de outras regiões ou outros materiais, que podem muitas vezes inviabilizar a obra. A execução de uma obra de solo de reforçado é relativamente simples, dispensando mão de obra e equipamentos específicos, porém fazem-se necessários um controle adequado dos níveis de energia empregados na compactação do aterro, uma vez que o material compactado trabalha mecanicamente como parte integrada da estrutura. Outra consideração importante em relação aos geossintéticos que resistem aos esforços de tração, comumente conhecidos como geogrelhas, é a produtividade executiva da solução, visto que a mesma normalmente é fornecida em rolos na obra, e a disposição deles é simples e rápida. As estruturas em solo reforçado (ESR), podem apresentar diversos tipos de acabamentos de face, como pedras contidas por malhas metálicas, concreto moldado “in-loco” ou projetado, vegetado, entre outros, esta característica da solução possibilita uma excelente adaptação estética as necessidades de cada obra de acordo a geometria disponível, recursos físicos e financeiros de cada uma.

3 SISTEMA TERRAMESH VERDE

Um sistema desenvolvido para o reforço de aterros e taludes vegetados é o sistema Terramesh® Verde da empresa italiana Maccaferri. Como é possível observar na figura

4, o sistema é composto por elementos de 0,60m de altura por 2,00m de largura com 70° de inclinação para com a horizontal e comprimento do reforço variável em função da necessidade do projeto.

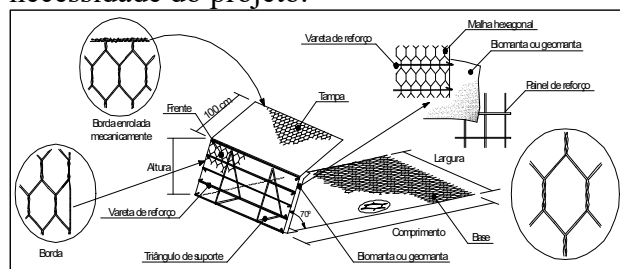


Figura 4 – Elemento do sistema Terramesh® Verde da empresa Maccaferri

Os elementos são confeccionados com uma malha hexagonal de dupla torção com abertura de 8x10cm, com fios de aço com baixo teor de carbono(BTC), Ø= 2,7mm revestidos pela liga (Zn/AL) Galfan+Revestimento plástico.



Figura 5 – Fio de aço que compõe a malha do elemento Terramesh® Verde.

O processo produtivo dos elementos prevê que sejam produzidos através de um único painel que constitui o seu reforço, face e parte superior, garantindo a uniformidade da resistência a tração no instante da solicitação, uma vez que não há emendas no campo e no processo industrial do elemento. Na face inclinada é previsto um elemento para proteção dos finos de solo que pode ser uma biomanta ou geomanta, que são suportados por uma malha eletrosoldada de Ø=8mm e abertura de 15x15 e triângulos internos com Ø=10mm, que garantem a inclinação da estrutura no momento da compactação.

Os elementos Terramesh® Verde permitem dessa forma que sejam realizadas obras de reforço de aterro com a possibilidade de vegetação na face, com aparência similar a de um talude natural, porém com inclinação muito

superior graças a possibilidade da utilização da sua malha de reforço. Na Figura 6 é possível ver a estética final de uma obra com a solução, e a sua face vegetada.



Figura 6 – Terramesh® Verde, totalmente vegetado no autódromo de Imola- Italia

Além disso a malha hexagonal em dupla torção possui um efeito similar ao de uma geogrelha, graças a sua abertura e travamento com o solo, ela permite trabalhar como elemento de reforço, mobilizando resistência por atrito de interface com solo, resistência ao cisalhamento na interface e mobilização da resistência passiva, graças ao efeito 3D proporcionado pelo fio do arame, como ilustrado na figura 7.

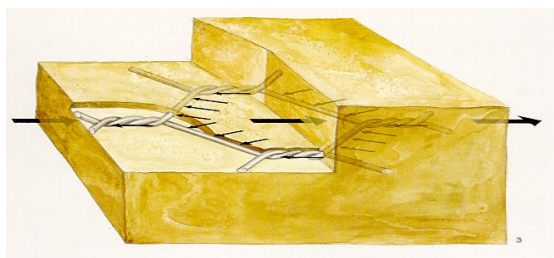


Figura 7 – Malha sendo solicitada como elemento de reforço e mobilizando a resistência passiva do solo.

Ainda assim a malha metálica possui algumas limitações quando se necessita de altos índices de resistência a tração, uma vez que a mesma apresenta resistência máxima de 50,11kN/m, com no máximo 10% de deformação na ruptura, quando confinada no solo. Nestas situações graças ao comportamento mecânico da curva tensão x deformação serem muito parecidos, os elementos podem ser combinados com geogrelhas que apresentam resistências superiores e mesmo nível de deformação na ruptura. Nestas situações as geogrelhas passam a exercer a função de elementos de reforço primários e a malha hexagonal de dupla torção

de reforços secundários, porém extremamente importantes para exercerem um papel de conectores entre os elementos e transmissores de tensão dos reforços até a face da estrutura.

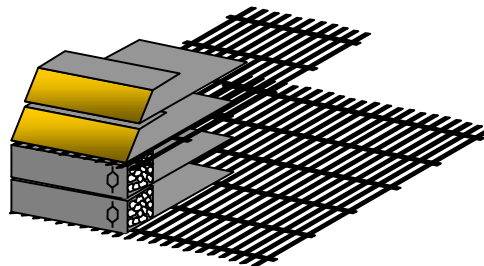


Figura 8 – Conexão do elemento Terramesh® Verde com geogrelhas.

Desta forma dada a gama de opções de resistências de geogrelhas presentes no mercado, o sistema se torna ainda mais versátil permitindo a execução de reforços e estabilização de aterros e encostas de pequenas a grandes alturas.

4 O PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO

Como citado anteriormente a opção para sanar a questão da invasão da saia de aterro foi a de projetar a mesma com uma inclinação maior, porém com uma ESR que fosse capaz de estabilizar esse aterro com a nova proposta de inclinação de 0,7h:1,0v, ou seja 55° com a horizontal e bermas intermediárias para drenagem atendendo a norma brasileira de encostas NBR11682/09. Para estas situações foi escolhido o sistema Terramesh® Verde, graças as propriedades e características descritas no capítulo anterior, porém com inclinação de face desenvolvida especialmente para a obra em questão. A solução adotada também permitiu a adequação gradativa da inclinação dos taludes para as laterais onde não mais seria necessário o reforço e estabilização até a inclinação de 1,5h:1,0v

Dessa forma foi projetado com a solução adotada uma ESR para estabilização e contenção da saia de aterro com 31,02m de altura em sua seção crítica e duas bermas intermediárias conforme ilustrado na figura 9 abaixo.

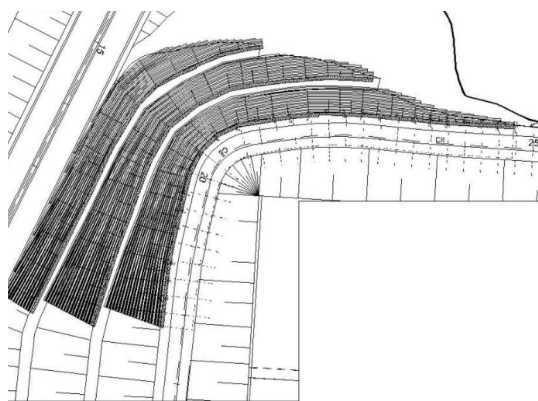


Figura 9 – Vista em planta da implantação da ESR com Terramesh® Verde

Para permitir a estabilização e inclinação previstas em projeto foram utilizadas geogrelhas tecidas em poliéster revestidas em PVC com resistências de 200 e 120kN/m respectivamente do pé ao topo da seção, sendo seus espaçamentos verticais definidos de acordo com as análises de estabilidade realizadas



Figura 10 – Geogrelhas tecidas de poliéster revestidas de PVC.

A interação entre a geogrelha e os elementos Terramesh® Verde, permitiram a realização de um projeto consistente e viável, atendendo aos quesitos técnicos, geométricos e financeiros impostos pela obra.

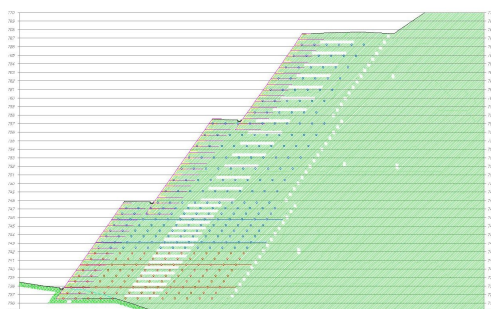


Figura 11 – Seção crítica da ESR Terramesh® Verde com $h_{máx}=31,02m$.

Após a contenção e estabilização foi previsto em projeto a conformação com os taludes e saias de aterro não reforçados nos extremos, prevendo uma transição natural, para que não ocorresse diferencial estético dos taludes, que deveriam ser gramados.

5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Definida a solução a ser utilizada, faz-se necessário a avaliação da estabilidade do talude reforçado. Como a ESR possui inclinação menor que 70° com a horizontal, a estrutura passa a ter a classificação de talude reforçado, segundo BS8006-1/2010 portanto as análises realizadas foram de verificação global e verificação interna. Nesta etapa foi utilizado o software MacStars 2000 da empresa italiana Maccaferri, para a modelagem de cálculo, que considera o método do equilíbrio limite, ou seja, realiza as análises de acordo com o critério rígido-plástico e ruptura por Mohr-Coulumb.

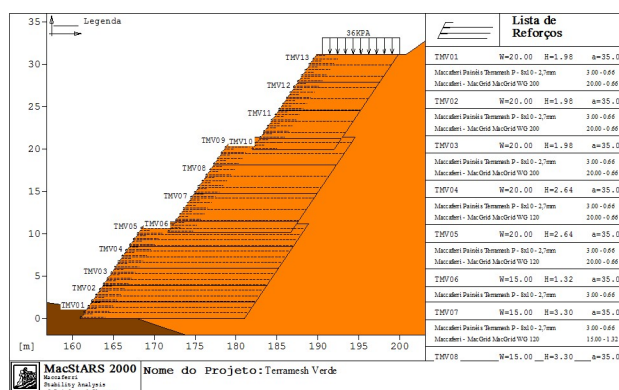


Figura 12 – Modelagem da ESR no software MacStars 2000

Nas modelagens foram consideradas sobrecargas devido à alta intensidade de tráfego das aeronaves, tensões de 36kPa na parte superior do platô e na primeira berma devido ao tráfego de máquinas e equipamentos pesados.

A análise global (fig.13) realizada pelo software foi realizada pelo método de Bishop simplificado e avaliando toda a encosta reforçada e não reforçada. O resultado do $FS=1,525$, estando a estrutura estável para essa análise de estabilidade.

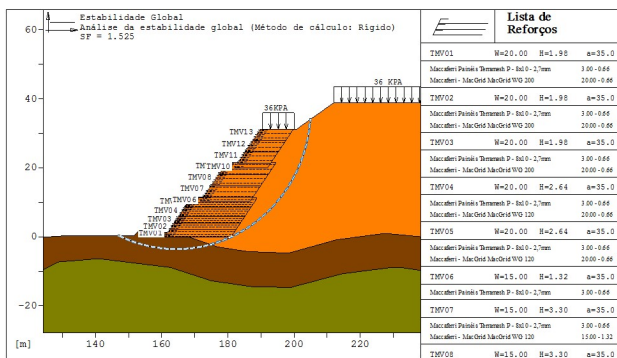


Figura 13 – Análise de ruptura global

Foram realizadas análises de estabilidade interna (entre os reforços), para analisar a eventual ruptura que pode ocorrer entre os reforços. Nesta verificação é possível analisar se o comprimento adotado é suficiente para garantir a ancoragem dos elementos, bem como o nível de resistência requeridas pelo reforço e o espaçamento máximo entre eles.

Nas figuras 14 e 15, é possível evidenciar que o muro inicial necessita de um espaçamento menor (densidade de reforços maior), sendo estes com espaçamento vertical de 0,99m. Posteriormente nos próximos muros é possível termos espaçamentos verticais de 1,90m, e mesmo assim atender as condições de FS, acima de 1,5

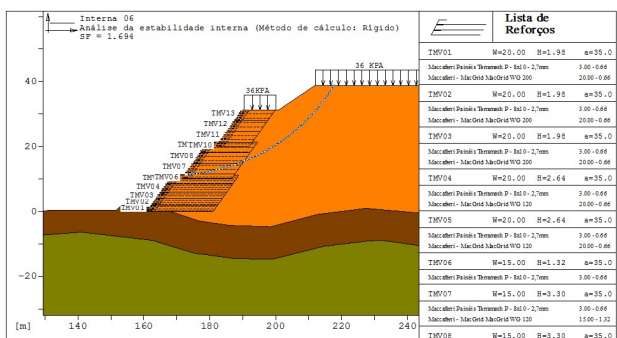


Figura 14 – Análise interna – muro intermediário

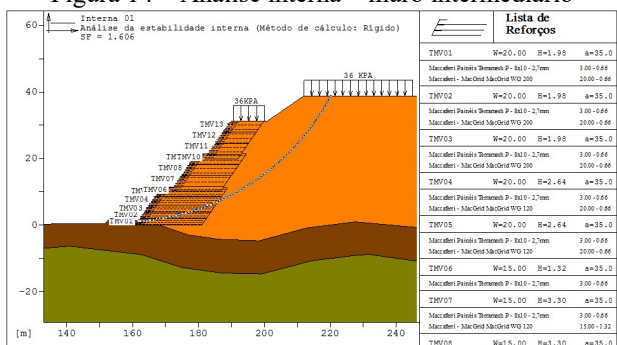


Figura 15 – Análise interna – muro inicial

As análises mostram FS acima de 1,6 atendendo as condições de grau de segurança máximo

estipulados pela normativa brasileira vigente NBR11682/09 – Estabilidade de encostas, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1. FS segundo grau de riscos segundo a NBR11682/09.

Grau de segurança, perdas de vidas			
Grau de segurança, perda materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1.5	1.4	1.3
Médio	1.4	1.3	1.2 *
Baixo	1.4	1.3	1.1 *

* A adoção de fatores de segurança iguais ou inferiores a 1.2 só será permitida quando os parâmetros de resistência do solo puderem ser confirmados por retroanálise, para as condições mais desfavoráveis de poro-pressões

No caso de estabilida de blocos rochosos os fatores de segurança poder ser parciais, incidindo sobre γ , ϕ , C , em função da incerteza sobre estes parâmetros, devendo ser justificado pelo projetista. Deve-se também adotar um fator de segurança mínimo sobre o método de cálculo empregado, igual a 1.1

6 INSTRUMENTAÇÃO

A contenção foi submetida a um controle tecnológico que era composto por extensômetros implantados nos reforços, medidor de recalque magnético, nivelador de bermas, nivelador de seção, piezômetros e deslocamento nos três eixos. Este trabalho tem como função avaliar mais criteriosamente os resultados obtidos nos recalques e nas deformações de face da contenção, para isto serão levados em consideração os dados extraídos do medidor de recalque magnético e dos deslocamentos de face.

6.1. Medidor de Recalque Magnético

O objetivo principal dos medidores de recalque magnéticos é de determinar os deslocamentos verticais nos aterros compactados e nas fundações das estruturas.

O medidor de recalque magnético constituído basicamente por um tubo guia, munido de luvas telescópicas, um anel de referência e diversas placas de recalque sendo que cada uma possui um orifício na posição central com íma permanente, por onde se faz a passagem do tubo

guia. As placas são instaladas concomitantemente a subida do aterro. Na compactação de aterros têm-se o maior período de deslocamentos do maciço, ponto este que exige a instalação e acompanhamento do medidor magnético através de leituras referentes ao anel de referência do instrumento. As leituras podem ser realizadas através de uma trena graduada acoplada ao torpedo de leitura que é colocado dentro do tubo guia. Ao se alcançar a posição de uma placa, o campo magnético do ímã aciona o sensor de leitura na superfície e emite um sinal sonoro e luminoso. Os deslocamentos verticais das placas são definidos por comparação entre uma e outra leitura, sendo a cada leitura medidas as distâncias de cada placa ao anel de referência. Figura 16.

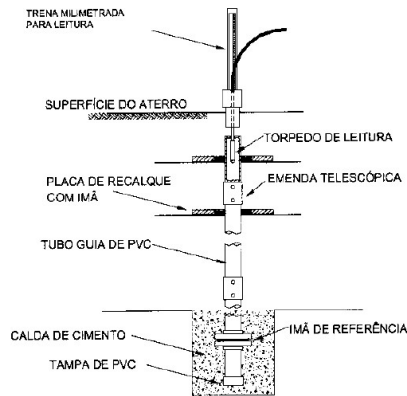


Figura 16. Medidor de recalque magnético

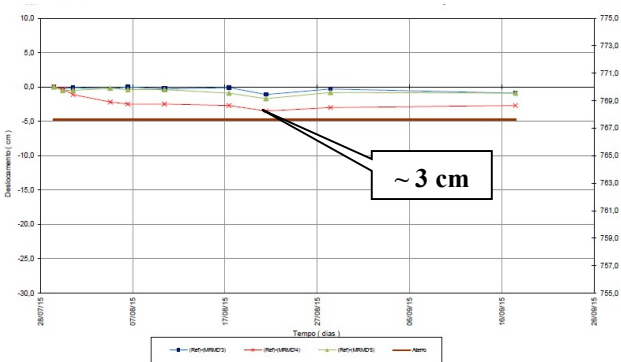


Figura 17. Maior deslocamento medido pelo medidor magnético

Avaliando todos os pontos onde se instrumentaram com os medidores de recalques magnéticos, pode-se observar que taxa de recalque ao longo da execução foi na ordem de 2 á 3cm, no período de 28/07/15 a

aproximadamente 16/09/15, ou seja ao longo de 2 meses de medição, conforme pode-se verificar na Figura 17. Segundo o “Manual Geotechnical Design Standard – Minimum Requirements, 2015” o assentamento máximo permitido para um pavimento Ferroviário e Rodoviário devem atender os valores demonstrados na Tabela 2, ao longo de 40 anos, e considerando que o período de execução é uma etapa em que as contenções apresentam o maior nível de deslocamentos, pode-se concluir que os deslocamentos de 2 á 3cm foram relativamente baixos para a estrutura.

Tabela 2. Assentamento máximo para Aterros ferroviários e rodoviários

Localização	Máximo assentamento em serviço permitido em 40 anos de construção de pavimento (Projeto e exigência)		Máximo assentamento diferencial em qualquer duração (Projeto e exigência)	Máximo assentamento diferencial em qualquer duração (Exigência de intervenção)
	Aterros Ferroviários	Aterros Rodoviários		
Dentro da Zona estrutural (Conforme Cláusula 2.2.(h))	40 mm	50 mm		Projeto muda de categoria devido o assentamento diferencial acima de 5 m de comprimento do pavimento que deve ter manutenção para 0.50%, em qualquer direção da faixa de rodagem durante o período de garantia. Assentamentos não devem criar nenhum degrau abrupto maior que 5 mm.
Fora da zona estrutural	150 mm	Selo granular pulverizado, alfasto sobre camada granular, profundidade total de asfalto e continuamente pavimento de concreto reforçado, 200 mm. Outros tipos de pavimento	Projeto muda de categoria devido o assentamento diferencial acima de qualquer 5 m de comprimento do pavimento que deve ter manutenção para 0.50%, em qualquer direção da faixa de rodagem durante o período de garantia. Assentamentos não devem criar nenhum degrau abrupto maior que 5 mm.	

Segundo a Norma BS 8006, as diversas faces de contenção existentes devem apresentar a capacidade mínima para movimentações verticais descritas na Tabela 3. Pode-se observar que para contenções com face em Geotêxtil ou envelopada não se apresenta nenhum valor exato, mas se destaca a necessidade garantir a boa aparência e a trabalhabilidade do sistema.

Tabela 3. Capacidade de movimento vertical mínima para enfrentar sistemas com assentamentos internos.

Forma estrutural	Capacidade de movimento vertical mínima do sistema
Painéis discretos	Juntas fechamento de 1 em 150 relativo ao topo da altura
Painel único para todo desnível	Capacidade de Movimento Vertical das conexões em 150 relativo topo da altura
Faces semi-elípticas	Distorção Vertical de 1 em 150 relativo ao topo da altura
Geotêxtil envelopando a face	Não especificar limite exceto para aparência ou facilidade de manutenção

6.2. Deslocamentos de Face

Foram avaliados também os deslocamentos ocorridos na estrutura nos três eixos, recalque, deslocamento de face e deslocamento lateral. Com a instrumentação realizada pode-se observar as seguintes faixas de deslocamento ilustrada na Tabela 4.

Tabela 4. Deslocamentos máximos

Deslocamentos máximos (mm)		
Recalque	Face	Lateral
210	90	30

Na Figura 18 tem-se uma das instrumentações, sendo a mais representativa em relação aos deslocamentos ocorridos, no período de 24/02/15 a 22/09/15.

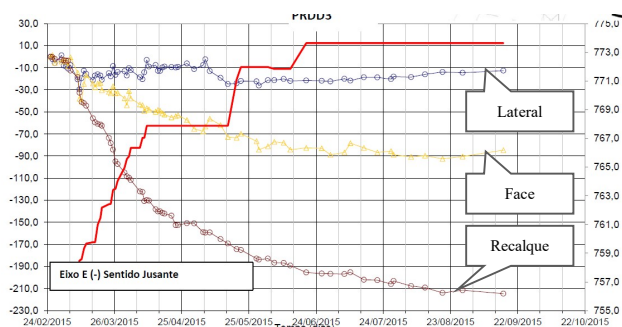


Figura 18. Maiores deslocamentos ocorridos

Segundo R.J. Bathurst 2010 têm-se uma tabela onde são apresentados os máximos deslocamentos admissíveis para contenções com diversos tipos de face, conforme podemos verificar na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo de deslocamentos de face

FONTE	TIPO DE CONTENÇÃO	DESLOCAMENTO DE FACE
EN 14475 (2006)	ARAME E FACE EM GABIÕES	100 mm
PWRC (2000)	TODAS AS FACES	300 mm

Destaca-se o melhor comportamento da solução frente aos deslocamentos de face, pois como apresentado na Tabela 4, a contenção exibiu um deslocamento máximo de face na ordem de 90mm, se enquadrando dentro do limite aceitável, segundo R.J. Bathurst, além de

apresentar um deslocamento muito inferior quando comparado a estrutura de solo envelopado, representado na Tabela 5 como PWRC (2000).

CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o desafio de vencer um desnível de 30m com uma estrutura em solo reforçado com face vegetada foi cumprido, quando verificados os níveis de deformação ocorridos e a trabalhabilidade da solução, mostrando efetivamente a capacidade e a excelência da solução frente ao desafio proposto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Maccaferri do Brasil, a CEG Engenharia e a empresa JHSF.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11682, Estabilidade de Encostas*, 2009
- Bathurst, R.J., Miyata, Y. and Allen, T.M. 2010. Invited keynote paper, Facing displacements in geosynthetic reinforced soil walls. *Earth Retention Conference 3 (ER2010)*, ASCE Geo-Institute, Bellevue, Washington 1-4 August, 18 p
- British Standard. BS 8006-1: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. London, 2010.
- Duran, J., Santos, P., *Encarte Técnico Estruturas de Solo Reforçado com Sistema Terramesh®*, Maccaferri do Brasil, 2005.
- Sayão, A., Sieira, A.C., Santos, P., *Manual Técnico de Reforço de Solos*, Maccaferri do Brasil, 2009.
- Manual Geotechnical Design Standard – Minimum Requirements, February 2015.