



**TRATAMENTO DE SOLOS ARENOSOS POR TÉCNICAS DE
INJEÇÕES DE RESINAS POLIMÉRICAS, UM ESTUDO DE CASO.**

BELO HORIZONTE

2019



JERÔNIMO JANUÁRIO DA SILVA SANTOS
ROGER FRANCIS SOARES DE SOUZA

**TRATAMENTO DE SOLOS ARENOSOS POR TÉCNICAS DE
INJEÇÕES DE RESINAS POLIMÉRICAS, UM ESTUDO DE CASO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Moysés Costa.

BELO HORIZONTE

2019

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Deus por nos dar saúde, sabedoria e força para superar todos os obstáculos.

Agradecemos, de forma muito especial, às nossas famílias, por não medirem esforços para que pudéssemos levar nossos estudos adiante.

Agradecemos aos engenheiros civis Prof. Dr. Rodrigo Moysés Costa e Prof. Dr. Jonhson Wilker Rigueira Victor, pela valiosa colaboração neste trabalho.

À Construtora G-Maia pelo apoio e fornecimento dos insumos para os experimentos, bem como pelo valioso apoio de seus funcionários diretamente envolvidos e que nos auxiliaram no programa experimental.

Enfim, agradecemos à todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte dessa etapa decisiva em nossas vidas.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade avaliar as melhorias de desempenho dos solos à partir de injeções de resinas de poliuretano para preenchimento de vazios na estrutura de solos arenosos sob as fundações. Neste trabalho, estudaremos também as características da permeabilidade do solo arenoso e sua capacidade de absorção de resinas poliméricas, assim como detalhamento dos polímeros e suas propriedades. Considerando que o solo é uma parte fundamental para absorver esforços de qualquer tipo de estrutura de fundação, deve-se dar uma atenção especial a este solo, através de metodologias de manutenção e monitoramento; que devem ser realizadas constantemente. A capacidade das estruturas de fundações cumprirem seus estados de funcionamento está diretamente ligada à segurança das estruturas, garantindo melhorias nos sistemas e evitando ônus aos ativos, principalmente, devido às intervenções corretivas.

Palavras chave: Injeção, Poliuretano, Solo Arenoso, Reforço Solo, Injeção de Poliuretano em Solo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Criação da primeira reação de um isocianato com um poliol foi feita em 1937, pelo químico industrial alemão Otto Bayer	16
Figura 2 – Reação ativador MDI com o Poliol, formando o poliuretano (PU).....	17
Figura 3 – Esquema da síntese de um poliuretano	19
Figura 4 – Aplicação do método de rejuntamento a jato em comparação com outros métodos	25
Figura 5 – Composição de solo típica	27
Figura 6 – Evolução do recalque ao longo do tempo	29
Figura 7 – Tensões básicas segundo a NBR 6122/94	30
Figura 8 – Fatores que afetam a compacidade de solos	30
Figura 9 – Métodos de injeção em engenharia geotécnica	32
Figura 10 – Sistemas de reforço de solos	33
Figura 11 – Elementos de uma base geológica instável	38
Figura 12 – Aplicação do material polimérico em solo instável	39
Figura 13 – Processo de Injeção Profunda Usando Material Polímero.....	42
Figura 14 – Procedimento de injeção profunda em solo	43
Figura 15 – Experimento 1: Injeção de PU por estágio.....	46
Figura 16 – Experimento 2: Injeção direta de PU	47
Figura 17 – Bomba de injeção bi-componente MC –I 700	49
Figura 18 – Ponteiros dos tubos injetores, com sistema de encaixe.....	50
Figura 19 – Lote da resina polyurethane – L60 ACL utilizada	51
Figura 20 – Material arenoso de média granulometria	52

Figura 21 – Tubulão escavado e sendo preenchido com solo arenoso.....	53
Figura 22 – Ponteiros dos tubos injetores com furos	54
Figura 23 – Preenchimento tubulão com solo arenoso e adensamento.....	55
Figura 24 – Laje de concreto com espessura de 20cm para confinamento do material, simulando uma sapata rasa.....	55
Figura 25 – Bomba injetora bi-componente e tambores com resinas.....	56
Figura 26 – Injeção de resina de poliuretano (PU) em solo arenoso	57
Figura 27 – Resultado da aplicação após a expansão do PU	58
Figura 28 – Escavação do solo e amostra do material, no Experimento 1	59
Figura 29 – Escavação do solo e amostra do material aglomerante, Experimento N° 2, onde constatou-se um comportamento expansivo do Poliuretano melhor que no Experimento N° 1	60
Figura 30 – Escavação e amostra do material aglomerante no Experimento 2...	60
Figura 31 – Detalhe do material arenoso consolidado pelo Poliuretano no Experimento N° 2	61
Figura 32 – Solo arenoso consolidado pelo Poliuretano no Experimento 2	62
Figura 33 – Testemunho coletado no Experimento 1	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Limites de faixas dimensionais das partículas de solo	28
Tabela 2 – Ensaio de injeção em solo saturado com resina de PU (Teste 1)	46
Tabela 3 – Ensaio de injeção em solo saturado com resina de PU (Teste 2)	47
Tabela 4 – Dados técnicos da bomba de injeção bi-componente	48
Tabela 5 – Dados técnicos da resina de Poliuretano.....	50
Tabela 6 – Dados técnicos do Poliuretano.....	51
Tabela 7 – Ensaio à tração por compressão diametral.....	63
Tabela 8 – Ensaio de resistência compressão mecânica	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. PROBLEMA.....	11
1.2. OBJETIVOS	11
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	11
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.2.3. JUSTIFICATIVAS.....	11
1.2.4. TECNOLÓGICAS	12
1.2.5. ECONÔMICAS.....	13
1.2.6. SOCIAIS.....	13
1.2.7. ECOLÓGICAS.....	14
2. HIPÓTESE	14
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
4. HISTÓRIA DO POLIURETANO	15
4.1 Esquema químico do Poliuretano (PU)	19
4.2. Composição do Poliuretano	19
4.3. Aditivos.....	21
4.4. Endurecedores	21
4.5. Silicones.....	21
4.6. Retardantes de chama	22
4.7. Agentes de expansão	22
5. ESTABILIZAÇÃO DE RECALQUES EM SOLOS MOLES	22
6. INJEÇÃO DE RESINA GEO-EXPANSIVA ESTRUTURAL EM SOLO....	24
7. SOLOS.....	25
7.1. Patologia em Solos	26
7.1.1. Conhecendo o Solo.....	26

7.1.2. Tipos de solos e sua capacidade de suporte	26
7.1.3. Sobre adensamento.....	28
8. TIPOS DE REFORÇO EM SOLOS	31
8.1. Troca do Solo.....	31
8.2. Injeções Químicas.....	31
8.3. Fibras para reforço de solos	32
8.4. Geossintéticos: Geotêxteis e geogrelhas ..	33
9. MÉTODOS DE INJEÇÃO E REJUNTAMENTO	34
9.1. Injeção de Permeação	34
9.2. Injeção de Compactação.....	34
9.3. Reidratação por Fratura Hidráulica	34
9.4. Jet Grouting	35
9.5. Injeção em Rochas	35
9.6. Compensação Grouting	35
9.7. Métodos de Mistura Profunda (DMM).....	35
10. PATOLOGIA	37
11. FASES DO PROCESSO DE INJEÇÃO	41
11.1. Fase de Preparação	41
11.2. Fase Primária de Injeção	41
11.3. Fase Secundária de Injeção	42
12. PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
12.1. 1º Experimento – Injeção de PU por estágio	45
12.2. 2º Experimento – Injeção de PU direta	47
12.3. METODOLOGIAS EXECUTIVAS	48
12.3.1 Equipamentos	48
12.3.2 Materiais	50

12.4 Montagem dos testes	52
12.4.1. Escavações	53
12.4.2. Tubos Injetores	54
12.4.3. Material Arenoso	54
12.4.4 Laje de concreto (sapata)	55
12.4.5 Poliuretano	56
13. INJEÇÃO DE POLIURETANO (PU).....	57
13.1. 1º Ensaio – Injeção de PU em tubulão com 6 m ³	57
13.2. 2º Ensaio – Injeção de PU em espaço confinado de 7 m ³	58
14. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
14.1 Método de aplicação e Fator forma	59
14.2 Capacidades de carga	62
15. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
15.1. Considerações Finais	64
15.2. Recomendações para Trabalhos Futuros.....	65
16. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1.INTRODUÇÃO

O foco principal deste trabalho é conhecer a relação de melhorias de desempenho dos solos à partir de injeções de poliuretano, para tratamento de maciço, preenchimento de vazios, macaqueamento de estruturas sob carregamento.

Serão estudadas neste trabalho as características da permeabilidade do solo arenoso e sua capacidade de absorção de resinas poliméricas, assim como detalhamento dos polímeros e suas propriedades.

A capacidade das fundações cumprirem seus estados de funcionamento está diretamente ligada à segurança das estruturas; garantindo assim, melhorias nos sistemas e evitando ônus aos ativos.

O solo é uma parte fundamental para qualquer tipo de estrutura; em geral, atrás da sustentação, as metodologias de manutenção e monitoramento devem ser realizadas constantemente.

Este trabalho será apresentado nos capítulos a seguir:

O Capítulo 1 apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre poliuretano e sua estrutura, os diferentes tipos de poliuretano, o processo de fabricação.

O Capítulo 3 trata sobre o programa experimental realizado neste trabalho, apresentando a moldagem dos corpos de prova, o processo de carbonatação acelerado bem como as medições realizadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados deste estudo bem como análise dos mesmos com base no programa experimental, descrevendo a influência dos diferentes tipos de cimento na resistência à carbonatação.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros. Este capítulo apresentou os objetivos, hipóteses e justificativas do problema de pesquisa proposto neste trabalho.

1.1. PROBLEMA

Um solo pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas após o tratamento com resinas de poliuretano?

1.2. OBJETIVOS

Nos tópicos a seguir apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar métodos de aplicação de injeção de resinas em solo, assim como seu fator de acomodação e sua conformidade após tratamento.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar a melhoria das propriedades mecânicas do solo ao ser tratado com resina de Poliuretano.

Apresentar através de ensaios a melhoria de desempenho do solo.

1.2.3. JUSTIFICATIVAS

Ultimamente, são muitos os avanços encontrados na tecnologia dos materiais utilizados na construção civil e também para os reparos necessários quando da ocorrência de desconformidade de solo, estruturas e outros danos ocorridos.

Segundo AGUIAR (2009), existem várias possibilidades de aplicação para resinas, entre as quais em edifícios altos, pontes, pavimentos rodoviários, plataformas marítimas, pré-moldados, reparos e recuperação de estruturas.

Os solos recebem solicitações de diversas magnitudes e por sua formação secular podem apresentar descontinuidade, uma vez agravadas precocemente proveniente de carregamentos.

O uso das resinas tem facilitado muito nos reparos dos elementos estruturais de concreto e proporcionam trabalhos mais práticos e eficientes para a recuperação das manifestações patológicas, conforme citado por AGUIAR (2009).

1.2.4. TECNOLÓGICAS

Para qualquer tratamento de solo é necessário ter conhecimento do conceito básico de sua formação, “origem”, solicitações exercidas pelas edificações e até mesmo processos que possam estarem interligadas a sua existência como se, as anomalias podem ter caráter estrutural, induzida ou por fenômenos da natureza.

A metodologia de se empregar resinas para melhorias das condições dos solos, prevê o controle maior e mais assertividade da técnica empregada, além de trazer modulações mais variadas possíveis para injeções de resinas para preenchimento de vazios.

O objetivo deste estudo foi buscar informações e dados para disseminar a metodologia executiva do processo.

Ainda segundo TAKAGI E ALMEIDA JUNIOR (2002, p. 3), a tecnologia de injeção de resinas para recuperação de estruturas de concreto é fundamental, para se garantir o desempenho de obras que precisam ser recuperadas, e para que se possa, também, aumentar a vida útil.

Resinas de poliuretano têm propriedades únicas para um material químico que proporciona uma variada gama de aplicações, sendo que a mesma resina de acordo com a técnica utilizada pode atingir altas resistências a compressão chegando até 70 Mpa, no caso de reparo estrutural. Para preenchimento de vazio o mesmo material pode ter seu volume expandido em até 25 vezes, cumprindo a função de preencher os vazios sem que se sobrecarregue a estrutura do mesmo.

Uma de suas principais características é combinar baixa densidade com alta resistência mecânica.

1.2.5. ECONÔMICAS

O ganho econômico de se fazer uma intervenção antes do colapso da estrutura, é significativamente relevante em função dos inúmeros ônus que a ruína desta traria. Conforme descrito por SITTER, os impactos na fase de correção, que neste caso seria relacionado à ruína da estrutura, são em ordem de grandeza 125 unidades mais onerosas.

Essa tecnologia tem a ideia de otimizar os trabalhos geotécnicos com equipamentos versáteis e possibilidade de resultados similares ao encontrado no mercado, trazendo soluções diferenciadas.

1.2.6. SOCIAIS

A melhoria de solo e elementos estruturais com polímeros são de grande relevância ao meio social vez que recuperando os elementos estruturais de uma edificação residencial, comercial ou industrial, estará consequentemente protegendo e privilegiando a segurança das pessoas.

1.2.7. ECOLÓGICAS

Resinas poliméricas são compostas por dois componentes, não têm solventes e não agredem ao meio ambiente. Podendo inclusive, ser aplicadas em reservatórios de água tratada, solo próximo a plantações, etc.

Elas possuem grande durabilidade e não contaminam o meio ambiente, segundo AGUIAR (2009).

O restabelecimento de uma estrutura, dentre as múltiplas vantagens, uma delas é evitar que esta seja fadada à desapropriação e possível reconstrução. Esta intervenção gera além dos impactos supracitados, um grande impacto ecológico, com poluição pulverulenta momentânea do ambiente e principalmente o descarte de todo este material de demolição, que inclusive em muitas das vezes, está contaminado.

2.HIPÓTESE

Pressupõe-se que solo com baixa resistência possam ter aumento de suas propriedades mecânicas através de injeções de resinas de poliuretano.

3.PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No propósito de dar seguimento a esta linha de pesquisa, o programa experimental se fundamentará em artigos, teses, normas, livros técnicos e estudos de caso. Dessa forma o método de pesquisa a basear o programa experimental, no sistema de injeção de resina poliuretano em solo arenoso, para verificação da consolidação do maciço e ganho de resistência.

Para a execução do trabalho foi determinada a utilização de escavações preenchidas com material arenoso saturado a ser injetado Poliuretano.

- I. Escavação de Valas e preenchimento com material arenoso.
- II. Instalação dos bicos de injeções;
- III. Injeções de resinas de poliuretano com resistência a compressão $1,5\text{kgf/cm}^2$.
- IV. Executar dois métodos de injeção, sendo por injeção estágios, injeção direta.
- V. Análise do fator forma de cada método e capacidade de expansão da resina de poliuretano em meio confinado;
- VI. Extrair corpos-de-prova para realização de ensaios de resistência à compressão.

O objetivo é analisar a capacidade de aglutinação das resinas envolvendo o solo após aplicação em ambiente confinado, aferir sua capacidade de expansão, fator forma da mesma e o ganho de resistência;

Serão moldados 2 experimentos, preenchidos com solo arenoso;

O primeiro ensaio será feito por estágios os experimentos receberá duas hastes posicionadas em diferentes cotas, onde cada haste receberá injeções de maneira permear pelo material arenoso.

O segundo experimentos será por meio de injeção direta, onde serão instalados uma haste com perfurações ao longo do corpo-de-prova, por onde ocorrerá a percolação da resina no solo.

4. HISTÓRIA DO POLIURETANO

Apesar de a tecnologia do poliuretano (sigla PU) ser recente, a química da uretana data de 1849, quando Wurtz e Hoffmann divulgaram reações

envolvendo um isocianato e um composto hidroxílico. Essas reações ficaram por muito tempo limitadas a experiências de laboratório, até que em 1937, na Alemanha, Dr. Otto Bayer e colaboradores deu início à indústria de poliuretanos, explorando o uso comercial dos isocianatos e começando a trabalhar no desenvolvimento de polímeros à base de poliésteres, que se tornariam competitivos com o nylon.

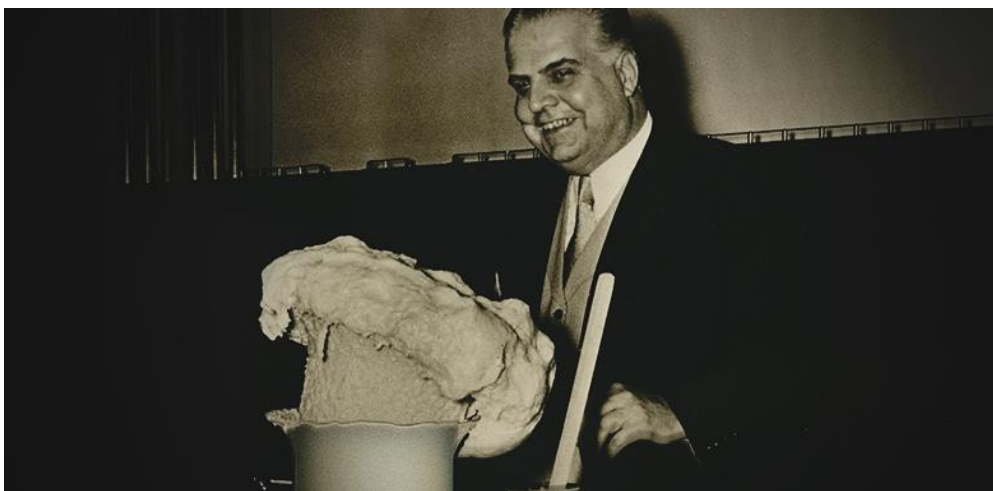


Figura 1 – Criação da primeira reação de um isocianato com um poliol foi feita em 1937, pelo químico industrial alemão Otto Bayer.

Em 1937, Dr. Otto Bayer era o chefe do laboratório científico da empresa química Bayer. No mesmo ano, foi patenteada a invenção na Alemanha.

Com o advento da II Guerra mundial e a consequente carência de materiais de borracha, incentivou-se o desenvolvimento de produtos à base de uretana, para aplicações como fibras, cerdas, adesivos, revestimentos, elastômeros e espumas. Trabalhos intensivos realizados nos Estados Unidos e Inglaterra fizeram com que a tecnologia da uretana tornasse mundialmente conhecida.

Foi durante a década de 1950 que registrou-se o desenvolvimento comercial dos PU's em espumas flexíveis. Entre 1957 e 1958, o desenvolvimento da indústria de poliuretanos foi viabilizado através da introdução dos polióis

poliésteres . O uso destes novos produtos possibilitou a fabricação de espumas com melhor processabilidade, melhores propriedades e menor custo do que as feitas anteriormente com polióis poliéster.

Em 1959, foi anunciada na Alemanha, a instalação da primeira fábrica de espuma flexível usando a técnica de espumação “OneShot” (uma só etapa), que dispensa o uso de prepolímeros formados pela reação prévia de isocianato e poliols. As formulações usadas com a técnica “OneShot” são baseadas em poliols poliéter, TDI 80/20, água, silicones tipo surfactante, catalisadores amínicos, catalisador organo-metálico e estabilizantes, que são misturados em uma só etapa ocorrendo, então, a reação de espumação. Assim, viabilizou-se o desenvolvimento de espumas flexíveis para aplicações de grande volume, sendo hoje o processo mais utilizado.

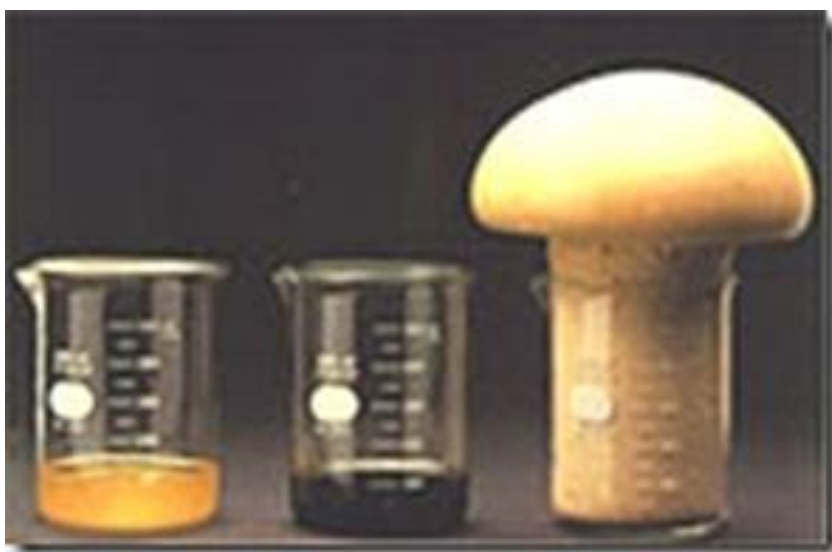


Figura 2 – Reação do ativador MDI com o Poliols, formando o poliuretano (PU).

O poliuretano (PU) é um produto sólido, com textura de espuma, e aparência entre a cortiça e o poliestireno expandido ("isopor"). É obtido a partir da reação química, que ocorre quase que instantaneamente, entre dois compostos químicos líquidos. Um dos compostos químicos é um ativador da reação (conhecido por MDI) e o outro é um composto químico conhecido como POLIOL.

NO BRASIL, as primeiras fábricas de espuma flexível foram instaladas, na região sudeste, entre 1961 e 1965. Estas fábricas foram montadas com equipamentos trazidos da Europa, e dependiam de matérias-primas importadas para o seu funcionamento.

Durante os anos 70, a rápida disseminação do processo descontínuo (caixa com caçamba e misturador), que exigia um investimento muito menor, tanto em equipamentos bem como em matérias-primas, aliada à fabricação local de poliols e TDI, e a formação de técnicos com conhecimentos na tecnologia de espumas de poliuretano, alavancaram a instalação de mais de cem fábricas em todo o Brasil. As espumas semi-flexíveis e semi-rígidas revestidas com materiais termoplásticos foram largamente usadas na indústria automotiva.

Nos anos 80, o crescimento de importância comercial foi a moldagem por injeção e reação (RIM), dando ímpeto aos estudos das relações entre estrutura molecular e propriedades dos PU's.

Na década de 1990 e neste início de milênio, presenciamos a preocupação com o meio ambiente, com as pesquisas voltadas para a substituição dos CFC's considerados danosos à camada de ozônio terrestre, o desenvolvimento de sistemas que não possuam compostos orgânicos voláteis (VOC's), e os processos de reciclagem dos PU's.

Não há nenhuma dúvida de que nos últimos 35 anos o poliuretano avançou de simples curiosidade de laboratório até produtos comerciais de grande importância, saltando de uma produção total de meio milhão de toneladas nos Estados Unidos em 1970 para 3,8 milhões de toneladas em 2005, com 4,1 milhões de toneladas previstos para 2010. Novos produtos e novos processos continuarão a surgir devido ao trabalho incessante de pesquisa e desenvolvimento nesse campo.

4.1 – Esquema químico do Poliuretano (PU)

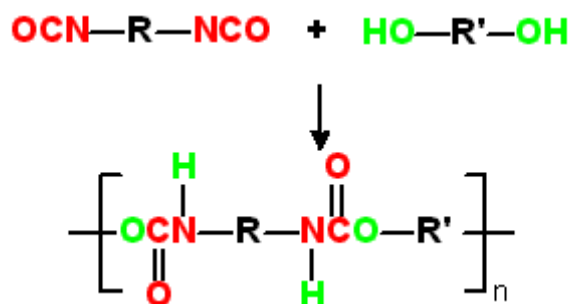


Figura 3 – Esquema de síntese de um poliuretano

4.2 - Composição do Poliuretano

O poliuretano é um produto sólido, com textura de espuma, e aparência entre a cortiça e o poliestireno expandido ("isopor"). É obtido a partir da reação química, que ocorre quase que instantaneamente, entre dois compostos químicos líquidos. Um dos compostos químicos é um ativador da reação (conhecido por MDI) e o outro é um composto químico conhecido como POLIOL. Para dar a aparência de espuma ao produto resultante da reação, emprega-se um gás como agente expensor. A espuma de poliuretano pode ser flexível ou rígida. A espuma flexível tem grande emprego na fabricação de itens tais como: colchões, estofamentos, esponjas de limpeza, peças para a indústria automobilística etc. Já a espuma rígida, graças ao seu elevado poder isolante, encontra grande aplicação na indústria de refrigeração (refrigeradores domésticos, caminhões frigoríficos, balcões frigoríficos, na construção civil, isolamento térmico e acústico diversos, etc). As espumas rígidas podem ser fabricadas por derramamento, injeção, spray, sistemas pressurizados, ou outras técnicas. Elas possuem uma estrutura polimérica altamente reticulada com células fechadas, podendo ter densidades tão baixas quanto 10 kg m³ até quase sólidos com 1.100 kg/m³. Todavia, o maior consumo é em espumas, de baixa densidade (28 a 50 kg/m³), usadas em isolamento térmico. As espumas rígidas de poliuretano são materiais termorrígidos (estrutura

macromolecular altamente reticulada), de baixa densidade e células fechadas (o que torna o material impermeável à água). São produzidas com polióis de baixa massa molar e alta funcionalidade. A espuma rígida de poliuretano (PU) tem sido empregada com sucesso como isolante térmico, não somente pelos valores extraordinários de isolamento e pela elevada resistência mecânica, mas também pela boa estabilidade dimensional e ainda por poder ser produzida diretamente a partir dos componentes líquidos no próprio local de aplicação. A espuma de PU é obtida basicamente através da reação de polimerização entre o polioliol e o isocianato acompanhada pela reação de expansão química (entre o isocianato e a água proveniente da resina) que produz CO₂, expandindo a espuma, e pela reação de expansão física proporcionada pelo agente de expansão que expande ainda mais o material (MCBRAYER, 1998; OERTEL, 1993). A expansão ocasionada pelo agente de expansão não é tão acentuada como a do CO₂ e, portanto, as paredes celulares não se rompem ao endurecer conseguindo-se assim uma espuma com a maior parte das células fechadas. Já a expansão do CO₂ favorece a formação de células abertas devido ao rompimento das paredes no momento do endurecimento da estrutura da espuma (OERTEL, 1993). A reação de polimerização à temperatura ambiente é lenta por isso é necessária a adição de certos compostos (catalisadores) que aceleram a reação. Com a finalidade de evitar a formação irregular de bolhas de gás e conseqüentemente o mau crescimento da espuma, adiciona-se silicone, que com sua ação surfactante, reduz a incompatibilidade entre o polioliol e o isocianato, proporcionando uma melhor mistura durante a reação e um efeito estabilizante durante o crescimento. Já a glicerina é um composto químico que contém OH e tem a função de proporcionar uma espuma mais rígida além de melhorar o fluxo (MCBRAYER, 1998; OERTEL, 1993). As espumas rígidas tornaram-se foco de discussões devido a aspectos relacionados à redução do uso dos clorofluorcarbonos (CFC's), inflamabilidade e reciclagem. Os CFC's estão sendo substituídos, como agentes de expansão em todas as aplicações, pelos clorofluorcarbonos hidrogenados (HCFC's), menos danosos ao meio ambiente (VILAR, 2001).

4.3 - Aditivos

Outros componentes, além dos polióis e isocianatos, participam nas reações de obtenção dos poliuretanos, dentre eles os catalisadores, silicones, retardantes de chamas, agentes de expansão dentre outros. Esses serão abordados mais detalhadamente nos itens a seguir.

4.4 – Endurecedores

Os endurecedores são utilizados na fabricação de poliuretanos celulares, espumas flexíveis, semi-rígidas, espumas rígidas e elastômeros e também nos poliuretanos sólidos. Revestimentos, selantes e adesivos também podem ser confeccionados mediante a ação de endurecedores. Esses representam importante função formação das espumas (BOLSONI, 2008). Os endurecedores aumentam a seletividade das diferentes reações químicas ocorridas durante a formação dos poliuretanos. As propriedades finais dependem dessas reações e essas, por sua vez, dependem do tipo e concentração do endurecedor ou mistura de endurecedores empregados. Assim os endurecedores são importantes no desenvolvimento das propriedades finais dos poliuretanos (FRISCH e VOGT, 1964). Aminas terciárias, endurecedores mais usados na fabricação dos poliuretanos, são utilizadas nas reações de polimerização do isocianato com o polioliol, formando poliuretano, e na reação de expansão do isocianato com a água, formando poliuréia e gás carbônico (VILAR, 2002).

4.5 - Silicones

Os silicones são usados nos poliuretanos celulares, que diminuem a tensão superficial do sistema, fazendo com que a espuma se agrupe, dando assim um efeito estabilizante durante o seu crescimento, evitando desta maneira a coalescência (processo químico de união de duas ou mais parcelas de uma fase)

das células e colapso. Os silicones também melhoram a dispersão da água no sistema hidrofóbico (insolúvel em água) poliol/isocianato e ajudam na mistura dos isocianatos e polióis (BOLSONI, 2008).

4.6 - Retardantes de chama

Os poliuretanos são inflamáveis e para minimizar este fenômeno são usados os retardantes de chama, sendo utilizados compostos fosforados e halogenados reativos como o dibromo propanol e os não reativos como dicloropropilfosfato conhecido como TCPP (BOLSONI, 2008).

4.7 - Agentes de expansão

Para a obtenção de poliuretanos celulares também são utilizados materiais que provocam a expansão do material, reduzindo a sua densidade, melhorando as propriedades dielétricas e de isolamento térmico e acústico (FRISCH e VOGT, 1964). Esses são denominados agentes de expansão, sendo que entre os mais utilizados está a água e os agentes de expansão auxiliares (AEAs). A água, classificada como agente de expansão primário, reage com os isocianatos liberando gás carbônico e este funciona como agente de expansão. Os agentes de expansão auxiliares são compostos com baixo ponto de ebulição que se volatilizam com o calor desprendido durante a reação de formação dos poliuretanos (VILAR, 2002).

5. ESTABILIZAÇÃO DE RECALQUES EM SOLOS MOLES

Quando o carregamento a ser imposto não for suportado pelo solo, como no caso das camadas de solos moles, faz-se necessário uma intervenção. Uma alternativa é a execução de inclusões rígidas no solo como sistema de melhoramento.

Solo Compósito - é uma técnica de melhoramento de solo, que além de transferir cargas desde a fundação para camadas de solo competente, melhora as características de resistência ao cisalhamento e deformação em camadas moles e muito moles do solo. A técnica aumenta a rigidez do solo, reduzindo os recalques totais e diferenciais, distribuindo a carga da estrutura entre o solo, agora mais rígido e as colunas. A introdução de geodrenos como meio drenante artificial imposto, isto é, adensamento de colunas de solo-cimento com drenos ao seu redor, acelera o processo. O solo com suas características de rigidez melhoradas, com o sistema solo melhorado/colunas de solo cimento, se comporta como um solo compósito.

Vantagens:

- Redução da deformação do solo, com altos níveis de rigidez e capacidade de carga.
- Boa adaptação a altos carregamentos superficiais e diversos requisitos de recalque.
- Ambientalmente amigável, pois não há bota-fora na execução do Solo Compósito.
- Alto rendimento executivo com a utilização de uma única equipe/equipamento.
- Aplicação em todo tipo de solo, incluindo compressível e orgânico (turfa).

O processo de executivo não produz vibrações ou danos às camadas superficiais, permitindo trabalhar em áreas adjacentes a estruturas sensíveis como fundações, pontes e edificações.

Poliuretano Estrutural

Quando se tratar de pequenas profundidades que se recalcam por vazados ou má compactação do solo, a injeção de Poliuretano Estrutural PUE é recomendável. Sua densidade é mais elevada, é bi-componente e chega a 6 MPa.

6. INJEÇÃO DE RESINA GEO-EXPANSIVA ESTRUTURAL EM SOLO

Nos últimos anos temos registrados crescentes aparecimentos patologias derivadas da movimentação e assentamento de estruturas, devido a uma série de processos no solo ligados a causas antrópicas ou naturais, levando a comunidade geotécnica a um especial interesse nas argilas expansivas. A utilização de injeções de resinas geo-expansivas estruturais (IRGEE) supõe, frente aos métodos convencionais, uma técnica rápida, limpa e de baixa invasividade. Estas injeções estão destinadas a consolidação do solo de fundação, eliminando deformações irreversíveis, devido a falta de compactidade do mesmo, fenômenos expansivos produzidos pela variação do nível do lençol freático, vazios sub-superficiais no solo, entre outros.

A intervenção com IRGEE prevê o melhoramento das características geotécnicas e a homogeneização, em termos de resistência geomecânicas, do solo de fundação, de modo que a resistência imposta seja suficiente para absorver as tensões transmitidas e anular futuros recalques diferenciais de estruturas portantes. Os resultados obtidos são, principalmente, o incremento das tensões horizontais e verticais em regime elasto-plástico. Tal incremento se traduz em um aumento das tensões efetivas mediante a drenagem da poro pressão. A expansão da resina induz, entre outros, à recuperação de todos os pontos de descarga da fundação. A baixa viscosidade da resina injetada aperfeiçoa a correta distribuição dos esforços no solo de fundação, exatamente nos pontos que oferecem menor resistência realizando, assim, uma uniformização de sua rigidez nas variadas camadas, compactando igualmente fundações desagregadas e recuperando-as.

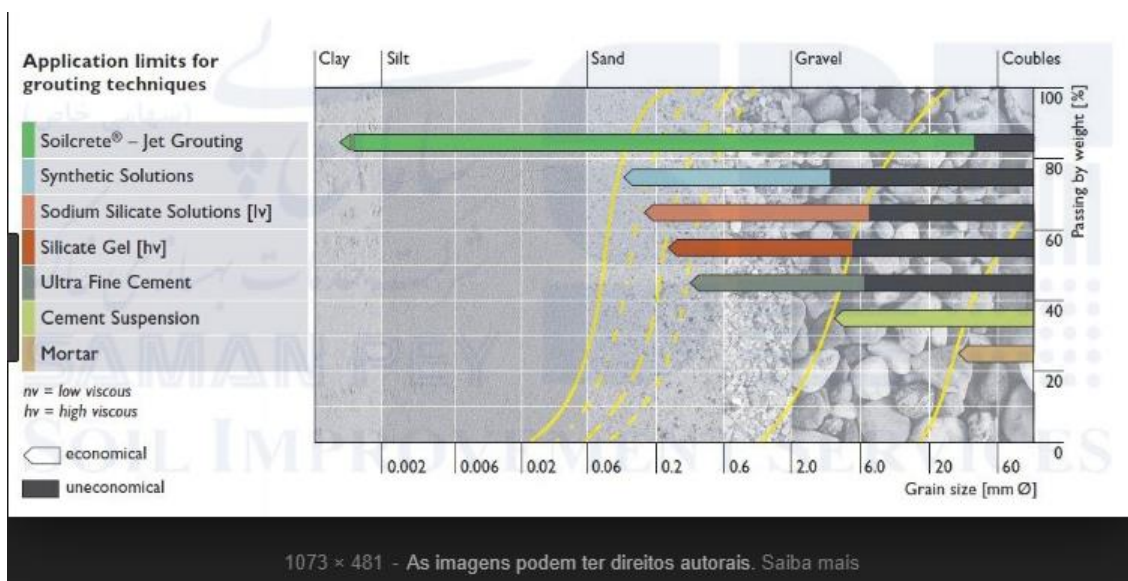


Figura 4 – Aplicação do método de rejuntamento a jato em comparação com outros métodos.

<https://samanpey.com/our-services/jet-grouting-and-deep-soil-mixing?lang=en>

7. SOLOS

Do ponto de vista litológico, os solos onde se produzem os melhores resultados são todos aqueles do tipo coesivo ou semi-coesivo: turfas, argilas orgânicas, argilas siltosas e siltes; incluindo aí, os solos arenosos fofos, onde as características de plasticidade são, em geral, de menor resistência à compressão, permitindo a maior facilidade de ingresso da resina e sua máxima expansão até obter um alto grau de compactação para todos os extratos do solo de fundação.

As injeções efetuadas formam um bulbo de injeção que desloca o solo, comprimindo-o e compactando-o, melhorando suas características de rigidez, resistência ao cisalhamento e compressibilidade. Um efeito colateral secundário desta intervenção, mas igualmente importante, é a impermeabilização de toda área tratada, evitando assim futuros assentamentos em solos coesivos, onde a variação do lençol freático afeta diretamente seu potencial expansivo.

A consolidação é realizada aproveitando a característica principal da resina, sua expansividade controlada, que produz no solo uma ação lenta e contínua, alcançando pressões teóricas de 2MPa, enquanto que a aplicação de pressões elevadas de argamassas cimentícias induzem ações dinâmicas incompatíveis com a matriz de solo, influenciando negativamente sobre a dissipação da poro pressão e, portanto, sobre a durabilidade dos efeitos impostos.

7.1 PATOLOGIA EM SOLOS

7.1.1 Conhecendo o Solo

As condições de formação do solo nem sempre são de fácil conhecimento. É importante ter-se em mente que esta fina camada de solo, com apenas alguns metros de profundidade, é resultado da ação de centenas, milhares de anos, dos agentes de intemperismos da natureza sobre as rochas.

Portanto, todos os trabalhos realizados sobre esta estrutura nem de perto se comparam com o potencial da natureza de alteração se realizam intervenções enormes, na tentativa de modificação da topografia e estabilidade, para suportar as diversas obras de construção civil a serem edificadas.

Exemplos típicos são as rodovias, conjuntos habitacionais, indústrias e armazéns, além da própria expansão das grandes cidades.

7.1.2 Tipos de solos e sua capacidade de suporte.

De acordo com o tipo de rocha formado na região em estudo, das condições de exposição e climáticas, acidentes e ocupações anteriormente experimentadas para formação do solo local, há a identificação dos diversos tipos de solos conhecidos no meio técnico e de suas características físicas.

Conforme a distribuição granulométrica do solo formado (tamanho dos grãos), minerais originais que formaram (composição mineralógica da rocha), condições de formação (resultado de ação de gelo e degelo, ou de vento, ou ainda

de carregamento pelas chuvas), e de sua identificação no campo e de seu estudo em laboratório, pode-se prever qual será seu comportamento frente as novas condições de exposição, ou comportamento frente as novas condições de exposição; ou seja, movimentação por terraplanagem, carregamentos, alteração da umidade do solo ou do ar.

Com estes estudos bem especificados e realizados, torna-se “segura” a condição de projeto, ou seja, maior a confiabilidade para adotarem-se parâmetros de projeto que conduzam a obra ao sucesso.

Para os solos comumente encontrados, que possuem uma composição de grãos, água e ar como indicado na Figura 4, vê-se claramente que no caso de atuação de carregamentos externos, ar e água tende a locomover para regiões menos tensionadas.

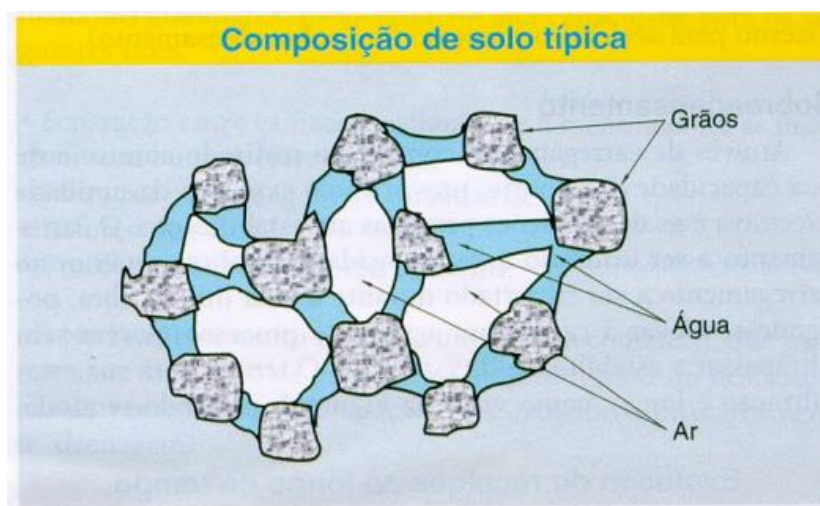


Figura 5 – Composição de solo típica

Esta migração será mais rápida ou mais lenta conforme:

- Granulometria do solo;

- Existência de camadas com maior velocidade de drenagem acima ou abaixo do solo em estudo;

- Intensidade e permanência do carregamento;

- Instalação ou existência de sistemas de drenagem;

- Inseridos em uma região mais extensa com alto teor de umidade ou saturada, estes terão um comportamento denominado de “solo mole”, e com

capacidade de suporte muito inferior se comparado com o mesmo material em local seco ou confinado.

Tabela 1– Limites de faixas dimensionais das partículas de solo

Limites de faixas dimensionais das partículas de solo	
Denominação	Limites usuais de diâmetro das partículas
Pedregulho	de 2,0 mm a 15,0 mm ou 4,8 mm a 15,0 mm
Areia	de 0,075 mm a 2,0 mm ou 0,06 mm a 4,8 mm
Silte	de 0,002 mm a 0,075 mm ou 0,005 mm a 0,06 mm
Argila	inferior a 0,002 mm ou 0,005 mm

Para os solos mais comumente encontrados, pode-se adotar as seguintes denominações em função da granulométrica e de seu comportamento com capacidade de carregamento e deformação serão indicativos nas tabelas 1, 2 e 3.

Em função destas características, verifica-se a necessidade de estudo do solo de cada nova obra ou etapa de uma obra, dependendo logicamente das dimensões do terreno, da complexidade da obra e de ensaios preliminares realizados para conhecimento.

Os estudos compreendem não só os ensaios de simples reconhecimento das camadas inferiores, mas também a completa caracterização dos solos de granulometria, mas em especial as argilas, como se verifica na Tabela 3.

7.1.3 Sobre adensamento

Através de carregamento com aterro realizado com solo de boa capacidade de suporte, provoca-se a expulsão da umidade excessiva e as deformações previstas até a estabilização. O carregamento a ser utilizado é de

intensidade igual ou superior ao carregamento a ser suportado durante a vida útil da obra, podendo-se elevar a carga para acelerar o processo; porém, sem ultrapassar a estabilidade do conjunto. O tempo para sua estabilização é longo. Podendo-se ainda, além de aumentar o aterro, instalar sistemas de drenagens que acelerem a remoção do excesso de água, e portanto, das deformações do conjunto.

Este sistema é muito seguro e confiável, apesar de exigir grande tempo, e seu controle é executado através de topografia.

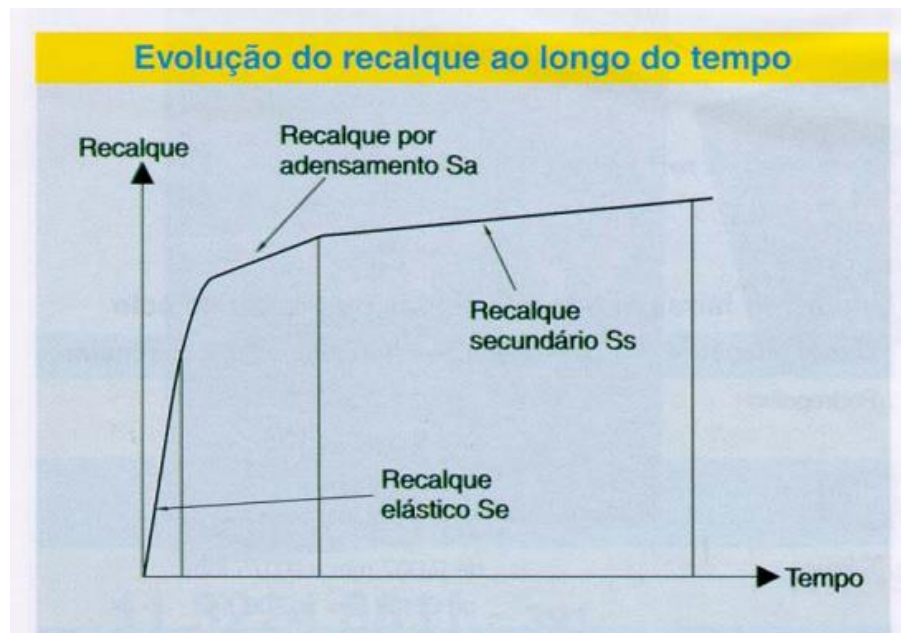


Figura 6 – Evolução do recalque ao longo do tempo

Tensões básicas segundo a NBR 6122/94

Classe	Descrição	Valores (MPa)
1	Rocha sã, maciça, sem laminações ou sinais de decomposição	3,0
2	Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	1,5
3	Rochas alteradas ou em decomposição	depende da rocha matriz e grau de decomposição
4	Solos granulares concrecionados, conglomerados	1,0
5	Solos pedregulhosos compactos a muito compactos	0,6
6	Solos pedregulhosos fofos	0,3
7	Areias muito compactas	0,5
8	Areias compactas	0,4
9	Areias medianamente compactas	0,2
10	Argilas duras	0,3
11	Argilas rijas	0,2
12	Argilas médias	0,1
13	Siltes duros (muito compactos)	0,3
14	Siltes rijos (compactos)	0,2
15	Siltes médios (medianamente compactos)	0,1

Figura 7 – Tensões básicas segundo a NBR 6122/94

Fatores que afetam a compactidade de solos

Nível de importância	Fatores a serem estudados
Alta (importante)	Índice de plasticidade Pressão de confinamento (em areias, siltes e argilas de baixa plasticidade) Tempo (em solos argilosos) Frequência (em solos argilosos) Grau de saturação (em solos argilosos) Tipo de vibração Grau de cimentação Número de ciclos de carregamento Técnica de ensaio
Não importante	Condição de drenagem (em areias) Índice de vazios, porém se considerado o efeito do índice de plasticidade i_p Sobreadensamento Tensão cisalhante estática

téchne mar/abr - 2001 - nº 51

Figura 8 – Fatores que afetam a compactidade de solos

8. TIPOS DE REFORÇO EM SOLOS

8.1 Troca do Solo

Esta metodologia era a mais comumente utilizada anos atrás. Porém, com as dificuldades de logísticas (remoção, transporte e disposição do solo mole, transporte e adensamento do solo bom em substituição ao removido, obtenção de solo bom para aterro), dificuldades ambientais (uso de combustível não renovável, remoção de solo bom da jazida e disposição do solo mole), e as limitações econômicas (custos com transporte, disposição e adensamento de material inerte), esta metodologia está em franco abandono.

Além disso, para garantia da estabilidade ao longo do tempo, necessita-se eliminar os focos de saturação do solo com água, e rígido controle das profundidades de material removido, da qualidade do material e de sua perfeita compactação em camadas.

Notas: Recentemente tem sido utilizado mistura de solo, cimento, (baixo consumo) e aditivos, comercialmente denominados de “ativadores de solos para aterros” ou “Darafill” que conferem elevado desempenho sem a necessidade de equipamentos de terraplanagem ou controles sofisticados.

8.2 Injeções Químicas

Estes procedimentos, denominados comercialmente de “deepinjection” ou Jet Grouting”, caracterizam-se pela injeção de produtos que endurecem quimicamente o solo sob pressão, e que possibilitam a estruturação da massa de solo tratado. O sistema DI é realizado a baixas pressões, possibilitando a penetração dos produtos através dos vazios do solo, com baixa velocidade, sem causar danos ao conjunto; é o mais indicado para solo com grande número de vazios.

Já o Sistema Jet Grouting é realizado a alta pressão (200 a 500 vezes a pressão atmosférica), desagregando o solo e misturando-o ao aglomerante, transformando o maciço tratado em conjunto com resistência e deformabilidade adequada ao que se destina. Este sistema poder ser utilizado para qualquer tipo de

solo. Porém, os solos orgânicos ou contaminados com produtos químicos desconhecidos precisam ser testados, pois pode haver incompatibilidade do endurecedor químico com estes materiais. Exemplo disto, é o uso de cimento em solos orgânicos, em que o cimento não reage devido à acidez do local.

As injeções químicas geralmente são usadas para preencher vazios no solo (fissuras e estruturas porosas) com o objetivo de aumentar a resistência à deformação, fornecem coesão, resistência ao cisalhamento e resistência à compressão uniaxial ou finalmente (ainda mais frequentemente) reduzir a condutividade e a porosidade interconectada num aquífero (MOSELEY E KIRSCH, 2004).

As injeções profundas para engenharia de solo podem ser sub-dividido em: rejuntamento por permeação, rejuntamento por compactação, rejuntamento por fraturamento hidráulico, rejuntamento por jato, rejunte de rocha e método de mistura profunda.

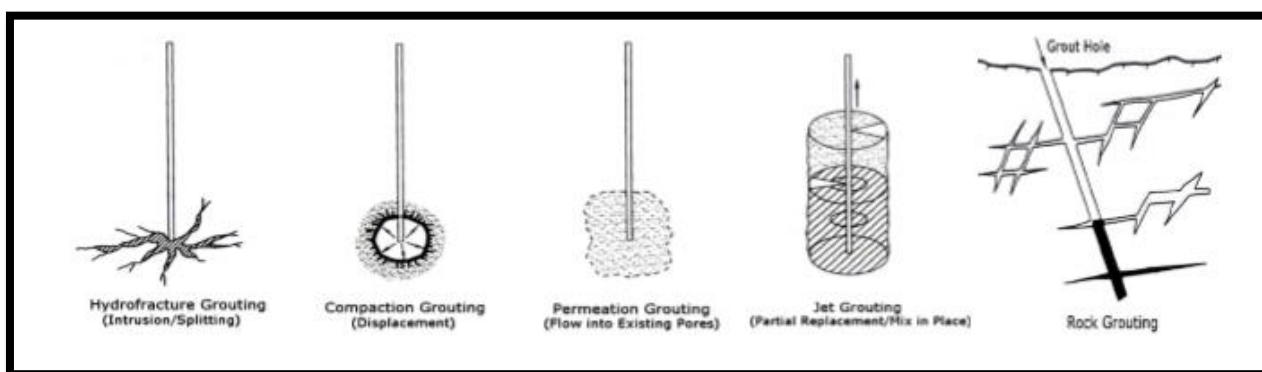


Figura 9 – Métodos de injeção em engenharia geotécnica

8.3 Fibras para reforço de solos

Desde a antiguidade são utilizadas fibras, a princípio vegetais ou animais, e mais recentemente plástica, para realizar a interação entre partículas de solo formando massas mais estáveis. Exemplo típico é o enraizamento das gramas e outras vegetações rasteiras, que possibilitam estabilizar taludes e outras áreas instáveis.

8.4 Geossintéticos: Geotêxteis e geogrelhas

As normas definem geossintéticos como elementos planos que, utilizados em combinação com solos, rochas ou outros materiais granulares, proporcionam à capacidade para os seguintes usos:

Separação entre camadas, evitando-se a mistura entre as mesmas, com ou sem carregamento;

Filtração ou drenagem de camadas de solo;

Reforço de solos;

Fundações sobre solos estruturados.

Sistemas de reforço de solos		
Os sistemas de reforço de solos, em função do tipo de obra a ser instalada, podem ser:		
Tipo de obra a ser reforçada	Tecnologia a ser empregada	Usos e vantagens do sistema
Pisos e pavimentos	Drenagem	Uso generalizado e essencial para a durabilidade da obra e segurança dos usuários
	Sobreadensamento	Uso generalizado em solos moles e orla marítima, porém com estabilização a longo prazo e risco de falha
	Troca de solo	Em desuso, limitada a volumes pequenos
	Injeções químicas	Inviável técnica e economicamente
	Fibras	Falta cultura de uso nas áreas de aterro, sendo uma tecnologia a ser implantada a curto prazo
	Geotêxtil	Muito utilizado em drenagem e fundamental como elemento de separação entre camadas
	Geogrelha	De grande valia pela velocidade de execução e viabilidade técnica e econômica
Reforço de fundação	Drenagem	Uso generalizado e essencial para a durabilidade da obra
	Sobreadensamento	Uso restrito à disponibilidade de área, material adequado e tempo para estabilização
	Troca de solo	Em desuso, limitado a pequenos volumes
	Injeções químicas	Excelente desempenho nesta área, viabilidade técnica, logística e econômica
	Fibras	Falta cultura de uso nas áreas de aterro, vantagens técnicas e econômicas
	Geotêxtil	Utilizado em drenagem e essencial como elemento de separação entre camadas
Aterro sobre solo mole inclusive vizinhos	Geogrelha	De grande valia, pela velocidade de execução e viabilidade técnica e econômica
	Drenagem	Uso generalizado e essencial para a durabilidade da obra e segurança dos envolvidos
	Sobreadensamento	Em desuso, limitado a pequenos volumes e logística, risco de falha
	Troca de solo	Em desuso, exigindo muito material e tratamento adequado do rejeito
	Injeções químicas	Inviável economicamente
	Fibras	Pouco recomendável
	Geotêxtil	Utilizado em drenagem e essencial como elemento de separação entre camadas
	Geogrelha	Fundamental pela velocidade de execução e viabilidade técnica e econômica

Figura 10 – Sistemas de reforço de solos

9. MÉTODOS DE INJEÇÃO E REJUNTAMENTO

9.1. Injeção de Permeação

Este método descreve o processo de preenchimento de juntas ou fraturas em rocha ou poros no solo com uma argamassa sem perturbar a formação. Mais especificamente, o rejunte de permeação refere-se à substituição de água em vazios entre partículas de solo com um fluido de argamassa a baixa pressão de injeção, de modo a evitar a fratura (MANFRED, 1990). É uma técnica que geralmente é usada para reduzir a permeabilidade do solo e controlar o fluxo de água do solo, mas também pode ser usada para fortalecer e endurecer o solo (CRIA, 2000).

9.2. Injeção de Compactação

Neste método, a mistura de argamassa é projetada especificamente para não permear os vazios do solo ou misturar-se com o solo. Em vez disso, desloca o solo no qual é injetado. Em depósitos granulares não na sua densidade máxima, o volume de vazios é reduzido e o depósito é densificado localmente (REUBEN, 2003). Na cimentação de compactação, uma argamassa muito dura (digamos, 25 mm) é injetada em solos soltos, formando bulbos de argamassa que deslocam e densificam o solo circundante, sem penetrar nos poros do solo (MANFRED, 1990).

9.3. Reidratação por Fratura Hidráulica

A injeção por fratura hidráulica é a fratura deliberada do solo (solo ou rocha) usando argamassa sob pressão. Tipicamente é usado para compactar e endurecer o solo ou para acessar vazios inacessíveis, reduzindo assim a permeabilidade da massa do solo e produzindo a elevação controlada de estruturas (CRIA, 2000). Se a pressão de cimentação for aumentada o suficiente, uma massa de solo pode se dividir e fissuras artificiais cheias de argamassa são formadas; na rocha, as fissuras existentes podem aumentar e novas quebras podem ocorrer. Isto

também se refere como claquagem por engenheiros franceses (CAMBEFORT, 1977).

9.4. Jet Grouting

A água de alta pressão ou argamassa é usada para fisicamente perturbar o solo, modificando-o e melhorando-o. Em operação normal, a coluna de perfuração é avançada até a profundidade necessária e, em seguida, a água de alta pressão ou argamassa é introduzida durante a retirada das hastes (MOSELY E KIRSCH, 2004).

9.5. Injeção em Rochas

Injeção em Rochas é o enchimento ou o preenchimento parcial das fissuras, fraturas ou juntas em massa rochosa com rejuntas sem criar fraturas novas ou abrir existentes, a fim de reduzir a permeabilidade e aumentar a rigidez da massa rebocada (CIRIA, 2000).

9.6. Compensação Grouting

Compensação Grouting é o uso responsivo da compactação, permeação ou rejuntamento por fratura hidráulica como uma intervenção em uma estrutura existente e uma operação de engenharia (particularmente escavações de túnel). O objetivo é minimizar o movimento do solo que afetaria a estrutura existente (CIRIA, 2000).

9.7. Métodos de Mistura Profunda (DMM)

O Método de Mistura Profunda (DMM) é hoje aceito mundialmente como um método de melhoria do solo que é realizado para melhorar a resistência, propriedades de deformação e permeabilidade do solo. Baseia-se na mistura de ligantes, como cimento, cal, cinza volante e outros aditivos, com o solo pelo uso de ferramentas rotativas de mistura para formar colunas de um material de endurecimento, uma vez que as reações pozolânicas entre o aglutinante e os grãos do solo são desenvolvidas (COSTAS E MARIA, 2008). Na Suécia e na Finlândia,

as técnicas de estabilização profunda são bastante utilizadas para a estabilização do solo mole (AHENBERGET AL, 1995). Com base nos requisitos de projeto, condições do local, camadas de solo e rocha, restrições e economia, o uso de métodos de mistura profunda (DMM) está se espalhando cada vez mais. Esses métodos têm sido sugeridos e aplicados para estabilização de solos e rochas, estabilidade de encostas, mitigação de liquefação, redução de vibração (ao longo da ferrovia), fundações e aterros rodoviários e ferroviários e de pontes, construção de sistemas de suporte de escavação ou proteção de estruturas próximas a escavações solidificação e estabilização de solos contaminados, etc.

Espera-se que a demanda por melhoria e estabilização da terra para diferentes propósitos aumente no futuro e a melhor maneira de realizá-la é usando métodos de mistura profunda (DMM). É fortemente sugerido que, quando não houver espaço suficiente, a estabilidade de deslizamento e capotagem seja aumentada usando âncoras de solo. A principal vantagem destes métodos é a longo prazo aumentando em força, especialmente para alguns dos ligantes utilizados. A reação pozolânica pode continuar por meses ou mesmo anos após a mistura, resultando no aumento da resistência da argila estabilizada com cimento, com o aumento do tempo de cura (BERGADO, 1996; ROSLAN E SHAHIDUL, 2008). A administração da Rodovia Federal sugeriu que essas técnicas podem ser classificadas com base em (ELIAS ET AL, 1998):

9.7.1. Método de injeção aditiva (ou seja, injeção úmida ou seca).

9.7.2. Método pelo qual o aditivo é misturado (isto é, energia rotativa / mecânica ou por jacto de alta pressão).

9.7.3. A localização da ferramenta de mistura (isto é, perto da extremidade das hastes de perfuração ou ao longo de uma porção das hastes de perfuração).

A maioria das empresas que trabalham nestes campos concordam que o DMM pode ser dividido em três técnicas comuns (ANDROMALOS, 2000):

I. Mistura de Solo Raso (SSM), que usa um único trado de mistura mecânica localizado no final da perfuração ferramenta (barra de Kelly).

II. DeepSoilMixing (DSM), que utiliza uma série de brocas sobrepostas e eixos mecânicos de mistura.

III. Jet Grouting, que pode ser considerado um tipo de mistura de solo. Para injetar um líquido em vazios dentro de uma estrutura, é necessário deslocar os gases e líquidos de dentro deles. Isso utiliza alta velocidade, 28 a 42 MPa de contrapressão e jatos para cisalhar hidraulicamente o solo e combina uma argamassa de cimento ou um aglutinante adequado para formar uma coluna ou coluna de solo-cimento com solo e ligante especial.

10. PATOLOGIA

Desde os primórdios da civilização moderna, os construtores de estradas e os empreiteiros da construção civil entenderam a relação entre o solo estável e as estradas, pontes e estruturas que se encontram naquele solo. Quando as condições climáticas produzem chuva, neve ou mudanças bruscas de temperatura, podem ser criados espaços subterrâneos profundos como vazios, fissuras e bolsas de água que, por sua vez, desestabilizam superfícies de estradas, estradas e fundações de edifícios. O resultado - rachaduras, buracos e buracos de escombros que podem causar estragos em ativos públicos, como estradas, esgotos, oleodutos, pontes e sustentações de viadutos, bem como prédios e estruturas privadas.

Mesmo que as equipes de trabalho possam selar as fissuras, preencher buracos, colocar novo asfalto ou reconstruir as infraestruturas danificadas, elas apenas mascaram o problema subjacente, exigindo que uma rodada de manutenção similar seja necessária novamente após a próxima estação de mau tempo. A chave para ter superfícies de estradas de qualidade e estruturas públicas que duram mais e exigem menos manutenção é ter uma base de solo subjacente estável na qual esses materiais e componentes se encontram, e devem preencher essas extensões remanescentes, e mais importante, também devem expulsá-los e vedá-los da entrada de água em bolsões de solo subterrâneos.

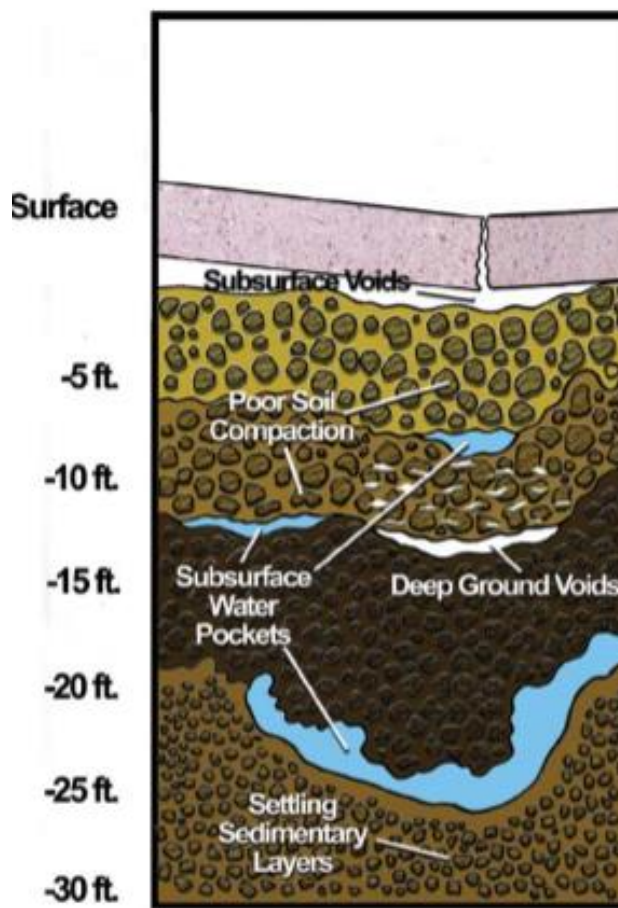


Figura 11 – Elementos de uma base geológica instável.

Muitos municípios e empresas comerciais estão agora reexaminando o papel que ter uma base subterrânea estável desempenha na manutenção de suas estruturas públicas e privadas, e estão colocando uma ênfase maior em medidas preventivas destinadas a fortalecer esses estratos subterrâneos do solo. Ao aumentar a densidade de solos sub-superficiais comprometidos como parte da manutenção do projeto, os reparos são mais duradouros e o ativo é melhor protegido

O objetivo do processo de injeção profunda é garantir um aumento significativo na capacidade de suporte do solo. Para conseguir isso, utiliza-se as mais avançadas tecnologias e técnicas de injeção do setor. A chave do processo DeepInjection é a aplicação do material polimérico. Esta resina expansiva de alta densidade oferece vantagens superiores em relação aos materiais tradicionais menos eficazes. O polímero preenche, densifica e estabiliza solos compressíveis

de baixa densidade a profundidades de 30 pés e além. É ideal para rodovias, aproximações de pontes / lajes de partida, bem como pistas de taxiamento, pistas e túneis que apresentam problemas de ocupação causados por uma sub-base pobre e compactação do solo. O poliuretano também é especialmente formulado para ser rápido e hidrossensível, garantindo que não seja afetado por nenhuma água ou solo úmido que possa estar sob o pavimento da superfície.

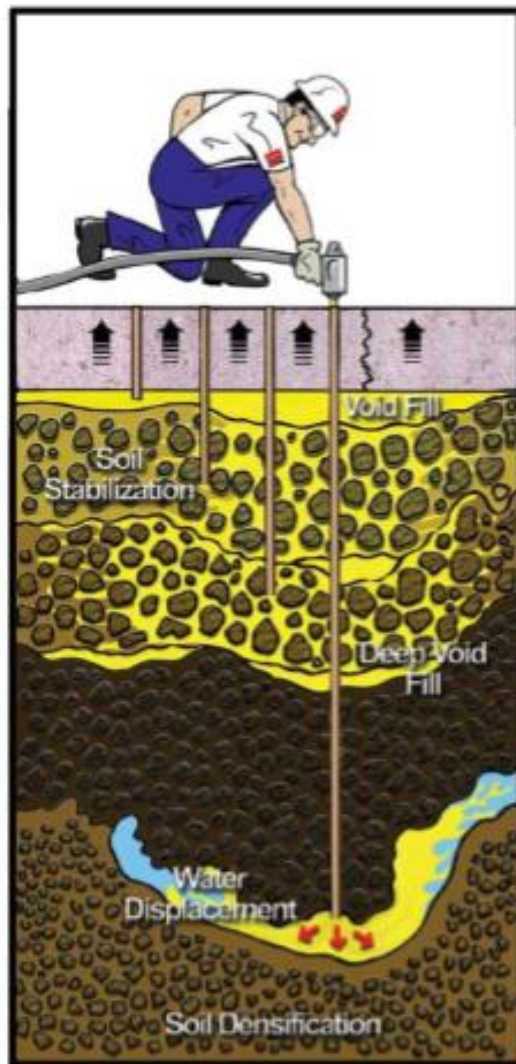


Figura 12 – Aplicação do material polimérico em solo instável

Os benefícios do material incluem:

Durabilidade - O polímero é um material de poliuretano especialmente formulado, garantido por dez anos contra qualquer perda de estabilidade dimensional e deterioração.

Ação Rápida - Com o material, os requisitos de tempo para o processo UDI são reduzidos para horas, em vez dos dias ou semanas necessários para outras técnicas. Como resultado, o tempo necessário para a conclusão do projeto é drasticamente reduzido.

Impermeável - A natureza única do material polimérico empurra e desloca a água. A química do polímero impede a reticulação fraca no momento da injeção. Quando concluir este processo, evita mais infiltração de água. O elo forte que é criado impede a quebra do material quando o polímero é exposto a quantidades subsequentes de água. O material também pode ser usado para vedar tubulações subterrâneas cercado a junta com vazamento.

Expansivo - Devido às suas capacidades exclusivas de expansão, o material tem a capacidade de preencher todos os vazios ou fissuras enquanto comprime e adensa os solos.

Leve - O material polimérico é extremamente leve, pesando menos de 5% de uma quantidade comparável de argamassa à base de cimento / concreto. Como resultado, uma quantidade mínima de peso adicional de sobrecarga é introduzida no ambiente de solo degradado.

Seguro - O material polimérico curado é inerte, ambientalmente neutro e não contribui para a contaminação ou poluição do solo ou da água.

Em comparação, outros procedimentos de adensamento do solo, como cimentação de compactação cimentícia, que utiliza argamassas de suspensão pesadas, adicionam uma quantidade significativa de peso que pode contribuir para problemas adicionais de solo ao longo do tempo.

11. FASES DO PROCESSO DE INJEÇÃO

11.1 Fase de Preparação – Determinação do padrão de injeção e perfuração dos orifícios, uma vez que os testes do penetrômetro tenham sido concluídos, os locais específicos e as profundidades dos estratos mais fracos do solo são registrados. A partir desta informação, uma grade de injeção é projetada, com o objetivo de restaurar a resistência adequada do solo nas zonas mais fracas. Furos de injeção, de 1/2 "a 3/4" de tamanho, são então perfurados para que o material possa ser injetado em uma variedade de profundidades determinadas, dependendo das condições de solo indicadas.

11.2 Fase Primária de Injeção – Polímero é injetado nos locais ralos uma vez que todos os furos de injeção são perfurados, um pedaço de tubo é colocado em cada buraco para posicionar com precisão o material. O polímero, que é baseado em uma combinação de dois produtos químicos diferentes, é aquecido antes de ser injetado no solo para facilitar o processo de injeção. A área onde o material de poliuretano é injetado é chamada de "esfera de influência". Os locais mais fracos mais próximos da superfície, compreendendo profundidades entre 3 e 9 pés, recebem a primeira injeção. Quando a injeção é concluída, o material polimérico atinge sua densidade máxima muito rapidamente. A expansão do polímero termina dentro de um minuto, atingindo 90 por cento. O material polimérico sintético é colocado nas áreas superiores de fraca resistência do solo, onde se expande rapidamente. Ao fazê-lo, os solos são compactados e as fissuras e vazios próximos são preenchidos. Como o polímero é hidrossensível, qualquer água subterrânea nesse caminho de expansão é deixada de lado. Esta propriedade permite que injeções profundas ocorram sob qualquer tipo de condição do solo, incluindo solos altamente saturados.

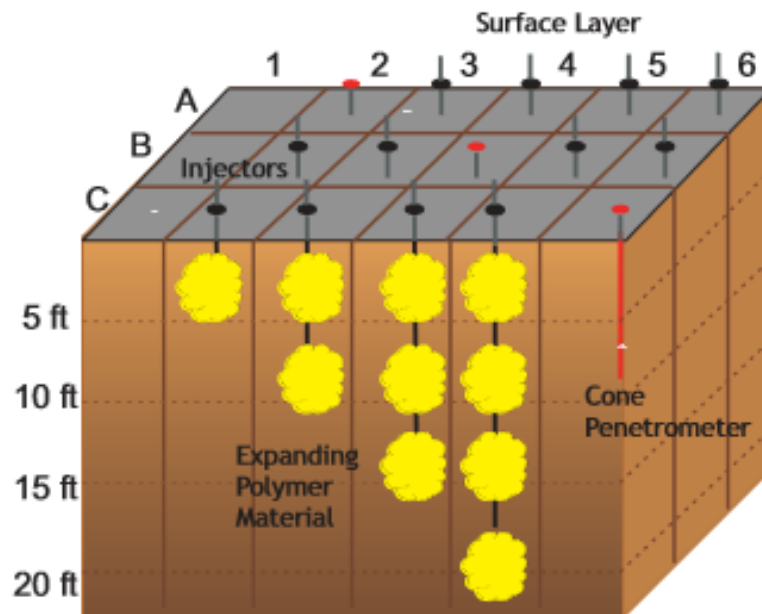


Figura 13 – Processo de Injeção Profunda Usando o Material Polímero

11.3 Fase Secundária de Injeção – O polímero é injetado nos locais mais profundos quando o estrato superior é densificado, níveis mais baixos podem ser abordados. Dependendo das condições do solo subterrâneo e das profundidades necessárias, pode haver locais adicionais de injeção profunda. Essas injeções mais profundas abrangem toda a área de suporte do solo necessária para a carga estrutural autoritária. Cada injeção continua até um ponto de elevação mínima registrado na superfície, indicando a suficiência de densificação.

À medida que esta porção final do polímero se expande, a esfera de influência circundante compacta e densifica o solo para afetar uma elevação controlada das cargas do rolamento. Esses movimentos são monitorados e controlados com precisão pelos dispositivos de medição de nível a laser na superfície. Ao proceder desta forma, estas injeções garantem um aumento adequado da capacidade de suporte de toda a fundação subterrânea. Essa densificação do solo é facilmente verificada por medições comparativas realizadas antes e depois do uso do penetrômetro de cone dinâmico. As cargas do rolamento são subseqüentemente distribuídas tanto na superfície plana quanto nos estratos compactos de solo / resina subclasse.

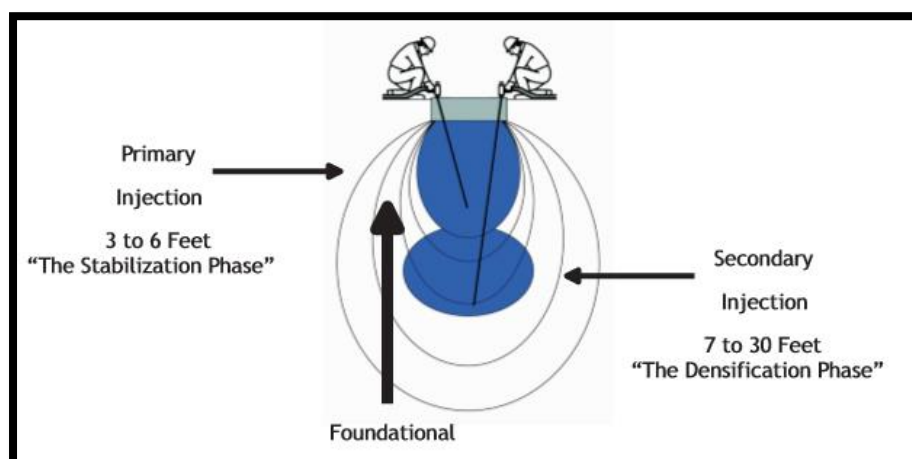


Figura 14 – Procedimento de injeção profunda em solo

O DeepInjection Process fornece uma solução econômica, rápida e segura para a estabilização do solo. Como pioneira na aplicação das mais recentes tecnologias para solucionar problemas complexos de estabilização do solo, oferece uma cura "sem interrupções" para estradas, estradas / pontes, problemas de reparo de pistas / pistas, densificação profunda do solo e vedação de vazamentos subterrâneos. Com o processo da UDI, muitos dos governos estaduais, municipais e municipais de hoje podem fazer o uso mais econômico de recursos limitados, enquanto melhoram drasticamente a qualidade e a longevidade de seus investimentos em infraestrutura existentes.

Para resumir, o DeepInjection Process oferece as seguintes vantagens:

I - Eficiente - A resolução de problemas de estradas, estradas e pontes raramente deve exigir, se é que há, um tempo de inatividade extenso. A traz uma solução "sem interrupção" para o levantamento de pavimentos, serviços de infraestrutura, pistas e estabilização do solo.

II - Baixo Custo - A Injeção Profunda é uma alternativa altamente eficaz e de baixo custo aos métodos mais tradicionais de reparo de escavação. Infraestruturas, estradas, aproximações / partidas de pontes e túneis são colocados em terra firme, sem necessidade de reconstrução dispendiosa. Os custos com equipamentos, mão de obra e materiais são significativamente reduzidos. Como não há necessidade de deixar a estrada ou a estrutura fora de serviço, ocorrem interrupções mínimas, levando a economias de custo adicionais. Como o problema

é resolvido na origem, quaisquer problemas adicionais ou relacionados não se repetem ou exigem manutenção futura.

III - Rápido com interrupção mínima - Com o processo Deep Injection, a maioria dos reparos pode ser concluída em questão de dias, em vez de semanas. O trabalho é frequentemente realizado durante as horas noturnas fora do horário de pico. Como há um tempo de cura rápido associado ao material polimérico, as equipes de trabalho podem reabrir as faixas de tráfego ao concluir cada seção da área de reparo do projeto.

IV - Silencioso e Seguro - O Processo de Injeção Profunda é o processo de estabilização de solo mais silencioso e seguro do mundo. Por meio de tecnologias avançadas e equipamentos de última geração, esse processo tem o menor ruído de qualquer método alternativo. Além disso, todos os funcionários e afiliados da passam por um treinamento rigoroso, garantindo o local de trabalho mais seguro, previsível e mais eficiente disponível. Todos os materiais são 100% ambientalmente seguros e inertes, evitando a poluição do meio ambiente ou das águas subterrâneas adjacentes.

12. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, será apresentado um experimento realizado com o intuito de analisar o desempenho da aplicação de resina de poliuretano expansível em solo arenoso saturado com água, quanto à capacidade de permeabilidade do material, consolidação do material arenoso e resistência de compressão mecânica.

O programa experimental consiste na execução de dois pilotos, moldados in loco de perfurações em solo estável e preenchimento de material livre e coesão, estas perfurações terão dimensões variadas sendo diâmetro = 1,5 metro, profundidade de 4,0 metros, a perfuração será revestida com lona plástica, com a finalidade de conter o material de diferentes classes que serão preenchidas. A outra finalidade desta lona será conter a água utilizada no processo de saturação do solo.

No interior das perfurações serão instalados dois sistemas de tubos injetores de resinas de poliuretano.

As perfurações serão ensaiadas para determinação do método mais eficaz para injeções profundas, onde será analisada a capacidade de preenchimento de solo, formação de bulbos de tensões, e fator forma com maior área de preenchimento. A análise será realizada com base nos resultados dos ensaios visual das dimensões da peça. Alguns parâmetros foram considerados constantes em todo o estudo, de modo a padronizar os principais parâmetros;

- a) Característica da resina de Poliuretano;
- b) Bomba Injetora da Resina de Poliuretano;
- c) Processo de produção e forma aplicação;
- d) Solo arenoso a ser injetado;
- e) Dimensões das Perfurações;
- f) Quanto ao Sistema de Tubos Injetores foram utilizadas duas metodologias distintas, sendo uma injeção por cota através de vários tubos injeção e outra direta através de único tubo.

12.1. 1º Experimento – Injeção de PU por estágio

Para este experimento foi considerado a técnica de injeção por estágio, que consiste em instalar tubos distintos em alturas variadas da perfuração. Cada tubo tem o objetivo de conduzir a resina para o trecho preestabelecido. O procedimento de aplicação da resina se dá pelo ponto mais inferior para o ponto mais superior. A seguir dados sobre o Experimento 1.

Tabela 2 – Ensaio de injeção em solo saturado com resina de PU (Teste 1)

Ensaio de Injeção em solo saturado com Resina de PU									
experimento 1	Dimensões das Pefurações			Reaterro com material arenoso			Dimensões da Base de Concreto		
	Diametro (m)	Altura (m)	Volume (m³)	Diametro (m)	Altura (m)	Volume (m³)	Diametro (m)	Altura (m)	Volume (m³)
	1,5	4	7,07	1,5	3,8	6,71	1,5	0,2	0,35

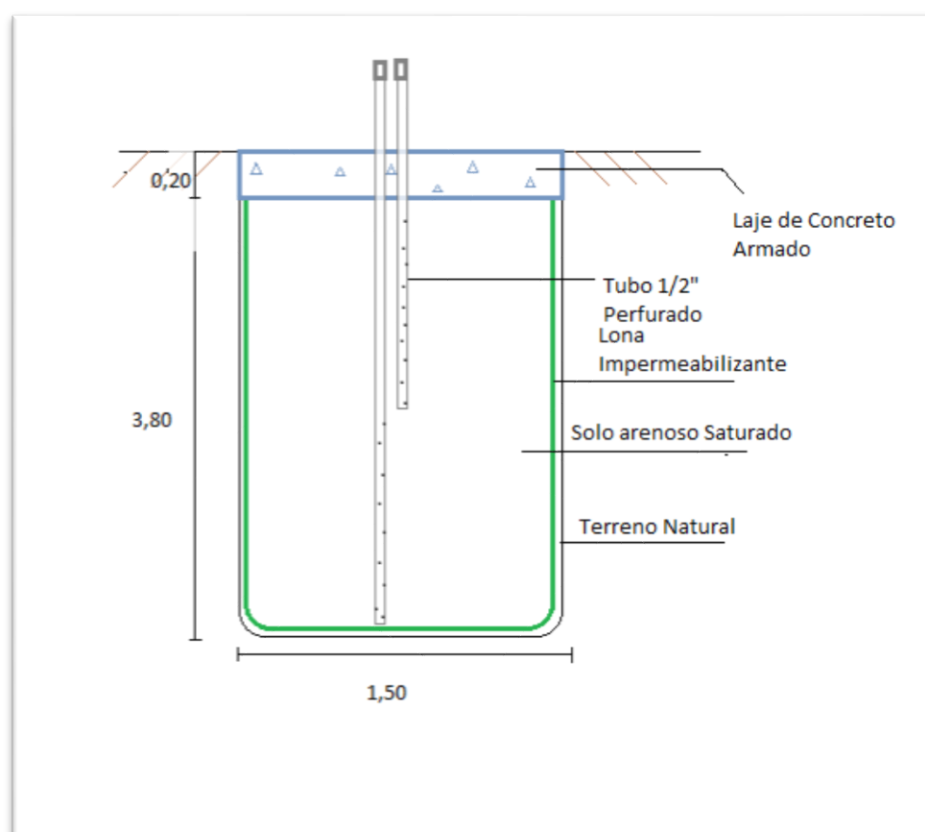


Figura 15 - Experimento 1: Injeção de PU por estágio

12.2. 2º Experimento – Injeção de PU direta

Para este experimento foi considerado a técnica de injeção direta, que consiste em instalar um único tubo de injeção no interior da perfuração. Esse tubo tem o objetivo de conduzir a resina por toda extensão da perfuração.

Tabela 3 – Ensaio de injeção em solo saturado com resina de PU – (Teste 2)

Ensaio de Injeção em solo saturado com Resina de PU									
experimento 2	Dimensões das Perfurações			Reaterro com material arenoso			Dimensões da Base de Concreto		
	Diametro (m)	Altura (m)	Volume m ³	Diametro (m)	Altura (m)	Volume (m ³)	Diametro (m)	Altura (m)	Volume (m ³)
	1,5	4	7,07	1,5	3,8	6,71	1,5	0,2	0,35

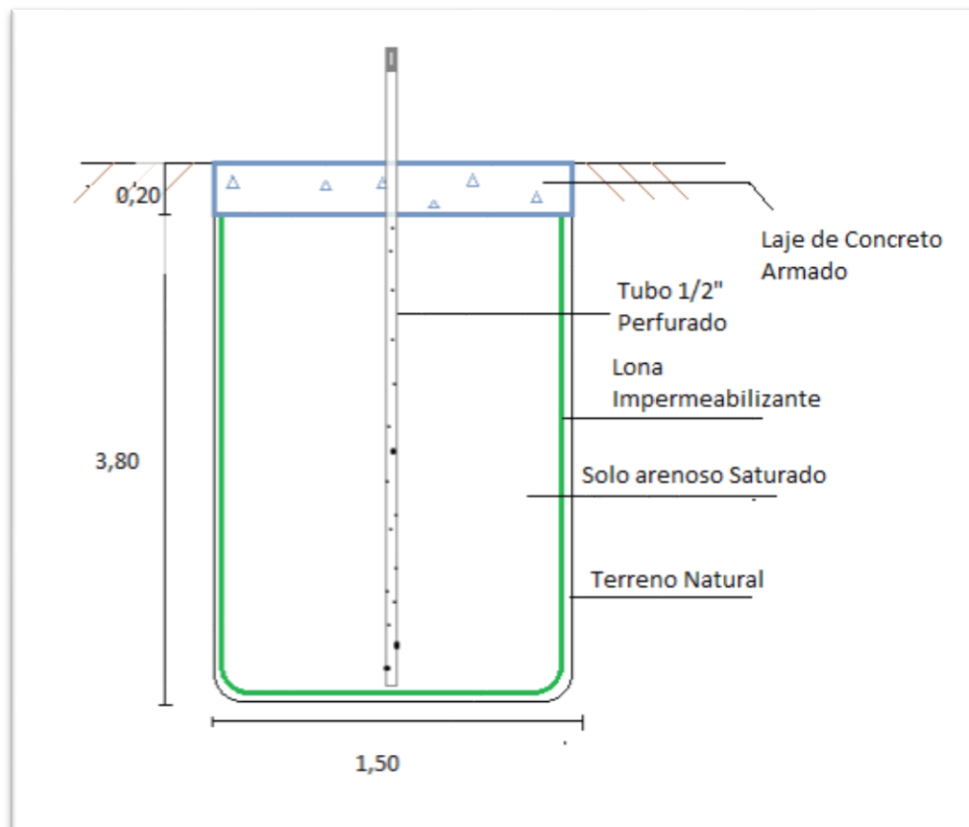


Figura 16 - Experimento 2: Injeção direta de PU

12.3. METODOLOGIAS EXECUTIVAS

Detalharemos à seguir como foram realizadas todas as etapas da montagem dos experimentos, equipamentos e materiais utilizados.

12.3.1 Equipamentos

Bomba de Injeção

Para realização dos experimentos, utilizamos uma bomba de injeção bi-componente, de alto desempenho com acionamento pneumático. Eficiente técnica de mistura com elementos estáticos, extensível para materiais de alta viscosidade.

Tabela 4: Dados técnicos da bomba de injeção bi-componente

Dados Técnicos — MC-I 700			
Característica	Unidade	Valor	Observações
Peso	kg	aprox. 50 kg	
Dimensões (altura, largura, comprimento)	cm	100 / 55 / 50	
Unidade de bombeamento bicomponente			
Máxima pressão de operação	bar	200	
Máxima vazão de descarga	l / min	14	
Taxa de transmissão pneumático/hidráulico		1 : 25	
Máxima pressão de entrada de ar	bar	8	
Capacidade mínima de vazão de entrada de ar	l / min	500	
	PCM	18	
Número de elementos estáticos de mistura por cilindro misturador	unidade	10	



Figura 17 – Bomba de injeção bi-componente MC – I 700

Compressor de ar

Para um acionamento contínuo foi necessária utilização de compressor com capacidade mínima de vazão de ar de 500 litros/min. (18 PCM). A pressão do ar de entrada não deve ser superior a 8 bar.

Tubos Injetores

O modelo dos tubos injetores utilizados para os experimentos, foi composto de Tubo de aço galvanizados com diâmetro = 20,00 mm rosqueável, possibilitando a extensão em vários níveis. O dispositivo tem em seu corpo cilíndrico perfurações de modo permitir a permeabilidade da resina para o solo, perfurações intercaladas com diâmetro 8,00 mm.

Para acoplamento com a bomba injetora foram utilizados engates rápidos com diâmetro de $\frac{1}{4}$ ", proporcionando vazão constante da resina no sistema.



Figura 18 – Ponteiros dos tubos injetores, com esquematização do sistema de encaixe.

12.3.2 Materiais

Poliuretano

A resina utilizada de poliuretano utilizada nos experimentos, foi formulada com dois componentes: Componente A (Isocianato) e Componente B (Poliol). A resina possui formulação no estado líquido e quando misturados os componentes, ocorre uma reação exotérmica, o material expande e solidifica.

Tabela 5 – Dados técnicos da resina de Poliuretano.

Resina de Poliuretano			
Fabricante	Nomecratura		Resina
Polyurthane	Componente A	ECOPOLY ISO - BIOPOL MDI L60 - ACL	isocianato
	Componente B	ECOPOLY POLIOL - BIOPOL GM 30 H "B"	Poliol

A formulação da resina utilizada levou em consideração sua baixa viscosidade a resistência a compressão mecânica de 3,00 Kgf/cm², superior a resistência de solo compactado convencional, com consumo de 60 litros/m³. O tempo de reação longo em torno de 7:00 minutos, ou seja, o pot-life, característica principal para garantir a permeabilidade no solo.

Tabela 6 – Dados técnicos do Poliuretano.

FICHA TÉCNICA				
PRODUTO	CONSUMO (LT/M ³)	RES. A COMPRESSÃO (KGF/CM ²)	EXPANSÃO (VOL)	POT LIFE (MIN)
Polyurthane - L60 - ACL	60 ,00	3,00	16,6 X	7



Figura 19 – Lote da resina polyurethane – L60 ACL utilizada nos experimentos

Solo

A escolha do solo partiu do princípio de utilizar do tipo que não apresentasse coesão, e consequentemente ter característica de maior presença de vazios. Optamos por utilizar um solo arenoso de média granulometria.



Figura 20 – Material arenoso de média granulometria

Concreto

O concreto armado utilizado no experimento teve funcionalidade de tamponamento da perfuração.

12.4 MONTAGEM DOS TESTES

À seguir, mostraremos como foram realizadas todas as etapas das montagens dos experimentos pilotos.

12.4.1 Escavações

Os pilotos foram moldados escavados em solo estável e de resistência elevada, a servir de contenção e confinamento do material de preenchimento, a região escolhida está e fora do alcance do lençol freático. Ambas escavações foram revestidas com lona plástica afim de conter o material arenoso e água de saturação.



Figura 21 – Tubulão escavado e sendo preenchido com solo arenoso.

12.4.2 Tubos Injetores

Foram instalados no interior da perfuração tubos injetores. Os tipos utilizados para ambos ensaios, foram compostos de tubos galvanizados de $\frac{1}{2}$ “ com perfurações em uma de suas extremidades de modo permitir a permeabilidade da resina no solo. Foram utilizados engates rápidos de $\frac{1}{4}$ “ para conexão do encaixe do gatilho da bomba de injeção, proporcionando vazão constante da resina.



Figura 22 – Ponteiros dos tubos injetores, com furos para passagem da resina de poliuretano.

12.4.3 Material Arenoso

As valas de injeção profundas foram preenchidas com material arenoso, isento de características de coesão e granulometria média. Durante o preenchimento da vala, o material foi adensado com água.



Figura 23 – Preenchimento do tubulão com solo arenoso e adensamento hidráulico.

12.4.4 Laje de concreto (sapata)

Ao término do preenchimento da vala com material arenoso e saturação foi criada uma base para confinamento do material, a fim de simular uma fundação rasa (sapata, sapata corrida). Esta base foi executada em concreto armado com espessura de 20,00 cm.



Figura 24 – Laje de concreto com espessura de 20cm para confinamento do material, simulando uma sapata rasa.

12.4.5 Poliuretano

A injeção da resina de poliuretano foi através da bomba pneumática bi-componente. O material foi injetado em processo de mistura através da bomba. Foram injetados 200 litros de PU, por experimento com duração de 30 minutos de ensaio, com a vazão de 6,66 l/min e pressão variando entre 3 a 4 bar.



Figura 25 – Bomba injetora bi-componente MC –I 700 e tambores com resinas de Poliuretano.

13. INJEÇÃO DE POLIURETANO (PU)

13.1 - 1º Ensaio –Injeção de PU em tubulão com 6 m³

O primeiro ensaio foi executado com tubulão com as seguintes dimensões:

DN= 1,50 m

H= 4,00 m

V (volume)= 7,065m³

Durante a aplicação da resina de poliuretano nos experimentos, pode-se perceber que água utilizada para saturar o solo, estava sendo expulsa, na proporção que o Poliuretano era injetado a água permeava para fora do experimento.

Outro fato analisado durante a realização da injeção foi o surgimento de Poliuretano pela superfície do concreto. No final do processo de expansão do poliuretano, observou-se deslocamento da placa de concreto.



Figura 26 – Mostra injeção de resina de poliuretano (PU) em solo arenoso



Figura 27 – Resultado da aplicação após a expansão do PU, deslocamento da placa de concreto.

13.2 - 2º Ensaio –Injeção de PU em espaço confinado de 7 m³

A metodologia de aplicação da resina utilizada para este teste foi similar à do primeiro ensaio.

Foram injetados aproximadamente 200 litros de material o equivale em condições de expansividade normal 3,3 m³.

O período dessa injeção perdurou ao mesmo tempo equivalente ao primeiro ensaio, ou seja, 30 minutos.

Após a escavação, constatamos que o material reagiu dentro esperado.

Realizamos a análise do comportamento de material expansível em ambiente confinado, e realizamos a verificação da capacidade de aglomeração sobre material solto e capacidade de carga do material.

14. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada uma compilação dos resultados obtidos no programa experimental, seguida da análise, conforme hipótese criada no capítulo 1 e embasada teoricamente com a revisão bibliográfica realizada no capítulo 2.

14.1 Método de aplicação e Fator forma

Após a conclusão das injeções de resina de poliuretano no solo saturado, aguardou-se o prazo de 48 (quarenta e oito) horas para início das escavações, para verificar o resultado das injeções, coletar amostras do poliuretano injetado no solo e análise das amostras.

Após as escavações, verificou-se a reação e expansão do poliuretano nos dois Experimentos, Número 1 e Número 2.

Realizou-se análise do seu comportamento e expansão em ambiente confinado; assim como a capacidade de aglutinação sobre material solto e capacidade de carga do material.

No Experimento 1, foi observado uma performance satisfatória do material injetado, apresentando total consolidação do material arenoso e sua capacidade de aglutinação, formando um bloco maciço de Poliuretano.

Constatou-se que a injeção por estágio teve eficiência superior, por tratar de injeções localizadas, tornando assim possível o preenchimento total da perfuração.



Figura 28 – Escavação do solo e amostra do material aglomerante, no Experimento 1.



Figura 29 – Escavação do solo e amostra do material aglomerante, no Experimento N° 1, onde constatou-se um comportamento expansivo do Poliuretano melhor que no Experimento N° 2.

No Experimento 2, houve a formação de bulbos de poliuretano, confinando o material arenoso livre de coesão. Por ter em sua característica boa aderência, o poliuretano teve função aglomerante, unindo o material arenoso em um só corpo.



Figura 30 – Escavação do solo e amostra do material aglomerante, no Experimento N° 2.

Sobre a condição da forma ocorreu o preenchimento uniforme dos primeiros 60,00 cm de perfuração, na medida em que a profundidade aumentava a área de confinamento do material diminuía gradativamente, tendo formação similar a bulbo de tensão invertido.



Figura 31 – Detalhe do material arenoso consolidado pelo Poliuretano no Experimento Nº 2

Umas das explicações possíveis para tal fenômeno, é que o Poliuretano tem baixa densidade, o que favorece a permeação para pontos de menores pressões. Outro ponto observado durante a técnica de aplicação, foi o fato da perda de carga no momento da injeção. Por mais constante e eficiente que foi o controle na aplicação do poliuretano, há uma tendência da carga se dissipar à partir do ponto de entrada no experimento devido a quantidade de perfurações do tubo injetor.

Em considerações, o experimento 1 apresentou maior capacidade de consolidação do material arenoso em relação ao experimento 2, isso devido a técnica utilizada para aplicação do material.

Quanto ao fator forma o Experimento 1, apresentou a formação de um bloco único similar a uma estaca. Quanto ao Experimento 2 apresentou forma similar a um bulbo de tensões invertido (cenoura).



Figura 32 – Solo arenoso consolidado pelo Poliuretano no Experimento Nº 2

14.2 Capacidades de carga

Dois fatores foram levados em consideração para análise de melhoria da capacidade de solo. O primeiro foi a capacidade de consolidação do aterro do material arenoso. O segundo, foi o poliuretano que repeliu a água existente no aterro, se solidificando após sua reação, formando um único corpo.

Foram coletadas amostras para análise da resistência à compressão mecânica. As amostras foram realizadas apenas para o experimento 1, devido sua melhor conformação.



Figura 33 – Testemunho coletado do Experimento 1.

A amostragem dos CPs tem por objetivo apresentar os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral. Foram realizados em dois testemunhos compostos por minerais e aglomerante de Poliuretano. Na ausência de norma específica os ensaios foram realizados segundo a NBR 7222.

Os resultados estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 7 – Ensaio à tração por compressão diametral.

CP Nº	DATA DO ENSAIO	ALTURA	DIÂMETRO	ÁREA	Carga (kgf)	Resistência CP (MPa)
		(mm)	(mm)	(cm ²)		
1	28/01/2019	148,03	75,65	4494,8	660	0,4
2	29/01/2019	121,61	75,71	4501,9	1410	1

Nota-se que mesmo para o ensaio de compressão, foi obtido um resultado de melhoria de desempenho do solo tratado, em relação ao solo arenoso natural.

Para os ensaios de compressão mecânica foram realizados os procedimentos da NBR 7680 e da NBR 5739.

Os resultados encontram-se na Tabela abaixo:

Tabela 8 – Ensaio de resistência compressão mecânica.

CP nº	Ensaio	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (kg/m³)	Fcl. Ext. inicial (Mpa)	Fcl. Ext (Mpa)
1	28/01/2019	106,87	76,21	1522	4,2	4,3
2	28/01/2019	125,2	75,98	1571	3,9	4

Com análises dos resultados observou-se que houve melhoria no solo, partindo do princípio que aterro possui resistência equivalente a 1,5 Mpa, e os resultados encontrados apresentam melhoria de resistência duas vezes maiores, mostrando que existe melhoria da resistência do solo com injeção de poliuretano.

Este capítulo apresentou os resultados do programa experimental e uma análise dos resultados do mesmo, já no próximo, apresentaremos as considerações finais da pesquisa e algumas sugestões para novas pesquisas que surgiram durante a construção dessa, para orientação à trabalhos futuros.

15. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentaremos as considerações finais, bem como sugestões para novos estudos na área.

15.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta da confirmação de aplicabilidade da resina de poliuretano e melhoria de resistência de solos arenosos foi viabilizada por meio de programa experimental baseado em estudo detalhado da bibliografia disponível e aplicação das normas técnicas vigentes.

Os resultados dos experimentos comprovaram que é possível realizar melhorias de aterros e solos saturados com injeções de resinas de poliuretano, para consolidação

do material solto, eliminação de espaços vazios e aumento da resistência à compressão.

Considera-se que foram atingidos os objetivos propostos nesta pesquisa e nota-se ainda que a hipótese foi comprovada, devido;

- I. Aumento da capacidade de resistência à compressão do solo em 150% se comparado à resistência à compressão de aterro com solo arenoso;
- II. Consolidação dos espaços vazios no aterro e impermeabilização do material arenoso;
- III. Método de aplicação por estágio mostrou melhor eficiência, realizando total preenchimento da perfuração do experimento;
- IV. Capacidade de formação de formas geométricas e aglutinação do material solto;

15.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- I. Realizar ensaios de resistividade química do poliuretano frente ao ataque de soda caustica.
- II. Estudar a influência de tratamentos de diferentes tipos de solos, frente à injeção de resinas de poliuretano;
- III. Estudar diferentes tipos de resinas para tratamento e melhorias dos solos.
- IV. Estudar diferentes metodologias executivas para tratamento dos solos;
- V. Estudar a viabilidade econômica de diferentes métodos de tratamento de solos utilizando resinas químicas.

Neste capítulo, encerramos a pesquisa mostrando as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros nesta área.

No próximo capítulo apresentaremos as bibliografias consultadas para estruturação e desenvolvimento dessa pesquisa.

16. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLSONI, Elisandra. Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo. 2008. Dissertação de mestrado.

CARVALHO, C. A.; Reutilização de Poliuretano na Construção Civil, Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental, Univille, Joinville, 2004.

BOLETINS TÉCNICOS DOW BRASIL S/A – Voranol: Química, Propriedades e Aplicações. Boletim de Espumas Flexíveis de Poliuretano

VILAR, Walter. Química e Tecnologia dos Poliuretanos. Disponível em: <<http://www.poliuretanos.com.br/>>. Acesso em: 10 Abr 2019

NBR 6122 Projeto e execução de fundações

Fundações – teoria e prática, ABMS/abef, Editora Pini, 2ª edição, 1998

Solos Melhorados: Economia e Ecologia para Todas as obras MONOVETON (edição da empresa), 2000.

MOSELEY, M. P. and Kirsch, K. 2004. "Ground Improvement (2nd edition)". Spon Press in animprintof Taylor & Francis group, U. K., ISBN 0 415 27455 9. pp: 119-160.

CIRIA, 2000. "Grouting for groutingengineering". CRIRIA press, London, U. K., ISBN 0 86017 514 6. pp: 17-22

CAMBEFOR, H., 1977. "The PrinciplesandApplicationsofGrouting". Q. J. Eng. Geol., Vol. 10, pp: 57-95

Caracterização e reforço de solos de baixa compacidade: técnicas utilizadas em aterros, pisos, pavimentos e fundações (Escrito: Paulo Bina, engenheiro civil da Monobeton, téchne mar/abr 2001 – nº 51

THE URETEK™ DeepInjection® Process (UDI) For RoadwaysandBuildingStructures