

GRAUTE BICOMPONENTE - CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO E PRÁTICA RECOMENDADA PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO

Roberto Dakuzaku, Shunji Takashima & Adriana Falcochio Rivera

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

Pedro Paulo F. Gouveia Filho

Bentonit União Nordeste Ltda

Resumo: Grautes bicomponentes são aplicados em diversas obras de infraestrutura de túneis, onde o uso de equipamentos mecanizados como TBM ou EPBM requerem a injeção dos vazios ou espaço anelar entre o revestimento de concreto e o maciço. Porém, as metodologias para avaliação dos seus componentes A (Calda) e B (aditivo acelerador de pega) são pouco divulgados ou conhecidos. Neste artigo apresentamos os ensinamentos recebidos de um consultor da empresa italiana SELI S.p.A. no desenvolvimento desta tecnologia na primeira utilização deste tipo de graute no Brasil, durante a construção da primeira etapa da Linha Amarela do Metrô de São Paulo, atualmente empregada em todos os projetos semelhantes no território brasileiro, entre estes, as obras Lote 7 da Linha 5 Lilás do Metrô de São Paulo, Linha Sul do Metrô do Rio de Janeiro e Linha Leste do Metrô de Fortaleza.

Neste artigo também será apresentada a prática recomendada para estudar composições, qualificar fornecedores e controlar o processo na obra através de planos de ensaios de controle tecnológico.

1 INTRODUÇÃO

Backfill grout”, graute TBM ou graute bicomponente é argamassa cimentícia de enchimento dos vazios existentes entre os anéis de concreto de revestimento do túnel e o maciço escavado, solo, areia ou rocha. Este material é a mistura de dois componentes, A e B:

Componente A – Calda de cimento com adição de bentonita e aditivo retardador de pega: produzido em misturador coloidal instalado na planta de graute bicomponente, sendo transportado até a tuneladora através de tubulações metálicas que podem chegar a quilômetros de extensão.

Componente B – Aditivo acelerador de pega a base de silicato de sódio com módulo $m \text{ SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ aproximado de 3,22: é misturado ao componente A nas saídas dos bicos de injeção da tuneladora. Em poucos segundos, (6 s a 12 s), o componente B precipita os silicatos de cálcio solúveis do componente A que muda quase que instantaneamente de estado fluído para uma argamassa plástica preenchendo o espaço anelar entre a escavação e o revestimento do túnel.

Este material, embora muito utilizado na execução de túneis mecanizados no Brasil e no mundo, ainda apresenta poucas normatizações ou publicações a seu respeito, sendo o seu desenvolvimento realizado principalmente nos laboratórios de obra ou dos fabricantes de insumos. Neste sentido, este trabalho vem apresentar a experiência dos autores na qualificação e controle tecnológico de grautes bicomponentes em obras do metrô de São Paulo, Rio de Janeiro e Fortaleza, realizados em sistema mecanizados de escavação tipo TBM (Tunnel Boring Machine) ou EPBM (Earth Pressure Balance Machine). Diversos métodos de ensaios foram adaptados de normas nacionais, ver referências no final do artigo, como por exemplo caldas de cimento para injeção, e ajustados aos requisitos do processo executivo, ou experiências de consultores internacionais conforme apresentaremos nos capítulos a seguir.

2 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE GRAUTES BICOMPONENTES

Desenvolvido no Japão pela TAC Corporation [1], empresa japonesa de engenharia avançada para túneis, no início de 1983 quando a construtora Nishimatsu Construction Company estava trabalhando no metrô de Midosuji na cidade de Osaka – Japão na construção de 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.

A Nishimatsu solicitou à TAC Corporation, empresa japonesa de engenharia avançada para túneis, que criasse uma solução para mitigar os riscos representados na execução de um trecho bastante vulnerável, com curvas sucessivas. Duas soluções foram apresentadas:

- A primeira, grautear com uma mistura de argamassa com alto teor de ar contendo 80% de ar incorporado, opção descartada.
- 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.

Depois que o túnel foi concluído, após análise de dados finais, em trechos de retas, havia um recalque mensurável de 3 mm a 5 mm e nos trechos curvos esperavam-se que os assentamentos 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 a escavação nas curvas.

Com base nesse resultado, um novo processo empregando materiais não endurecidos para limitar o recalque durante a escavação foi descoberto. A figura 1 abaixo ilustra o processo de desenvolvimento da resistência do graute bicomponente.

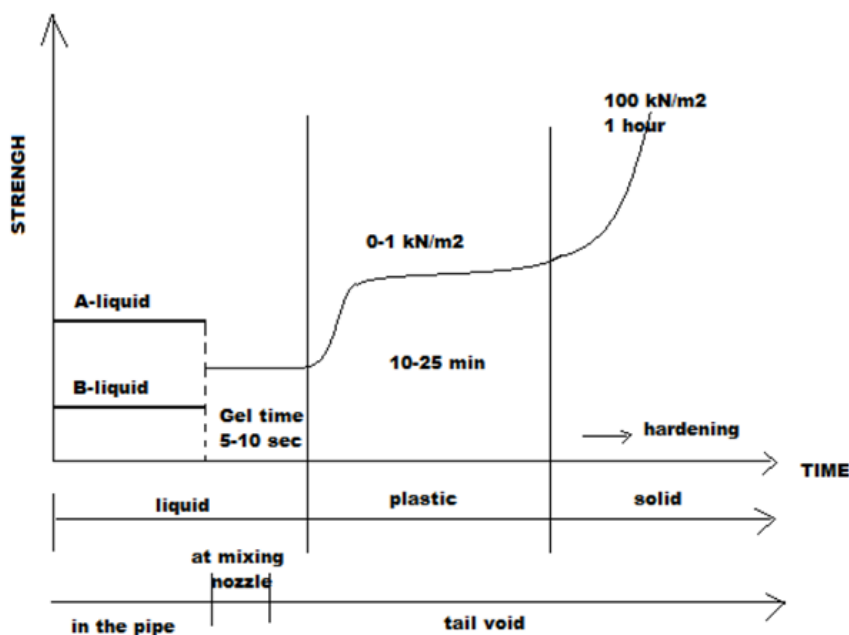


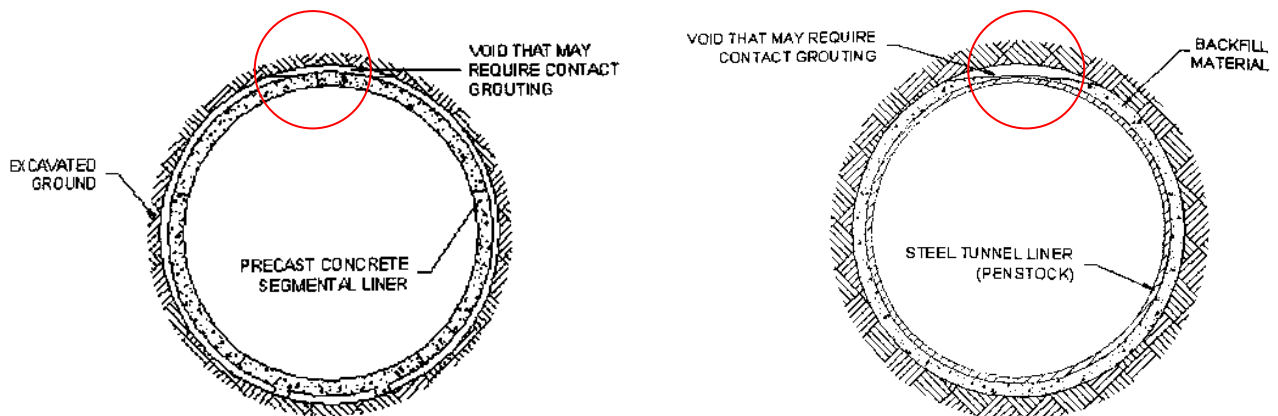
Figura 1 – Processo de desenvolvimento da resistência do graute bicomponente (TAC Corporation,2009)

Segundo Maidl [12], as principais funções do graute bicomponente podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Preenchimento do espaço entre o maciço e os anéis de concreto pré-moldados.
- Redução das deformações na superfície.
- Estabilização do ultimo anel em ordem conforme saída da cauda da tuneladora.
- Fornece apoio inicial para os anéis com o objetivo de minimizar as convergências do anel.
- Suportar as cargas transmitidas pelo peso do back-up da tuneladora.
- Assegurar uma injeção contínua, sem interrupções (preenchimentos em argamassas necessitam aguardar a sua cura por exemplo).

Ainda, segundo Maidl[12], no que diz respeito às deformações do anel, experiências em vários projetos de túneis em todo o mundo com argamassas convencionais mostraram que a deformação principal ocorre principalmente em uma faixa de 0 a 10 anéis após a construção de um anel. A experiência prática mostra que as deformações nos segmentos estão diretamente relacionadas ao processo de injeção durante a escavação e ao processo de endurecimento. Após o endurecimento do graute bicomponente, não ocorrem deformações adicionais ou são muito pequenas.

Estes enchimentos entre os segmentos e o maciço podem ser realizados pela injeção de diversos materiais, tais como caldas de cimento, graute bicomponente (Clay/Bentonit-Cement Grouts), grautes com filler, argamassas de cimento e areia com aditivos, incluindo a adição de outros materiais aglomerantes como cinzas volantes e pozolanas (HENN,2002).



Figuras 2 e 3: Exemplos de regiões com falhas de enchimento pelo graute bicomponente em túneis revestidos com segmentos pré-fabricados de concreto ou aço pode exigir injeções de contato (HENN, 2002).

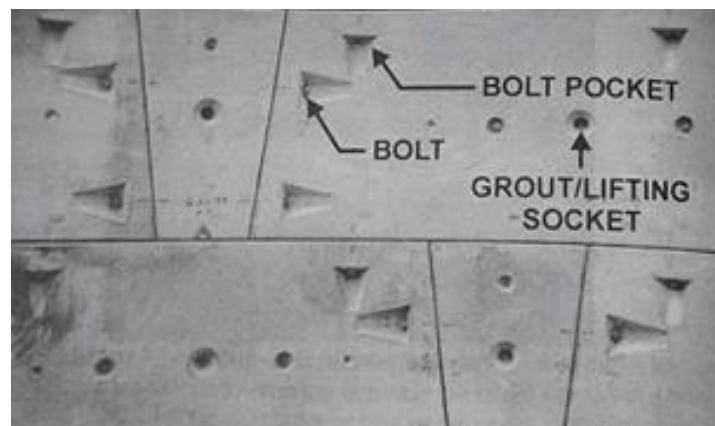


Figura 4: Detalhe de ponto de injeção do graute em anéis pré-fabricados de concreto (HENN, 2002)

No preenchimento dos anéis a velocidade e volume injetado podem ser controlados através dos bicos injetores (figura 4) e avaliados constantemente segundo a variação teórico-real, conforme apresentado na figura 5. Este controle rigoroso permite agilizar o enchimento dos anéis e com pressões inferiores às argamassas com cimento e areia.

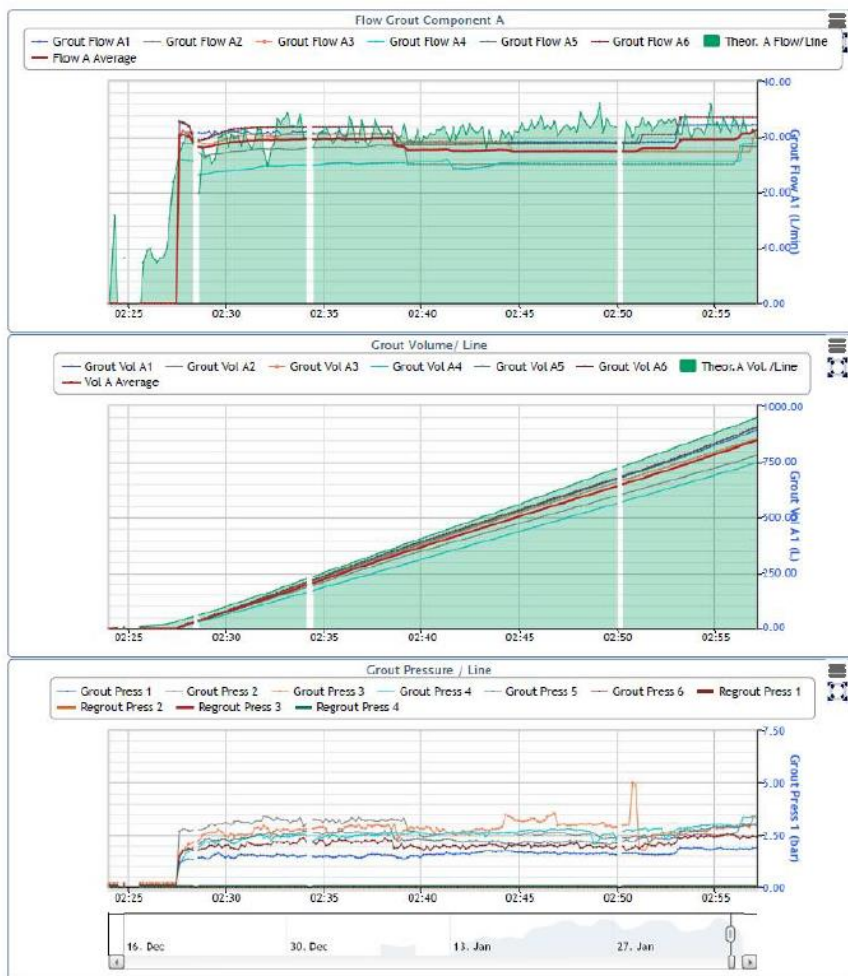


Figura 5: Controle em tempo real dos volumes e pressões injetadas de componente A, juntamente com a pressão da argamassa em cada linha de injeção. Visualização e controle com o Maidl-Procon II Software (MAIDL, 2014).

Aqui no Brasil, o graute bicomponente foi utilizado pela primeira vez no lote 1 da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo, trecho entre a estação Faria Lima até a estação Luz, (figura 6). Os procedimentos inéditos para desenvolver estudos de traços e ensaios de controle tecnológico foram desenvolvidos e tropicalizados no laboratório instalado no canteiro de obras do consórcio construtor deste projeto pioneiro.

Os conhecimentos e ensinamentos foram dados pelo Sr. Pietro Perruzza, geólogo e consultor da SELI S.p.A., empresa responsável pela operação do TBM.

Os estudos de traços, ensaios de cimento, bentonita, fly ash, aditivo plastificante retardador de pega e aditivo acelerador de pega para qualificar materiais e fornecedores foram realizados durante o ano de 2006, quando surgiu a bentonita PERMAGEL, produto sem a necessidade de pré-hidratar facilitando o processo e economizando espaços ocupados pelos tanques de hidratação no canteiro de obras.

Entre os atrativos deste processo foi a possibilidade de bombeamento a longas distâncias, os componentes A e B do graute bicomponente foram bombeados através de tubulações com diâmetros 1.1/4" e 1", respectivamente, a distância máxima de 3,5 km a uma pressão de 80 bar partindo da central de produção do componente A do graute até os tanques instalados no Backup do TBM

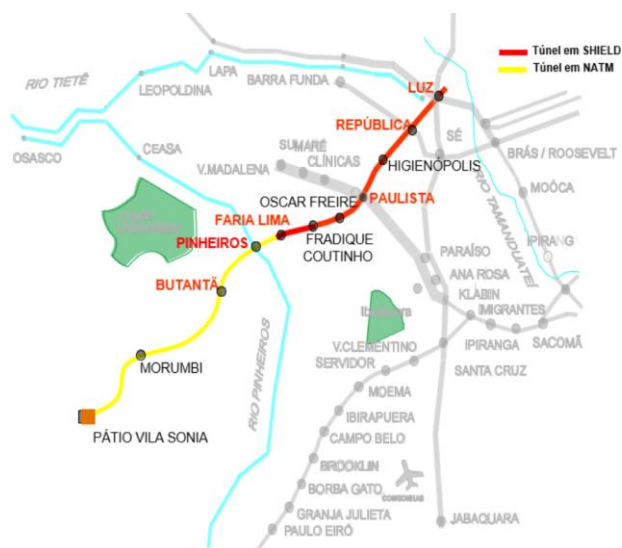


Figura 6 – Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo (Arquivo pessoal).

3 MATERIAIS CONSTITUINTES E SUA IMPORTÂNCIA

A seleção dos materiais para a composição do graute bicomponente devem atender as normas vigentes, porém, precisam apresentar algumas características complementares que irão influenciar principalmente na estabilidade do componente A – Calda e formação da consistência em gel para injeção do material. Neste sentido, apresentamos a seguir os cuidados na seleção destes materiais:

3.1 CIMENTO

Entre os cimentos estudados mais aplicados para a elaboração dos grautes bicomponentes está o CP V ARI RS (cimento de alta resistência inicial resistente à sulfatos) que deve apresentar as características físicas, químicas, mecânicas e de desempenho conforme o especificado na ABNT NBR 16697.

Com cimentos tipo CP V ARI RS, os consumos ficam no entorno de 250 kg/m^3 a 350 kg/m^3 do componente A, o que irá depender de sua combinação com os demais materiais e requisitos de projeto. Deve-se avaliar complementarmente se nas caldas há um excesso de formação de espuma durante a preparação do Componente A, pois, apesar de atenderem os requisitos da norma brasileira, este fator é determinante na estabilidade e bombeabilidade.

Durante o desenvolvimento dos grautes bicomponentes também foi avaliado o cimento tipo CP III 40 RS, que apresentou desempenho satisfatório nos ensaios realizados. Porém este cimento possui grandes variações no teor de escória adicionada (30 a 75%) e sua utilização deve ser restrita e reavaliada em caso da não disponibilidade do CP V ARI RS. As mesmas considerações são válidas para os cimentos tipo CP IV.

Deve-se evitar também cimentos classe 32, pois é necessário um consumo maior de cimento e que não necessariamente atenderias aos requisitos de resistências mecânicas.

3.2 BENTONITA

A avaliação da bentonita deverá ser criteriosa e realizada de forma a avaliar o seu desempenho não somente no grautes bicomponente, mas também na calda (slurry) utilizado na lubrificação da cabeça de perfuração e estabilização da frente de escavação em solos arenosos.

Os consumos de bentonita sódica ativada nacionais apresentam valores entre 25 kg/m^3 a 50 kg/m^3 de Componente A, a dureza da água e capacidade de ativação da bentonita interferem diretamente nestes consumos.

Específico para qualificação da bentonita, recomendados a avaliação do exposto no trabalho BENTONITAS PARA APLICAÇÃO EM GRAUTES BICOMPONENTES PARA USO EM TÚNEIS (BACKFILL GROUT) de mesma autoria deste artigo, apresentado concomitantemente com este trabalho.

3.3 ÁGUA

A qualidade da água de amassamento do componente A do graute é fundamental para obter uma mistura homogênea, coloidal, estável, sem sedimentação do cimento e bentonita. Deve ser de preferência, potável, com pH neutro e com adequada concentração de elementos capazes de instabilizar a mescla como sais de cálcio e magnésio, determinados tipos de sulfatos, ferro ou alumínio em teores elevados.

Em caso de dureza elevada, a água deve ser previamente tratada, por exemplo, com adição de barrilha.

A qualidade da água tem influência direta da bombeabilidade a longas distâncias do componente A do graute, sendo comum alguns quilômetros e nos intervalos de limpeza dos reservatórios e tubulação da planta de produção e estação de bombeamento.

3.4 ADITIVO RETARDADORE E ACELERADOR

Para que o Componente A obtenha longa manutenção de suas propriedades no estado fresco mantendo-se fluido e estável sem exsudar ou segregar durante um tempo mínimo considerado de 6 horas ou além, é indispensável o emprego de aditivo retardador de pega em dosagens de 1% a 2 % sobre o peso de cimento. Evidentemente a dosagem pode ser outra a ser definida em laboratório em função da compatibilidade.

O aditivo acelerador de pega a base de silicato de sódio, denominado componente B, precisa ser avaliado quanto a sua compatibilidade com o componente A na formação do gel e posterior endurecimento para atendimento aos requisitos mecânicos do graute bicomponente. Normalmente o consumo do componente B pode variar entre 3% e 10% do volume de componente A injetado pela máquina tuneladora no vazio anelar entre o revestimento de concreto e a escavação do terreno.

O controle tecnológico dos aditivos do graute bicomponente devem atender aos requisitos da norma ABNT NBR 11768-1:2019 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos quanto a uniformidade durante o período de fornecimento a obra.

3.5 OUTRAS ADICÕES

No componente A, outras adições disponíveis na região da obra podem ser adicionadas para diminuir consumo de cimento, entre essas, a cinza volante ou "fly ash", pozolanas, filler calcário e escoria desde que a calda fique estável e atenda as resistências mínimas especificadas pelo projeto.

4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS REQUERIDAS PARA GRAUTE BICOMPONENTE

Como exemplo, propriedades do graute bicomponente aplicado no túnel TBM, Lote 1 da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo e Linha 4 Sul do Metrô do Rio de Janeiro:

- ✓ Deve ser bicomponente
- ✓ Formação de gel logo após a mistura em poucos segundos - "gel-time" > 6 s < 12 s
- ✓ Resistência à compressão aos 28 dias > 2,0 MPa
- ✓ Resistência inicial à 1 hora: 100 KPa (1 kgf/cm²)
- ✓ Resistência inicial à 24 horas: 500 KPa (5 kgf/cm²) no lote 1 da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo e 600 KPa (6 kgf/cm²) na Linha 4 Sul Amarela do Metrô do Rio de Janeiro
- ✓ Exsudação máxima de 4% em 3 horas, sendo recomendável ≤ 2%
- ✓ Deve apresentar fluidez compatível com o sistema de injeção. Segundo o estudo Kawasaki, essa fluidez deve estar entre 30 s e 50 s
- ✓ Ter longa manutenção da fluidez, no mínimo de 6 horas podendo chegar a 72 horas
- ✓ Deve ser de difícil diluição em água, para minimizar retrações (possíveis vazios no preenchimento) e perdas de suas características ao entrar em contato com a água do subsolo
- ✓ Módulo Edométrico, solicitado para tuneladora de grande diâmetro, como referência o mínimo de 10 MPa.

5 ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO

Os insumos – cimento, bentonita e aditivos – a serem utilizados na mistura necessitam que suas características sejam avaliadas durante o estudo de dosagem e controladas durante a execução da obra com a realização de ensaios conforme Plano de Inspeção e Testes a ser elaborado para cada caso no ato da entrega deles, antes de serem armazenados nos silos.

Para a qualificação dos insumos temos ensaios mais completos, enquanto em campo temos o controle das características básicas. O controle pode diferir conforme estrutura disponível nos laboratórios de campo, mas basicamente são realizados os ensaios a seguir apresentados.

5.1 FABRICAÇÃO DO COMPONENTE A

Em laboratório, para a qualificação do bicomponente, o componente A é misturado em laboratório utilizando furadeira dotada de hélice, sendo a mistura realizada manualmente até que não sejam constatados mais grumos, diferenças de coloração, ou seja, até que esta esteja homogênea. Em campo, esta amostragem pode ser realizada diretamente no misturador coloidal. Os tempos de mistura podem variar bastante conforme equipamento utilizado, sendo necessário ajuste em campo. Tempo excessivo de mistura também pode quebrar a estrutura coloidal da calda, acelerando o processo de sedimentação de sólidos.



Figuras 7 e 8: Componente A após mistura realizada em laboratório e detalhe do material retido na peneira indicando necessidade de nova homogeneização (RIVERA et al, 2014).



Figuras 9 e 10: Turbomixer e agitador projetado pela Seli e fabricados pela Innotek Itália para a Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo (PELLEGRINI, 2009).



Figura 11, 12 e 13 – Central de graute bicomponente e aspecto do graute homogêneo, sem grumos (Arquivo pessoal).

Em campo o componente A é misturado em tanque agitador com turbomixer e depois acondicionado em tanques com agitadores para manutenção da suspensão. O tempo de estocagem pode variar conforme tipo de aditivo retardador, porém é considerado como referência o período de 6 horas.

No preparo e produção do componente A do graute bicomponente, a eficácia de mistura do misturador é essencial para obter mesclas homogêneas, sem grumos e estáveis. Misturas estáveis apresentam menores exsudação de água, mantem a fluidez por tempo maior, maior vida útil do componente A aumentando o intervalo do período de limpeza da linha de bombeamento entre a central e os reservatórios instalados no backup da tuneladora.

5.2 ESTUDO DE DOSAGEM

Nos estudos de traços e dosagens do componente A são considerados como dados de entrada as características acima para assegurar facilidades de bombeamento, mesmo a longas distâncias, longa manutenção da fluidez, por período mínimo de 6 horas, sem exsudar índices acima de 4% sendo desejável índices inferiores a 2%. Tais propriedades confere a calda do componente A boa estabilidade volumétrica minimizando riscos de entupimentos da tubulação por segregação ou sedimentação do cimento, tendo importante influência também o tipo de bentonita.

5.3 FLUIDEZ E VIDA ÚTIL

Realizada para a avaliação do Componente A, a determinação da fluidez e vida útil é realizada conforme os procedimentos constantes na ABNT NBR 7681-2: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil, porém quanto a vida útil, esta é avaliada conforme necessidade da obra, sendo considerado como satisfatório o mínimo de 6 horas.



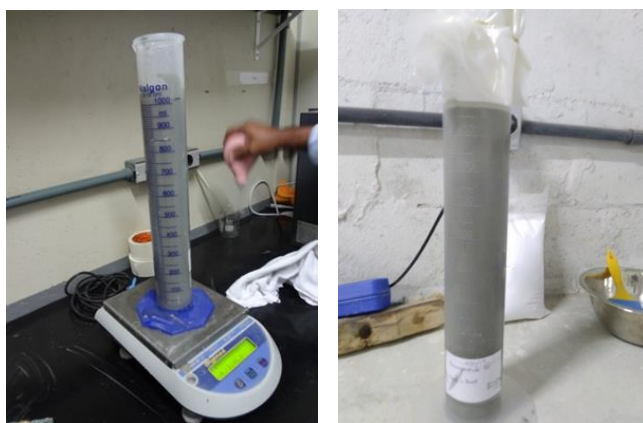
Figura 14: Avaliação da fluidez e vida útil do Componente A utilizando cone de Marshal para calda (RIVERA et all, 2014).

É fundamental o cuidado no tamponamento do tanque de mistura durante a realização do ensaio, bem como, a homogeneização da calda antes de cada determinação.

5.4 DENSIDADE E EXUDAÇÃO E EXPANSÃO

Para a determinação da densidade (figura 15) 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.

No componente A do graute são realizados ensaios de exsudação e expansão da calda (figura 16) 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 dos sólidos (cimento e bentonita).



Figuras 15 e 16: Avaliação da densidade (RIVERA et al, 2014), exsudação e expansão (RIVERA et al, 2019) do Componente A.

5.5 GEL TIME

Define o “gel time” o tempo de gelificação do graute bicomponente quando a mistura dos componentes A e B do graute passa do estado líquido para fase plástica em poucos segundos, quase instantaneamente. O tempo entre as adições da mistura de acelerador para a perda total de trabalhabilidade tem que ser equilibrado e ajustado para as condições de escavação e instalação dos anéis de concreto pré-moldado do revestimento do túnel para evitar entupimentos dos tubos de injeção, preencher todos os vazios ao redor do anel e evitar invasões para dentro do “shield” e perdas pelas escovas do backup do TBM.



Figuras 17,18 e 19: Mistura e preparo de amostras para ensaios de “gel time” (RIVERA et al, 2014).

Para determinar o tempo de formação do gel, o ensaio ganhou o nome de “teste do copinho”. O procedimento de ensaio consiste na pesagem de 3 copinhos com 100 g de componente A e pesagem de 3 copinhos de componente B com dosagens a partir de 3% sobre o peso do componente A. A mistura dos componentes A e B se faz tombando o componente A sobre o componente B, o número de tombos ou viradas dependerá do consumo de componente B, quanto maior o consumo de aditivo acelerador, maior o tempo de gelificação do graute. Dosagens inferiores a 4% são mais difíceis de obter mistura homogênea sem ocorrência de grumos. Com um cronômetro, um laboratorista marca o tempo de formação do gel. O resultado de “gel time” é a média dos tempos cronometrados para formação de uma argamassa resultante da mistura dos 3 pares de copinho.



Figuras 20,21 e 22 - Ensaio de “gel time”, ficou conhecido como teste do copinho (arquivo pessoal)

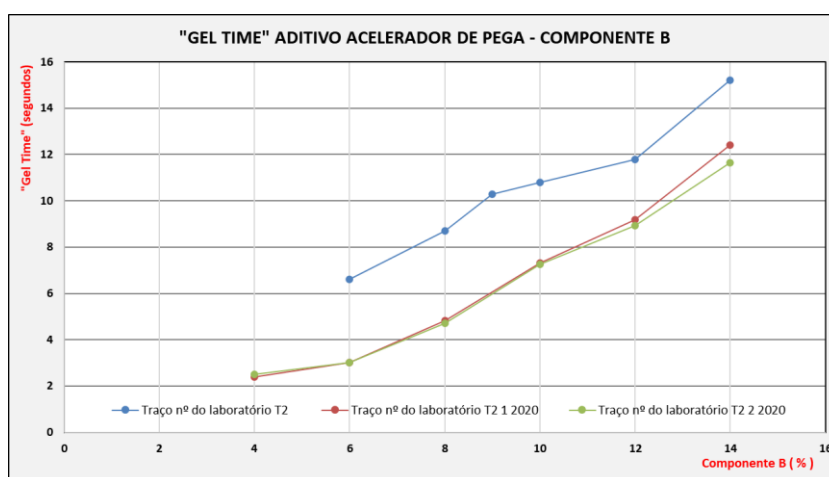


Figura 23 – Gráfico consumo de componente B e tempo de gel, ensaios de laboratório para o Metrô de Fortaleza

5.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão especificada para o graute bicomponente não é alta, a finalidade do grauteamento do espaço anelar entre a escavação e os anéis de concreto pré-moldado é o contato e a transferência de carga do solo ao revestimento do túnel, este sim com função estrutural. A resistência necessária é similar à resistência do solo local.

Ensaio de resistência à compressão do graute bicomponente na idade de uma hora exige cuidados com o equipamento empregado para rompimentos de corpos de prova com resistências na faixa de 0,1 MPa, o laboratório precisa estar equipado com prensa e célula de carga para cargas baixíssimas.

Na pioneira obra brasileira da Linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo foi adaptado uma sonda de Vicat com uma massa na parte superior capaz de exercer uma pressão equivalente a 1 kgf/cm² de resistência à penetração no graute em processo de endurecimento, figuras 24, 25 e 26.



Figuras 24,25 e 26 - Ensaio de resistência na idade de 1 hora. A resistência de 0,1 MPa foi considerada quando a sondada agulha de Vicat não penetrava no graute endurecido (arquivo pessoal).

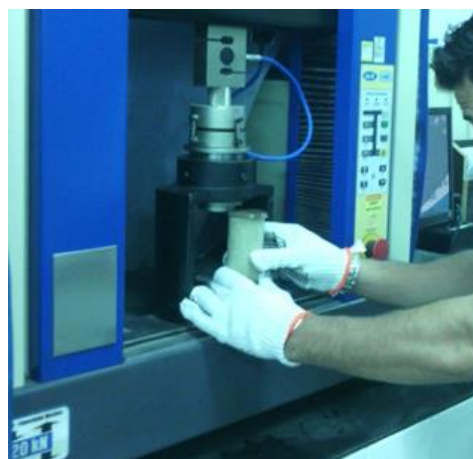
Nas obras de metrô onde trabalhamos, os projetistas têm especificado resistências à compressão de 0,1 MPa na idade de 1 hora e 0,5 MPa a 0,7 MPa na idade de 24 horas, requisitos aparentemente baixos, mas, suficientes para estabilizar o revestimento composto por anéis de concreto pré-moldado instalados pela tuneladora e evitar afundamentos da superfície sobre o túnel.

Na Linha 4 Sul Amarela do Metrô do Rio de Janeiro, os ensaios foram executados com penetrômetro (Acme Penetrometer) conforme a norma ASTM C403/C403M - 16 - Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, que consiste na avaliação da penetração de uma agulha padrão sobre a superfície e aplicar um esforço constante de modo que a agulha penetre até a profundidade de $25+2$ mm em um tempo de $10+2$ s, figura 27.

Rupturas nas idades mais avançadas, 3, 7 e 28 dias tem sido moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm e rompimentos em prensa de solos para ensaios de CBR, figura 28.



Figuras 27 e 28: Ensaio de resistência nas primeiras idades com o auxílio de penetrômetro (RIVERA et all, 2014) e com a prensa de CBR (RIVERA, 2019).



Figuras 29 e 30: Capeamento dos tops do corpo de prova e realização de ensaio de resistência à compressão em prensa hidráulica com célula de carga (RIVERA et all, 2014).

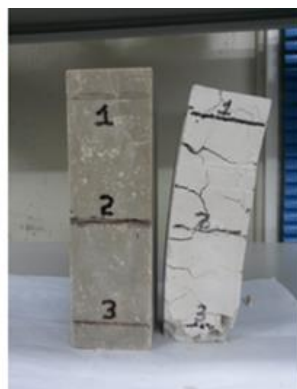
5.7 PROCESSO DE CURA E TRANSPORTE DOS CORPOS DE PROVA

Após desforma cuidadosa, os corpos de prova são identificados com horário e data de moldagem, número de série e frente de serviço. Em seguida, imediatamente são colocados em sacos plásticos ou em caixa com areia ou serragem úmida para transporte até o laboratório onde a cura é finalizada em câmara úmida.



Figuras 31 e 32: Preparo a acondicionamento de corpos de prova para transporte e armazenamento (RIVERA et all, 2014).

Corpos de prova moldados com amostras de graute bicomponente coletados no misturador da central de graute bicomponente são mantidos úmidos até a coleta e curados em câmara úmida no laboratório até a idade de ruptura.



Figuras 33, 34 e 35: Amostras de graute bicomponente que ficaram expostas no ambiente do laboratório, com e sem cura úmida. Fora da câmara úmida a retração por secagem danifica completamente o corpo de prova (arquivo pessoal).

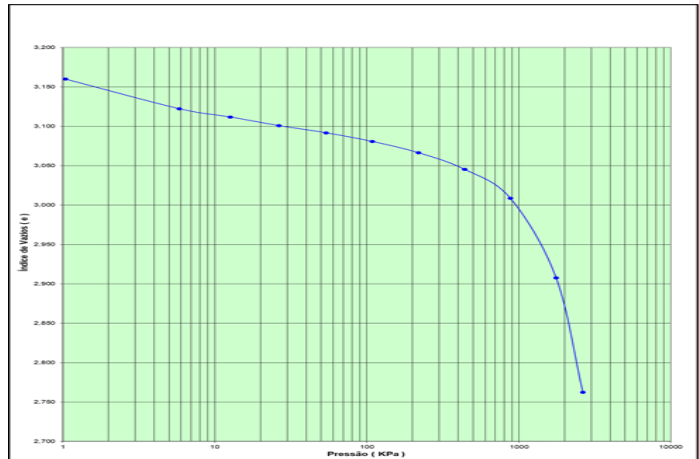
5.8 MÓDULO EDMÉTRICO

O módulo edométrico pode ser determinado através do ensaio de adensamento unidimensional saturado, conforme norma ABNT NBR 12007, com o cuidado no preparo da amostra diferente do exposto em norma, pois é necessário a realização da moldagem do graute bicomponente diretamente no anel.

Nos estudos realizados para a Linha 4 Sul do Metrô do Rio de Janeiro, tendo a norma ABNT NBR 12007:1990 como referência, para mistura com consumo de 310 kg/m^3 de cimento tipo CP V ARI RS, no Laboratório da empresa Tecnogeo em São Paulo, foi obtido valor de Módulo Edométrico de 81,4 MPa após 24 horas da mistura, sendo o parâmetro desta característica: $> 10 \text{ MPa}$ (RIVERA, 2013).

Apesar desta metodologia ser empregada para avaliação de solos que já estão estabilizados, o graute bicomponente necessita de uma análise mais cuidadosa, pois é um material que melhora suas características mecânicas ao longo do tempo, portanto o ensaio foi ajustado para que o período de carregamento estivesse dentro do período de 24 horas, onde é estimado que o material já apresentasse a capacidade superior a 600KPa.

Este comportamento com modificação das suas características mecânicas nas primeiras horas é um tema para estudos futuros e que podem variar de requisitos conforme o tamanho da seção do túnel.



Figuras 36 e 37: Prensa para realização do ensaio de módulo edométrico e exemplo de gráfico com o comportamento quanto a redução de vazios ao longo do tempo.

6 CONCLUSÃO

Sendo de grande importância o grauteamento do vazio anelar entre a escavação e anéis de concreto pré-moldados instalados para prever e evitar afundamentos superficiais capazes de bloquear a tuneladora e manter em posição o revestimento do túnel, o controle tecnológico do graute bicomponente deve ser executado sistematicamente durante a obra. Exige procedimentos de ensaios simples, ainda não regulamentados ou normatizados, alguns desses como o "gel time" ou o teste do copinho, embora empírico tem boa praticidade na avaliação da compatibilidade entre os dois componentes do graute e para controlar a resistência nas primeiras horas variando a dosagem do componente B durante o avanço da tuneladora.

Finalizando esse artigo, fica compartilhado, registrado a experiência, a prática recomendada e os valiosos ensinamentos recebidos para estudar dosagens e controlar a qualidade do graute bicomponente. A seguir, sugestão de atividades para elaborar o plano de ensaios de controle tecnológico do graute bicomponente em laboratório devidamente equipado e qualificado:

- Estudo de dosagem, iniciar antes das operações da tuneladora, testar vários tipos de cimento, adições, bentonita e aditivos para qualificação dos fornecedores e aprovação de traços.

Ensaio de controle tecnológico:

- Caracterização da bentonita e aditivos em todos os lotes recebidos, ensaios do fabricante e em laboratório externo quando houver dúvidas.
- Determinação dos índices de fluidez, exsudação, vida útil e “gel time”, no início da jornada, mudança de material, troca de turno e no mínimo, uma vez por dia.
- Resistência à compressão nas idades de 1 hora, 12 horas, 1, 3, 7 e 28 dias a cada 3 dias e sempre que houver mudanças de materiais componentes do graute.
- Outros ensaios especiais como módulo, aderência, permeabilidade quando o projeto solicitar.

7 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] ANTUNES, P. Testing Procedures for Two-Component Annulus Grout. North American Tunneling. British Columbia. 2012.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12007:1990 - Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15900-1:2009 - Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122:2019 - Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7681-1: 2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] HENN, R. ET ALL. AUA Guidelines for backfilling and contact grouting of tunnels and shafts. Thomas Telford Publications. Londres. 2002.
- [12] MAIDL, U. Relatório Técnico - Assessment on the grout mix. Consórcio Linha 4 Sul. Rio de Janeiro. 2014.
- [13] PELLEGRINI, L.; PERRUZZA, P. São Paulo Metro Project – Control of Settlements in Variable Soil Conditions Through EFB Pressure and Bicomponent Backfill Grout. RETC. Las Vegas. 2009.
- [14] 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.
- [15] RIVERA, A.; OLIVEIRA, E; UCHOA, E. Procedimento Executivo - Controle E Recebimento Dos Materiais Do Grouting TBM. Consórcio Linha 4 Sul. Rio de Janeiro. 2014.
- [16] RIVERA, A.; DAKUZAKU, R.; DALFRE, M. Procedimento Interno - Controle E Recebimento Dos Materiais - Bicomponente. Consórcio FTS. Fortaleza. 2019.