

BENTONITAS PARA APLICAÇÃO EM GRAUTES BICOMPONENTES PARA USO EM TÚNEIS (BACKFILL GROUT)

Roberto Dakuzaku & Adriana Falcochio Rivera

S. Takashima Consultoria em Tecnologia da Construção Ltda, São Paulo, Brasil

Pedro Paulo F. Gouveia Filho

Bentonit União Nordeste Ltda

Resumo:

As bentonitas são argilos-minerais do grupo das esmectitas e podem ser encontradas na natureza de diversas formas, sendo as mais comuns a SÓDICA e a CÁLCICA. Estas duas denominações referem-se ao cátion livre em sua composição. No Brasil encontramos naturalmente as bentonitas cálcicas, já as bentonitas sódicas são encontradas naturalmente em depósitos na Argentina (Patagônia) e nos EUA (Estado do Wyoming). As bentonitas cálcicas podem ser transformadas em sódicas através de um processo químico chamado ATIVAÇÃO, que consiste na adição de carbonato de sódio (barrilha) e assim trocando quimicamente o cátion livre. As bentonitas sódicas são as únicas que apresentam inchamento na presença de água, portanto são as que têm mais vastas aplicações na indústria e na engenharia civil.

A capacidade de inchamento é apenas uma das propriedades das bentonitas sódicas, as outras capacidades de interesse neste trabalho são: tixotropia, impermeabilização e resistência a compressão.

Esta bentonita específica para misturas com cimento, foi desenvolvida em 2005 especialmente para a obra da Linha 4 do Metrô de SP. Após a realização da aplicação dos anéis de estabilização da seção em túneis escavados é realizada a injeção de contato entre os elementos e o terreno natural. Para este preenchimento são utilizados grautes denominados bicomponentes, compostos por uma mistura de cimento, bentonita, água e aditivos. A bentonita tem um papel especial na estabilização da calda e no comportamento do graute endurecido, sendo de suma importância a avaliação dos requisitos técnicos necessários e controle para aplicação. Neste sentido, apresentamos neste artigo, as principais características necessárias à bentonita, ensaios para avaliação de desempenho e cuidados no uso e aplicação no graute bicomponente com base na experiência das obras da Linha Amarela do Metrô de São Paulo e Linha Sul do Metrô do Rio de Janeiro.

1 INTRODUÇÃO

“Backfill Grouting”, ou graute bicomponente, é o enchimento do vazio, com graute, entre os anéis de concreto e a escavação, no Backup do TBM, processo fundamental em obras de túneis executados por Shield TBM. Este método de natureza polivalente proporciona excelente estabilidade de empuxo durante escavação de tuneis com tuneladoras EPB, Slurry TBM e outros equipamentos semelhantes minimizando problemas causados por afundamentos da superfície sobre o túnel em escavação.

O afundamento de superfícies é uma das principais preocupações dos empreiteiros e engenheiros executores de projetos de estruturas subterrâneas e escavação de túneis. Muito vulnerável ao afundamento de superfícies em um centro urbano são os edifícios mais antigos e monumentos importantes que constituem os principais marcos das cidades no mundo inteiro.

Com o objetivo de preservar essas estruturas durante a escavação de tuneis com emprego de máquina tuneladora, um processo de grauteamento para preenchimento do vazio anelar entre a escavação e o revestimento do túnel empregando calda de cimento com adição de bentonita e aditivo acelerador de pega injetável na forma de dois componentes líquidos foi concebido no Japão a mais de 30 anos.

Atualmente, este processo de grauteamento está generalizada nos grandes projetos de túneis em todo o mundo dado sua praticidade e segurança

2 BREVE HISTÓRICO DO USO DE BENTONITAS

Bentonita é o nome usado para uma gama de argilas que podem inchar e gelificar quando dispersas em água. O nome "bentonita" origina-se da descoberta deste tipo de argila perto do forte Benton, EUA, no século XIX. Esta era uma bentonita de sódio natural, e foi explorada extensivamente por muitos anos em Wyoming e Dakota para perfuração de poços de petróleo.

A bentonita é um mineral natural, o que significa que levou milhões de anos para se tornar o que é. A história da bentonita começou em vulcões centenas de milhões de anos atrás, quando a lava derretida foi ejetada (muitas vezes de forma explosiva) espalhando cinzas vulcânicas sobre a maior parte da terra existente. À medida que essa cinza pousou na terra, foi erodida pela chuva e pelo vento até o local de descanso mais baixo que pôde encontrar, há mais de noventa milhões de anos. Com o tempo, os sedimentos vulcânicos se acumularam para formar várias camadas de várias profundidades e com menos água. Essa concentração tornou elementos como o sódio livremente disponíveis para reagir com os silicatos, alumínio e magnésio que constituem a espinha dorsal das moléculas de bentonita.

Pela sua capacidade de se combinar com a água formando gel, o seu uso se multiplicou ao longo do tempo, sendo aplicada atualmente em mais de 100 áreas, sendo que podemos destacar as seguintes:

- Fundição
- Pelotização e Aglomeração
- Filtrantes e Clarificantes
- Construção Civil
- Perfuração
- Tintas
- Nutrição Animal
- Papel
- Cerâmica
- Revestimentos Geossintéticos

Na construção civil, seu principal uso é na estabilização de paredes de escavação, principalmente em estacas escavadas e paredes diafragmas.

Em território brasileiro, a exploração da bentonita para construção civil se iniciou na década de 50.

2.1. GRAUTE BICOMPONENTE

No início de 1983 [1], a Nishimatsu Construction Company estava trabalhando no metrô de Midosuji na cidade de Osaka – Japão em um trecho de túnel com 1,3 km com uma tuneladora fabricada pela Kawasaki Heavy Industries com diâmetro de 6,98 m tipo Slurry TBM. Durante a fase de projeto, preocupações foram levantadas quanto aos problemas percebidos decorrentes da combinação de conduzir a tuneladora em uma curva, ao mesmo tempo em que terminava uma direção, uma vez que a parte final da direção incluía uma curva com raio R 160m. A Nishimatsu Construction Corporation solicitou à TAC Corporation que criasse uma solução para mitigar os riscos representados pelo corte excessivo em uma posição tão vulnerável. Duas soluções foram apresentadas, a primeira, grautear com uma mistura de argamassa com alto teor de ar contendo 80% de ar incorporado, opção descartada devido ao fato de que uma vez que a máquina começou a se movimentar através da curva, a argamassa sacrificada em um lado, seria substituído por um novo vazio no lado oposto do TBM, negando assim o efeito do material injetado no primeiro ponto.

A segunda, grautear com uma combinação de argila-areia, cinzas volantes e espessante para criar um material não endurecido com alta viscosidade e baixa resistência ao atrito para lubrificar a máquina durante o avanço no trecho de curvas, opção que foi adotada.

Durante o avanço, esta opção fluiria livremente ao redor de toda a máquina aliviando a resistência ao atrito em torno do TBM e ao mesmo tempo, evitar o colapso da parede escavada. O empuxo necessário para avançar o TBM pela curva é reduzido. O material denominado "Clay-Shock", foi adotado em conjunto com um sistema de estabilização de segmento denominado "Método Mini-Packer", e a curva difícil foi conduzida, completando o túnel conforme planejado.

Apenas algumas semanas depois que o túnel foi concluído e os dados finais foram analisados pelo escritório da Nishimatsu na cidade de Osaka, foi descoberta uma variação perceptível no assentamento sobre o shield durante um avanço em linha reta e um avanço em curva. Durante os avanços em linha reta, em alguns trechos, havia um recalque mensurável de 3 a 5 mm, e durante os trechos curvos esperavam-se que fossem maiores. No entanto, o recalque durante o percurso curvo foi reduzido a zero. A única diferença foi a injeção de Clay-Shock no sobre corte durante as curvas.

Com base nesse resultado, um novo processo empregando materiais não endurecidos para limitar o recalque durante a escavação foi descoberto. Essa descoberta se tornaria a base de um novo ramo de pesquisa de materiais para a TAC Corporation, que orientaria os próximos 30 anos de desenvolvimento de materiais para a empresa.

No Brasil, o graute bicomponente foi utilizado pela primeira vez no Lote 1 da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo.

No metrô do Rio de Janeiro, trecho Sul, em função do tipo de solo escavado arenoso, exigiu-se da bentonita um bom desempenho não somente no graute bicomponente, mas também na estabilização do solo da frente de escavação nas paradas hiperbáricas para manutenção dos equipamentos e trocas dos discos de escavação. A partir desta experiência, a necessidade de verificar diversas propriedades da bentonita para sua aplicação em tuneis mecanizados foi introduzida.

3 TIPOS DE BENTONITA

As bentonitas são argilos-minerais oriundos de derramamentos vulcânicos. Na natureza encontramos diversos tipos de bentonitas, que são classificadas e nomeadas pelo CÁTION LIVRE, sendo as mais encontradas na natureza a BENTONITA CÁLCICA e a BENTONITA SÓDICA.

Em nosso país, só há ocorrência de bentonitas cálcicas. Elas são extraídas principalmente nos estados da Paraíba e da Bahia.



Figuras 01 e 02: Vista aérea da planta da Bentonit União para extração e beneficiamento de bentonita cálcica no estado da Paraíba (arquivo pessoal)

As BENTONITAS SÓDICAS são encontradas principalmente nos Estados Unidos, no estado de Wyoming e na região da Patagônia Argentina. Esta tem um uso muito maior e seu emprego alcança quase todas as cadeias produtivas da indústria.

É utilizada na fabricação de sabões em pó, como elemento agregador para areia em moldes de areia em fundição, como agente aglomerante para pelotização de minérios de ferro, como areia sanitária para pets, fluido de perfuração de poços de petróleo, produtos de higiene e na indústria da construção civil como fluido estabilizante de solos em escavações de Paredes Diafragmas, fluido de estabilização em perfurações direcionais (HDD), como componente do traço de coulis (bentonita+cimento+areia+água) impermeabilizante de CUT-OFFs em barragens de terra, como barreira secundárias em misturas com o solo como impermeabilizante em aterros sanitários e como elemento de aterramento para dissipação de energia e calor em lançamentos de cabos de alta voltagem.

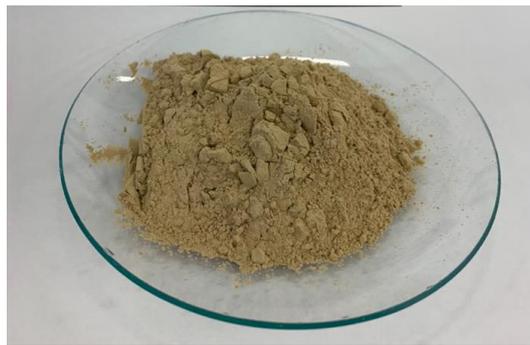


Figura 03: Exemplo de bentonita sódica ativada marca Permagel, fabricada pela Bentonit União (arquivo pessoal).

As bentonitas cálcicas podem ser transformadas em sódicas através da adição de barrilha e efetuar assim a troca catiônica dos cátions livre de cálcio pelos de sódio, tornando assim a bentonita cálcica em uma bentonita sódica ativada, que possui as características da bentonita sódica natural.

As bentonitas sódicas ativadas podem ser de alta qualidade ou de baixa qualidade, isto se dá pelo processo adotado na ativação, isto é, na troca do cátion livre cálcio pelo cátion livre sódio. O processo de ativação de uma bentonita cálcica para uma bentonita sódica ativada se dá através do fluxo apresentado na figura 04.

O processo de ativação é um processo delicado, aonde a bentonita cálcica se transforma em bentonita sódica. O processo deve ser muito bem controlado e rigorosamente supervisionado, a fim de garantir uma taxa alta de ativação, isto é, a troca catiônica do cátion cálcio pelo cátion sódio.

O fluxograma (figura 04) mostra a sequência das várias etapas da ativação, sendo a etapa de adição da solução de barrilha a que requer maior atenção durante todo o processo. A barrilha em solução é dispersa sobre o monte de argila, ainda cálcica e quando em contato com os cátions livres de cálcio ocorre assim a troca catiônica e agregando o cátion livre sódio.

A produção da bentonita sódica ativada especialmente desenvolvida para misturas com cimento, há uma etapa a mais, a fim de garantir a adição de mais cátions livre de sódio, o que irá garantir que todas as propriedades requeridas e desejáveis da bentonita ocorram mesmo em presença de cimento. É muito importante utilizar uma barrilha de qualidade para a ativação. As bentonita sódicas ativadas especialmente desenvolvidas para misturas com cimento são um fator para se alcançar o sucesso de um graute bicomponente de qualidade.

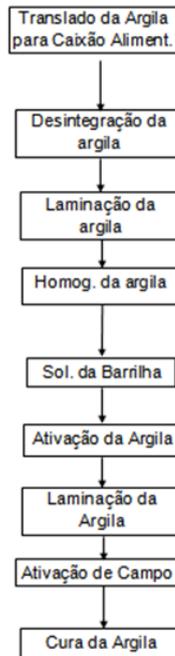


Figura 04: Fluxograma do Processo de Ativação

4 USO DA BENTONITA EM DEMAIS ÁREAS NO PROCESSO DE TÚNEIS MECANIZADOS

Além do uso em grautes bicomponentes, a calda composta por água e bentonita, também denominada como “slurry”, é utilizada também para a lubrificação da cabeça de perfuração da tuneladora e como para estabilização da frente de escavação nas paradas de manutenção dos discos de corte.

Durante o desenvolvimento dos trabalhos de qualificação da calda para a Linha 4 Sul do Rio de Janeiro, foi tomado um cuidado especial na avaliação da formação do “cake” na frente de escavação. O sistema utilizou um equipamento que funcionou no sistema EPBM (Earth Pressure Boring Machine) no trecho de escavação em areia e possuía 11,90m de diâmetro, onde pouco se conhecia o comportamento do conjunto e quais parâmetros considerar na formação do “cake” na frente de escavação. Foi sim uma aplicação diferenciada da bentonita numa EPBM, uma mudança feita especificamente para este projeto, conforme relata em detalhe Maidl & Pierri [9].



Figuras 05 e 06: Silos de estocagem de calda (slurry) composta por bentonita e água e misturador, ambos no interior de túnel de apoio durante a execução da Linha 4 Sul do Metrô do Rio de Janeiro (arquivo pessoal).

Na época da execução, tinha-se experiência apenas com túneis mecanizados de grande diâmetro em solos argilosos, o que facilitava a estabilização da frente de escavação sem grandes tratamentos

adicionais. Solos arenosos argilosos foram escavados também em São Paulo, mas não com tão baixa coesão como as areias do Rio de Janeiro. Outro requisito é que esta calda composta por água e bentonita fosse estável por um longo período, para que não ocorresse a decantação de sólidos em tanques ou tubulações, ocasionando o seu entupimento.

Devemos considerar que túneis em áreas urbanas tem pouca área disponível para estocagem de materiais, assim a bentonita aplicada nas obras tem como pré-requisito atender tanto a formulação de grautes bicomponentes como as caldas de lubrificação e estabilização da frente de escavação.

5 CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS PARA USO EM GRAUTE BICOMPONENTE

As bentonitas sódicas possuem a capacidade de inchamento em presença de água e é este inchamento que fornece as principais características para a construção civil: inchamento, filtrado e formação de "cake".

Para a mistura com cimento foram desenvolvidas bentonitas especiais, com grande quantidade de sódio livre, capaz assim de inibir a troca catiônica com o cálcio presente no cimento.

Quando as bentonitas possuem mais cátions livres de sódio, estes são utilizados como cátions de sacrifício, isto é, não há como inibir a reação de troca catiônica, mas podemos utilizar cátions de sacrifício, mantendo assim as características desejáveis das bentonitas. Por isto quando na presença de cimento, seja nos coulis (água+areia+bentonita+cimento) ou nos grautes bicomponentes é desejável a utilização de bentonitas sódicas especialmente desenvolvidas para mistura com cimento.

Quanto a sua composição química, não dispomos de normas nacionais para definição de parâmetros, porém, como referência, apresentamos na tabela 1 a composição química de uma bentonita sódica ativada para uso em caldas e graute bicomponente.

Principais componentes	% em peso
Sílica (SiO ₂)	64
Alumina (Al ₂ O ₃)	15,5
Ferro (Fe ₂ O ₃)	5,2
Magnésio (MgO)	2,0
Cálcio (CaO)	1,2
Sódio (Na ₂ O)	3,6
Óxido de Titânio (TiO ₂)	<1
Óxido de Potássio (K ₂ O)	<1
Perda ao Fogo	9,0

Tabela 1: Principais componentes da bentonita sódica ativada Permagel da Bentonit União.

Em referência às propriedades da bentonita, assim como no caso das características químicas, temos como referência a experiência dos fabricantes conforme requisitos e necessidades dos empreendimentos, não tendo uma norma nacional específica para sua caracterização.

Na tabela 02 a seguir apresentamos ensaios de propriedades gerais de uma bentonita sódica ativada. Estes valores podem variar conforme fabricante e necessidade de adequação da bentonita à qualidade da água disponível para uso.

Propriedade	Valor
Densidade real (g/cm ³)	2,60 g/cm ³
Umidade	máximo 14%
Viscosidade (4,6% p/p) - APARENTE	mínimo 14cP
Viscosidade (4,6% p/p) - PLÁSTICA	mínimo 4cP
Inchamento	mínimo 25 ml/2g
pH (2g/100ml)	mínimo 9,5
Filtrado API	máximo 24 ml/30'
Resíduo arenoso	máximo 2 %

Tabela 2: Propriedades gerais da bentonita sódica ativada Permagel da Bentonit União.

5.1. ÁGUA

A água a ser utilizada na dispersão da mistura, primeiramente da bentonita, deve ser limpa, pH neutro e não pode ser salobra.

A finalidade da água é de extrema importância na produção do graute bicomponente. A sua qualidade está intrinsecamente ligada a qualidade final deste. A água tem a função inicial de promover a dispersão de bentonita e garantir assim as propriedades desejáveis dela. Para tanto essa água não pode ser salobra e ter pH neutro.

A água salobra inibe a reação de inchamento da bentonita, não sendo possível assim sua utilização no graute bicomponente. O pH neutro garante ambiente adequado para que as lâminas da argila se expandam e produzam o inchamento adequado. Para que a mistura de água e bentonita se torne um líquido coloidal é necessário análise da qualidade da água e tais características sejam rigorosamente observadas e controladas. Um ensaio básico para a avaliação da água para uso em caldas é a avaliação de sua dureza, quanto mais minerais pode ser necessário um ajuste com o uso de barrilha ou a incorporação desta na composição da bentonita, evitando a necessidade de instalação de equipamentos para tratamento da água.

Considerando o contato do graute bicomponente endurecido com o concreto dos anéis de revestimento do túnel, recomendável a execução de ensaios das amostras de água de amassamento e do lençol freático conforme norma ABNT NBR 15900.

6 ENSAIOS PARA SELEÇÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO

Para a seleção da bentonita e sua posterior aplicação em caldas e grautes bicomponentes, é necessário avaliar as especificações de projeto, instalações para armazenamento da bentonita e operações da produção, bem como, prazo de estocagem antes do uso e logísticas de transporte.

De um modo geral, com base na experiência adquirida com a tecnologia do graute bicomponente parâmetros de referência são apresentados na tabela 3.

Principalmente em relação à calda (slurry) para estabilização da frente de escavação quando da realização de intervenções hiperbáricas, podem ter diferenças quanto aos parâmetros necessários, bem como, pode ser necessário o uso de polímeros para garantia da formação do "cake" adequado.

REQUISITOS DA BENTONITA PARA USO EM CALDAS E GRAUTES BICOMPONENTE		
<i>Requisito</i>	<i>Calda: Água + 5% Bentonita (slurry)</i>	<i>Bicomponente - Componente A: Cimento + Água + Bentonita + Aditivo Retardador</i>
<i>Fluidez no funil de Marsh (d=5mm)</i>	<i>entre 30s e 35s -</i>	<i>entre 30s e 50s</i>
<i>Estabilidade da solução</i>	<i>vida útil 6 horas</i>	<i>vida útil 6 horas</i>
<i>Exsudação / Expansão</i>	<i>máximo 2% em 2 horas</i>	<i>máximo 4% em 2 horas</i>
<i>Densidade</i>	<i>Variável conforme composição</i>	<i>Variável conforme composição</i>
<i>Viscosidade Aparente</i>	<i>15-25cP</i>	-
<i>Viscosidade Plástica</i>	<i>11-12cP</i>	-
<i>Espessura do Reboco</i>	<i>Entre 1 e 2mm</i>	-
<i>Filtrado API</i>	<i>15-21 ml/30s</i>	-

Tabela 3: Requisitos de referência para avaliação de composições para calda e componente A do graute bicomponente considerando ensaios realizados em laboratórios das obras do metrô do Rio de Janeiro e Fortaleza.

Para recebimento do material em campo, durante a execução dos serviços, é realizada primeiramente uma inspeção visual para avaliação da modificação de coloração ou existência de grumos, neste segundo caso é realizado um peneiramento para avaliação de material aglomerado. A seguir é realizado o ensaio de avaliação da viscosidade no funil de Marsh e estabilidade da solução. O ensaio de exsudação também pode ser realizado.

Para a caracterização do componente A do graute bicomponente, recomendados a avaliação do exposto no trabalho GRAUTE BICOMPONENTE - CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO E PRÁTICA RECOMENDADA PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO de mesma autoria deste artigo, apresentado concomitantemente com este trabalho.

Para os ensaios de viscosidade, espessura do reboco ("cake") e filtrado são utilizados os procedimentos presentes na norma Petrobrás EP-1EP-00011-B, que estão também descritas no trabalho Bentonite Support Fluids In Civil Engineering da Federation Of Piling Specialists (UK). A seguir apresentamos o detalhamento dos ensaios apresentados na tabela 2.

6.1 FLUIDEZ E ESTABILIDADE DA SOLUÇÃO

Nesta primeira etapa, a fluidez da calda é avaliada através de ensaios com o cone de Marsh para lama, (diâmetro do furo de 5mm). Como referência a dosagem mais utilizada é de 5% de bentonita em relação ao peso de água. Esta quantidade pode variar em função da qualidade da bentonita e dureza da água.

A estabilidade da solução é de extrema importância, pois embora os tanques de estocagem tenham circuladores, os sólidos podem se decantar ao longo da tubulação, o que pode causar entupimentos na rede e nem sempre há instalação para recirculação da calda.

O ensaio consiste basicamente na mistura da água com a bentonita, de forma gradual, com auxílio de misturador coloidal, por período de 3 a 5 minutos, até que se observe uma mistura homogênea e sem grumos. Esta calda então é vertida no funil e o tempo cronometrado para que se encha uma proveta de um litro. Em média este tempo está entre 30s e 32s. Tempos maiores podem indicar uma fluidez não adequada quando se aplica no graute bicomponente.



Figuras 07 e 08: Mistura de calda de bentonita e água e ensaio de fluidez (RIVERA ET ALL, 2019).

6.2 EXSUDAÇÃO / EXPANSÃO E DENSIDADE

A exsudação e expansão da calda (figura 09) são avaliadas conforme procedimentos da ABNT NBR 7681-3: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão que consiste basicamente no preenchimento de uma proveta com 750ml da calda e acompanhamento da sedimentação da bentonita, ou seja, sua separação da água.



Figuras 09 e 10: Ensaio de exsudação e densidade da calda (arquivo pessoal).

Atualmente a qualidade das bentonitas disponíveis no mercado permitem que em até 24 horas não seja possível a determinação da ocorrência da exsudação, porém seu comportamento pode variar muito em função da dureza da água.

Para a determinação da densidade é utilizada uma proveta, vertendo 1 litro do material e pesando-se o conjunto. O valor obtido serve de referência para o controle tecnológico, pois pode variar em função da combinação água e bentonita.

6.3 VISCOSIDADE APARENTE E VISCOSIDADE PLÁSTICA

Os fluidos mais comuns são à base d'água e tem como base a dispersão da bentonita em água, entre outros aditivos. A bentonita age como viscosificante, ou seja, aumenta a viscosidade. Quanto maior a dosagem de bentonita, maior a viscosidade.

São fluidos plásticos (não newtonianos), ou seja, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação e, como consequência, estes fluido podem não ter uma viscosidade bem definida. Por este motivo expressamos a viscosidade como viscosidade aparente (VA), pois depende da taxa de cisalhamento. Outros parâmetros importantes são a viscosidade plástica (VP) e o limite de escoamento. Elas representam o comportamento coloidal da bentonita no fluido.

Para execução do ensaio são necessários os seguintes equipamentos e materiais:

- Balança com precisão de 0,01g;
- Misturador Hamilton Beach com respectivo copo e rotação de 16000 a 20000 rpm (ou multmixer);
- Viscosímetro Fann;
- Água destilada.
- Proveta de 500 ml

O ensaio consiste em preparar a calda conforme exigências de campo ou uma suspensão contendo bentonita e água destilada no misturador tipo Hamilton Beach conforme procedimentos da norma Petrobrás. Esta mistura fica em repouso por 24 horas, em recipiente fechado, à temperatura ambiente;

Para continuidade, a calda é agitada novamente e transferida para o recipiente do viscosímetro.

No viscosímetro a 600rpm, a calda é agitada durante 2 minutos, e efetuar a leitura (L600) e imediatamente modificada para 300rpm e, após 15 segundos, é feita nova leitura (L300).

Em termos práticos, um bom fluido deve atender um mínimo de 15cP de VA e 5cP de VP, para a contenção de frentes de escavações, tem-se os valores da tabela 2 de referência: Viscosidade Aparente de 15 a 25cP e Viscosidade Plástica de 11 a 12cP.

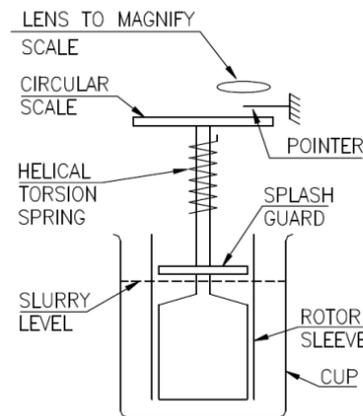


Figura 11: Viscosímetro tipo Fann (FEDERATION OF PILING SPECIALISTS, 2006).

6.4 ESPESSURA DO REBOCO E FILTRADO

Os fluidos também devem apresentar baixo volume de perda de água para o solo, por isso determinamos o volume de filtrado (VF) através de um método de laboratório que consiste em passar o fluido por um elemento filtrante padrão (papel de filtro) com a ajuda de um filtro prensa. O volume filtrado é então coletado e medido. Quanto menor esse volume, melhor o fluido. A altura desta torta de sólidos no papel de filtro também é um reflexo de como esse fluido se comportará na prática.

Segundo Medeiros (2010) a filtração estática axial ocorre pela aplicação de um diferencial de pressão unidirecional e axial sobre um volume de suspensão estável de sólidos o qual se encontra em uma célula de filtração comum que apresenta um meio filtrante (figura 12). A diferença fundamental frente à filtração dinâmica reside no fato do fluido estar em repouso quando da sua filtração, que ocorre

perpendicularmente à seção transversal onde se encontra o meio filtrante. A partir do momento que os poros internos estão obstruídos, inicia-se a deposição de sólidos na superfície do meio filtrante e conseqüentemente a formação do reboco externo. A esse processo dá-se o nome de transition loss, uma vez que ela representa o limiar entre a filtração inicial (spurt loss) e a filtração propriamente dita, segunda etapa da filtração estática e a qual já apresenta seu reboco devidamente estável e incompressível. Quando os sólidos suspensos no fluido são predominantemente argilosos, como no caso da bentonita, tem-se a presença de partículas plásticas de caráter laminar, o que favorece a deposição delas paralelamente à superfície do meio poroso.

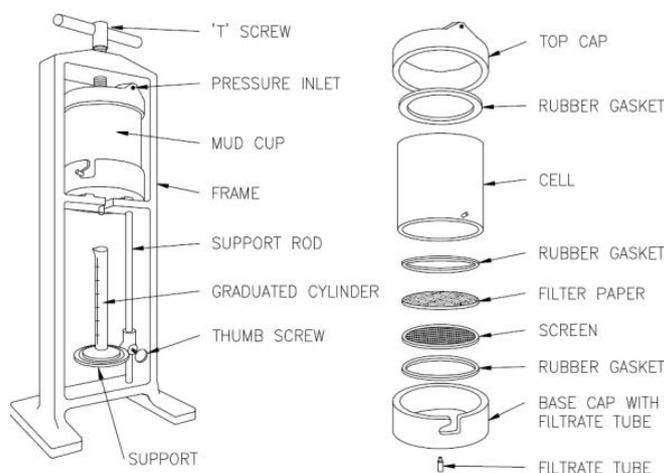
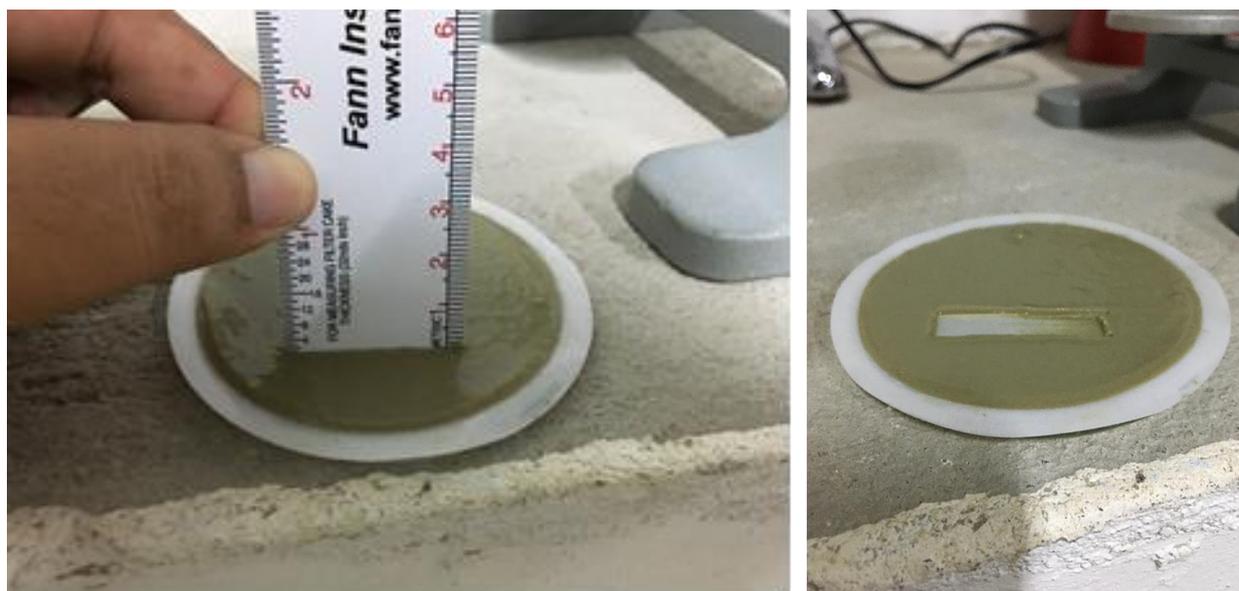


Figura 12: Detalhe de equipamento Filtro Prensa para avaliação do reboco e filtrado (FEDERATION OF PILING SPECIALISTS, 2006).



Figuras 13 e 14: Detalhe de formação do reboco uniforme e com espessura de 1mm (arquivo pessoal).

Para a realização do ensaio de pegar-se a suspensão de argila preparada no ensaio de determinação da viscosidade e a transfere para o recipiente do filtro prensa contendo o papel de filtro. Aplicar-se a pressão de modo que esta atinja, aproximadamente, 100 ± 5 psi em menos de 30 segundos. Durante 30 minutos, a partir do momento da aplicação da pressão (que deve ser mantida constante), é recolhido o filtrado na proveta.

Realiza-se então uma avaliação da formação do "cake" quanto à homogeneidade do reboco e sua espessura, que deve ser constante.

Faz-se também a leitura do líquido passante pelo filtro (filtrado) e é avaliado quanto aos parâmetros de referência.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRANSPORTE E ESTOCAGEM

O armazenamento da bentonita deve ser em local apropriado. Deve ser longe de água, por motivos de não a deixar entrar em contato com a água antes da mistura.

A bentonita é altamente higroscópica, isto é, é um material que "puxa" a água e na presença de água ela começa a se hidratar, com isso suas características começam a se desenvolver (inchamento e tixotropia), o que não é desejável.

Em obras de TBMs, normalmente, a bentonita é fornecida em caminhões tipo BULK (pressurizados e fechados) e seu armazenamento é feito em silos verticais pressurizados com conexão direta ao TBM, assim facilitando muito a logística da obra e consequentemente armazenando-a apropriadamente longe do contato com água.

A alimentação do sistema do TBM para a formulação do traço do graute bicomponente se dá de forma automatizada e com balanças eletrônicas acopladas ao TBM. Em obras de fundação e outros tipos de obras, a bentonita, é fornecida em carretas com 27,00 toneladas em sacos iguais aos de cimento de 25kg cada ou em Big Bags, sacos de rafia com capacidade de conter 1.000,00 kg (1,00 tonelada) cada. Seu armazenamento deve ser feito de forma adequada em containers ou abrigada do tempo afim de evitar as chuvas.

8 CONCLUSÃO

Esse artigo ressalta a importância da bentonita como adição do componente A do graute bicomponente, e a prática recomendada para controle tecnológico do processo. É notória a influência da bentonita nas propriedades como índice de exsudação, índice de fluidez, vida útil da mistura fresca, resistências e estabilidade da calda do componente A.

Nos projetos que apoiamos, o consumo de bentonita no graute bicomponente foi de 50 kg/m³ nos primeiros estudos a 30 kg/m³ na obra de Fortaleza, sendo que a redução a redução de consumo de bentonita pode estar associada tanto à adição de polímeros em sua composição e quantidade de cátions livres, bem como, aos atuais tipos de cimentos cada vez mais finos facilitando a estabilização coloidal da calda ou coulis. Uma calda mais estável requer menos limpeza na linha de bombeamento e menor possibilidade de ocorrer entupimentos por sedimentação ou exsudação da mistura cujo volume de água pode chegar a 88% do graute endurecido que precisa ficar constantemente úmido ou saturado para evitar a secagem da bentonita e altíssima retração da argamassa.

9 AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente ao Shunji Takashima, consultor que tanto contribuiu com sua experiência e dedicação no desenvolvimento de tecnologias para a construção civil. Ao engenheiro Pietro Perruzza da Seli SpA, quem apresentou ao mercado nacional a primeira vez a tecnologia do graute bicomponente e o seu processo de qualificação. Ao CBT e a todos os colaboradores dos consórcios Linha Amarela, Via Amarela e Linha 5 Lilás do Metrô de São Paulo, Linha 4 Sul do Metrô do Rio de Janeiro e Consórcio FTS, executor da Linha Leste do Metrô de Fortaleza e fornecedores de insumos, pelo suporte ao desenvolvimento da tecnologia e busca por processos e materiais cada vez mais adequados ao processo de fabricação.

REFERENCIAS

- [1] ANALYSIS OF TWO-COMPONENT CLAY SAND BACKFILL INJECTION IN JAPAN - P. J. Ashton, S. Takigawa, Y. Kano & Y. Masuoka. TAC Corporation, Okayama, Japan, 2018
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7681-1: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7681-2: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7681-3: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7681-4: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 4: Determinação da resistência à compressão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- [6] BUN PARTICIPAÇÕES. ITMA-075 - Instrução de Trabalho - Determinação da viscosidade, pH e filtrado da bentonita pelo Método da Norma Petrobrás EP-1EP-00011-B. Revisão 01. 2020.
- [7] FEDERATION OF PILING SPECIALISTS. Bentonite support fluids in civil engineering. Federation of Piling Specialists. 2a Edição. Londres. 2006.
- [8] HENN, R. ET ALL. AUA Guidelines for backfilling and contact grouting of tunnels and shafts. Thomas Telford Publications. Londres. 2002.
- [9] MAILDL, U.; PIERRI, J. Innovative hybrid EPB tunnelling in Rio de Janeiro - Geomechanics and Tunneling, v. 7, n. 1, p.55-63, 2014
- [10] MEDEIROS, B. Efeito de Viscosificantes na Filtração de Fluidos de Perfuração à Base Água. Dissertação: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2010.
- [11] RIVERA, A.; DAKUZAKU, R. Relatório técnico RT-006/2013 complementar 3 - Graute TBM bicomponente - Estudo de traço e ensaios comparativos para qualificação de fornecedores. S. Takashima Consultoria e Assessoria LTDA. Rio de Janeiro. 2013.
- [12] RIVERA, A.; OLIVEIRA, E; UCHOA, E. Procedimento Executivo - Controle E Recebimento Dos Materiais Do Grouting TBM. Consórcio Linha 4 Sul. Rio de Janeiro. 2014.
- [13] RIVERA, A.; DAKUZAKU, R.; DALFRE, M. Procedimento Interno - Controle E Recebimento Dos Materiais - Bicomponente. Consórcio FTS. Fortaleza. 2019.