

Análise do Comportamento Reológico de Suspensões com Microaglomerante para Emprego em Injeções Através de Resultados de Ensaios de Laboratório

Marcos Fábio Porto de Aguiar
IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

Samuel Castro Prado
IFCE, Brasil, samuelcastroprado@hotmail.com

Érica Soares Rodrigues Feitosa
IFCE, Fortaleza, Brasil, ericafeitosa.r@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
UNIFOR, Fortaleza, Brasil, heberoliveiracivil@hotmail.com

RESUMO: O presente trabalho trata da determinação experimental das características reológicas de suspensões com microaglomerante para injeção em solos ou rochas, tendo em vista sua importância para o sucesso de uma operação de injeção. O material utilizado nos ensaios foi o Dyckerhoff-Sohl-Feinst-Bindemittel-F que foi desenvolvido como alternativa para utilização em reforços e impermeabilização de solos, por meio de injeção na faixa granulométrica entre areia média e fina, com a vantagem de não ter influência prejudicial nas características da água subterrânea. O material pode, também, ser utilizado em fissuras ou fraturas em rochas e fissuras em peças de concreto. Foram realizados ensaios de laboratório para observar como as características reológicas são alteradas, no decorrer do tempo por outros fatores como variações na execução da mistura. Os resultados permitiram a caracterização do material considerando diversos parâmetros reológicos.

PALAVRAS-CHAVE: Injeção em solo e rocha, Reologia, Suspensão de Microcimento, Microaglomerante.

1 INTRODUÇÃO

O microaglomerante, também chamado de microcimento, foi desenvolvido como alternativa para utilização em reforços e impermeabilização de solos, preenchimentos de fraturas e fissuras em rochas e fissuras em concreto, podendo ser aplicado através de injeção na faixa de solo entre areia média e fina com a vantagem de não ter influência prejudicial nas características da água subterrânea.

Um importante fator para o sucesso de uma operação de injeção é a fluidez do material utilizado. O presente trabalho se ocupa com a

determinação experimental das características reológicas de determinada suspensão com microaglomerante para injeção. O material é o Dyckerhoff-Sohl-Feinst-Bindemittel-F, sendo observado como as características de fluidez são alteradas por outros fatores.

2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE MATERIAIS EM LABORATÓRIO

2.1 Injeção com Microaglomerante

A injeção consiste na técnica de penetração sob

pressão de um material fluido, através de um tubo de injeção introduzido em uma perfuração executada, em solo, rocha ou outro material de construção como o concreto por exemplo. Devido à sedimentação, filtração ou reações químicas, de acordo com as características do material, ocorre o reforço ou impermeabilização do objeto injetado (Müller-Kirchenbauer, 1995 e Pregl, 1989).

As injeções são utilizadas com sucesso de diversas formas, como por exemplo: reforço em solos, impermeabilização de obras de terra, assim como preenchimento de fissuras e fraturas em rochas e fissuras em obras de concreto. A seguir descrevem-se as principais aplicações das injeções (Donel, 1990 e Kutzner, 1991):

2.1.1. Injeção em Solos

Algumas das vantagens do uso da injeção na prática de reforço em solos são: reforço da região nas proximidades de obras subterrâneas, aumento das dimensões de uma fundação para melhorar a resistência, melhoria de solo colapsivo, suporte de carga concentrada próxima de escavação, segurança contra carregamento de material arenoso sob sollicitação hidráulica (solapamento), entre outros.

Na impermeabilização de solos, por sua vez, a injeção se faz presente no processo de execução de piso ou parede impermeável em escavações com presença do lençol freático, apresentando a vantagem da segurança do piso da escavação contra ruptura hidráulica. Além desses, a injeção para a impermeabilização está presente no processo de impermeabilização de barragens e hidroelétricas.

2.1.2. Injeção em Rocha

O uso da injeção de em rochas ocasiona a melhoria das características mecânicas de áreas de apoio para fundações de obras diversas e paredes de barragens, bem como o reforço de áreas próximas a obras subterrâneas.

2.1.3. Injeção em Obras

Fissuras em obras de concreto devem ser

preenchidas sempre que o seu aparecimento por em risco a durabilidade e segurança da obra ou se afetar sua funcionalidade e utilização efetiva (Perbix, 1993).

O tipo e a composição dos materiais utilizados na injeção são escolhidos de acordo com as características de absorção da subsuperfície, obra ou objetivo proposto. Normalmente é mais prático e econômico, se possível, escolher um material de injeção que preencha os vazios da massa a ser injetada de forma mais rápida, isto é, o mais grosso possível. A Tabela 1 mostra os materiais de injeção mais usados:

Tabela 1: Tipos de materiais de injeção mais usados e seus campos de utilização (Pregl, 1989).

Tipos	Utilizações
Soluções	Impermeabilização e reforço em areia fina e fissuras.
Emulsões	Impermeabilização em areia fina e fissuras.
Suspensões	Impermeabilização e reforço em areia grossa, pedregulho e fissuras.
Argamassas	Impermeabilização e reforço em pedregulho e rachaduras.

As suspensões e argamassas são compostas por água, cimento, areia até pedregulho e complementos de bentonita, argila, silte e pó de pedra. As emulsões podem ser de piche, betume, óleo ou resina. Com as soluções são executadas as injeções químicas, sendo utilizados silicatos e resinas orgânicas. Nas injeções químicas deve-se observar, por razões ambientais, se sua execução não irá contaminar o lençol freático.

Uma maior sensibilização da sociedade sobre os problemas ambientais da aplicação de injeções com materiais químicos para reforços e impermeabilizações de solos levou ao desenvolvimento de novos materiais de injeção.

O microaglomerante ou microcimento é um material muito fino que possui duas vantagens sobre as injeções químicas e injeções de cimento (Tausch e Teichert, 1990): a composição mineral, que não polui o meio ambiente e o lençol freático, e a granulometria de suas partículas, que permite sua utilização em solos que os cimentos e demais

aglomerantes não podem ser utilizados (Figura 1).

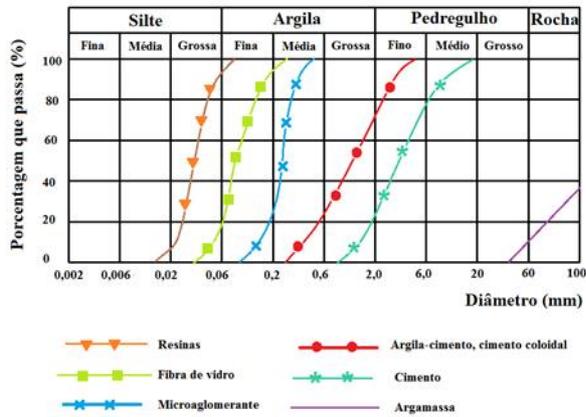


Figura 1: Faixas granulométricas limites para utilização de materiais de injeção (Tausch e Teichert, 1990).

2.2 Reologia

O estudo reológico de um material retrata seu comportamento de fluidez e deformação. O material pode ser gás, líquido ou sólido, sendo um sistema de materiais, a junção de vários componentes ou fases. A relação quantitativa entre tensão, deformação e tempo, pode ser expressa por meio das regras reológicas do material (DIN, 1983 e DIN, 1976).

A viscosidade é uma característica de um sistema de materiais fluidos, que na deformação, desenvolve uma tensão dependente somente da sua velocidade. A tensão pode também ser considerada como causa da velocidade de deformação (DIN, 1986). As características viscosas de um material são descritas, de acordo com as leis da reologia de materiais. Através de ensaios de laboratório obtêm-se elementos que fornecem diretrizes para descrição dos aspectos reológicos dos materiais, como segue:

2.2.1 Curva de viscosidade

Representação gráfica da função de viscosidade cisalhante com a variação de velocidade ou tensão de cisalhamento. Para uma substância newtoniana, obtêm-se uma reta paralela à abscissa. A curva de viscosidade é definida apenas em fluxo viscosimétrico.

2.2.2 Curva de viscosidade aparente

Curva de viscosidade de uma substância não-newtoniana ou material plástico acima do limite de fluidez, onde a tensão de cisalhamento ou a variação de velocidade crescem, e são calculadas com a utilização de equações que somente são válidas para substâncias newtonianas. Em alguns casos conhecem-se métodos de cálculo ou gráficos para transformação em curva de viscosidade real.

2.2.3 Limite de fluidez

A menor tensão de cisalhamento τ_F , acima da qual um material plástico, reologicamente, se comporta como um fluido.

2.2.4 Curva de fluidez

Representação gráfica da relação entre tensão de cisalhamento τ e potencial cisalhante D para um fluxo em camadas de um fluido ou material plástico acima do limite de fluidez. As curvas de fluidez são definidas apenas para fluxo viscosimétrico.

2.2.5 Curva de fluidez aparente

Na representação gráfica de curvas de fluidez, diferenciam-se estas entre real e aparente. Enquanto as curvas de fluidez real são determinadas a partir exclusivamente do comportamento do material, as curvas de fluidez aparente dependem ainda de parâmetros da aparelhagem de medição, como por exemplo, momento de rotação (Krieger e Maron, 1954).

2.3 Fluido

Os fluidos são materiais que se deformam continuamente quando submetido a um esforço tangencial constante qualquer. De acordo com o comportamento reológico, podem-se diferenciar os fluidos em dois grupos principais: os fluidos newtonianos e os fluidos não newtonianos.

2.3.1 Fluido Newtoniano

São os fluidos para os quais a taxa de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, conceito da lei de Newton para

a viscosidade:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Essa lei relaciona a tensão de cisalhamento a qual o fluido está submetido (τ), o coeficiente de viscosidade absoluta ou dinâmica (μ) e a taxa de deformação ou gradiente de velocidade (dv/dy).

A viscosidade dinâmica depende somente da pressão e temperatura durante a medição. Enquadram-se nesta classificação de fluidos o ar, a gasolina, os óleos minerais e a glicerina, por exemplo.

2.3.2 Fluido Não-newtoniano

Fluidos para os quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação.

A viscosidade desses fluidos não é constante. Os fluidos não newtonianos não são caracterizados através da atribuição e valores de viscosidade e sim através de uma função de viscosidade.

Considerando-se o momento de início da solicitação tem-se o desenvolvimento das características de fluidez com o tempo. Caso a função de viscosidade seja dependente somente do potencial cisalhante, considera-se como comportamento de fluidez não dependente do tempo. Fazem parte desse grupo os fluidos de estrutura viscosa, dilatantes e com limite de fluidez.

Quando a função de viscosidade é dependente, além do potencial cisalhante, da duração do cisalhamento, considera-se como comportamento de fluidez dependente do tempo. Fazem parte desse grupo os fluidos tixotrópicos, reopéticos e viscoelásticos (Mbonimpa, 1993 e Müller-Kirchenbauer, 1995).

3 EXPERIMENTOS

Os ensaios compreenderam a utilização de diversos fatores água-cimento, métodos de mistura (Figura 2), variando-se o tempo, a

velocidade de mistura e o tipo de misturador ou de dispersor (S50KR-G45M e R50, figura 3) e também os estados que a suspensão foi mantida durante a mistura, agitação contínua ou com intervalo (Figura 4), sempre se levando em consideração a variação de temperatura.

Para pesquisar os diferentes índices específicos, assim como a fluidez da suspensão, são utilizados vários métodos como os ensaios padrão, o “Kasometer” (Figura 5) e o viscosímetro de rotação coaxial (Figura 6).

O ensaio padrão é composto pela determinação da densidade da suspensão com a balança (Figura 7), limite de fluidez com o funil de viscosidade (Figura 8) e o ensaio de esferas (Figura 9), a estabilidade à sedimentação com a proveta padrão (Figura 10) e a filtração com o filtro compressor (Figura 11).

O limite de fluidez é determinado com o “Kasometer” e as curvas de fluidez e viscosidade com o viscosímetro de rotação.

As condições ambientais necessárias, assim como os efeitos indesejados, foram levadas em consideração na execução dos ensaios (Aguiar 1997).



Figura 2: Misturador ULTRA-TURRAX T50 com medidor de rotação e equipamento de dispersão (Aguiar, 1997).

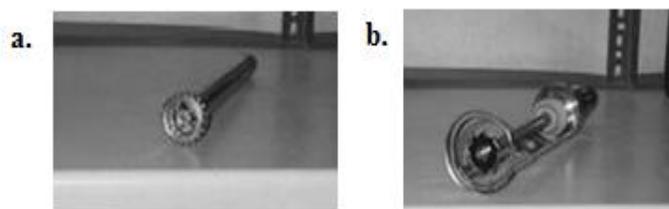


Figura 3: Equipamento de dispersão S50KR-G45M (a) e Equipamento de dispersão de onda R50 (Aguiar, 1997).



Figura 4: Agitador RW 20 com hélice (Aguiar, 1997).



Figura 5: Vista do ensaio "Kasometer" (Aguiar, 1997).



Figura 6: Vista do viscosímetro de rotação (Aguiar, 1997).



Figura 7: Vista da balança (Aguiar, 1997).



Figura 8: Vista do funil de viscosidade (Aguiar, 1997).



Figura 9: Vista do aparelho do ensaio de esfera (Aguiar, 1997).

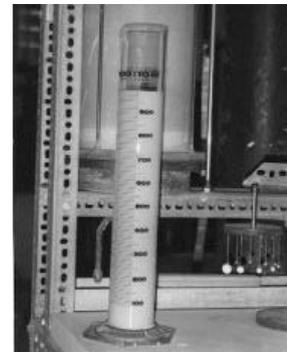


Figura 10: Vista do ensaio de sedimentação da proveta padrão (Aguiar, 1997).

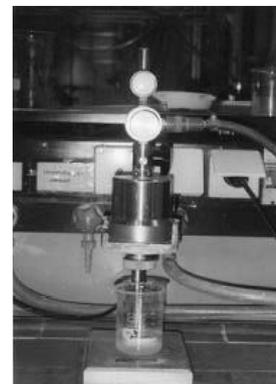


Figura 11: Vista do filtro (Aguiar, 1997).

4 RESULTADOS OBTIDOS

De acordo com Aguiar (1997), apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios, considerando os aspectos reológicos da suspensão estudada.

4.1 Desenvolvimento dos Índices Específicos da Suspensão com o Tempo

A partir do momento imediato após a mistura são medidos os índices da suspensão, com microaglomerante, com intervalos de 1 (uma) hora e durante 4 (quatro) horas.

Observou-se que densidade continua constante com o tempo, independentemente do valor do fator água-cimento (Figura 12).

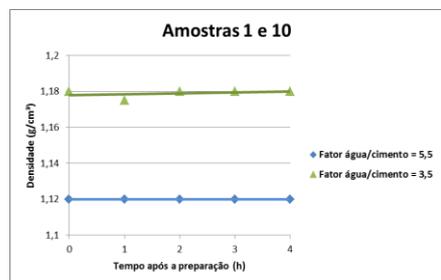


Figura 12: Desenvolvimento da densidade com o tempo após a preparação para diferentes valores de fator água-cimento (Aguiar, 1997).

Observou-se que a estabilidade à sedimentação foi determinada através da massa precipitada e em todo o tempo do ensaio não foi observada sedimentação.

Notou-se que o limite de fluidez, que foi determinado com o “Kasometer”, cresce levemente (Figura 13), observando-se maiores valores para menores fatores água-cimento. Com o viscosímetro de rotação, observou-se que, nas duas primeiras horas, ocorre diminuição no valor e depois identifica-se pequena variação ascendente (Figura 14).

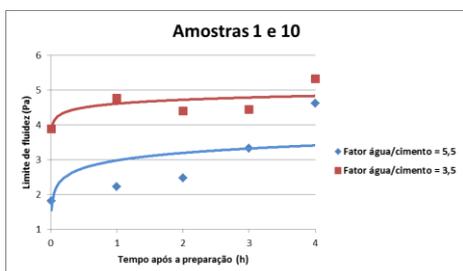


Figura 13: Desenvolvimento do limite de fluidez, medido com o “Kasometer” relacionado com o tempo após a preparação, para diferentes valores de fator água-cimento (Aguiar, 1997).

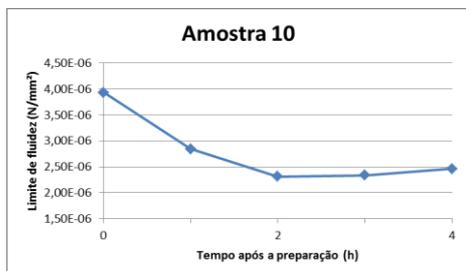


Figura 14: Desenvolvimento do limite de fluidez, medido com o viscosímetro de rotação, relacionado ao tempo após a preparação, para fator água-cimento = 3,5 (Aguiar, 1997).

O tempo de escoamento, obtido com o funil de viscosidade, cresce levemente com o tempo e mostra maiores valores para menores fatores água-cimento (Figura 15).

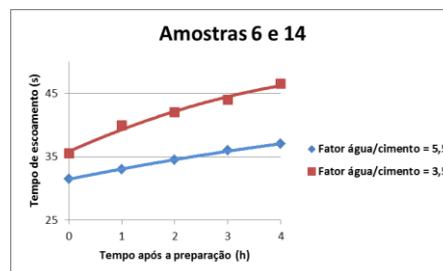


Figura 15: Relação entre o tempo de escoamento e o tempo após a preparação, para diferentes fatores água-cimento (Aguiar, 1997).

A viscosidade plástica cresceu não ocorrendo grandes diferenças devido a mudança dos fatores de influência (ver Figura 16).

A temperatura da suspensão não demonstrou uma tendência clara com o tempo.

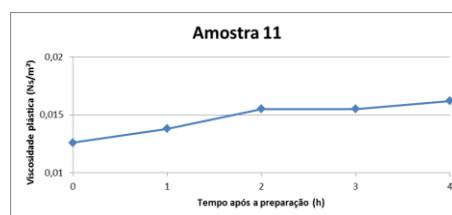


Figura 16: Desenvolvimento da viscosidade plástica, medida com o viscosímetro de rotação, relacionado ao tempo após a preparação, para fator água-cimento = 3,5 (Aguiar, 1997).

4.2 Curvas Aparentes de Fluidez e Viscosidade Determinadas com o Viscosímetro de Rotação

Levando-se em consideração as condições ambientais necessárias e possíveis perturbações, como o efeito de aquecimento que foram monitorados, foram realizados os ensaios com o viscosímetro de rotação. As suspensões com microaglomerante puderam ser consideradas como substâncias de “Bingham” e não demonstraram características tixotrópicas. As curvas aparentes de fluidez e viscosidade foram determinadas e, com base nelas, foram calculados o limite de fluidez e a viscosidade plástica (Figuras 17 e 18).

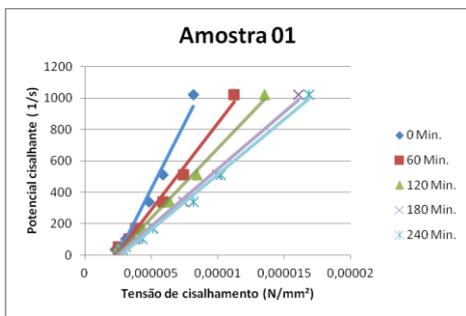


Figura 17: Relação entre o potencial cisalhante e a tensão de cisalhamento, conforme o tempo de aquecimento (Aguiar, 1997).

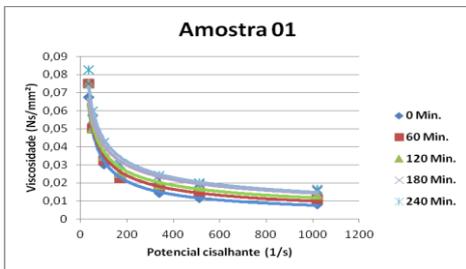


Figura 18: Curva de viscosidade aparente da suspensão relacionada com seu potencial cisalhante (Aguiar, 1997).

4.3 Diferentes Métodos para Determinação do Limite de Fluidez e Tempo de escoamento

O limite de fluidez foi determinado como o ensaio das esferas, o “Kasometer” e o viscosímetro de rotação.

O método das esferas não mostrou modificações nas suspensões no decorrer dos ensaios com o passar do tempo.

Os resultados dos limites de fluidez medidos com o “Kasometer” e o viscosímetro de rotação mostraram comportamentos diferentes, como mostram já apresentado.

O tempo de escoamento é uma função da densidade, do limite de fluidez e da viscosidade, e por isso, é aconselhável sua utilização apenas para verificar rapidamente se as características da suspensão se modificaram a um valor inicial.

O desenvolvimento relativo ao tempo do índice encontrado com o “Kasometer” e do tempo de escoamento, também relativo ao tempo após a preparação, determinado com o funil de viscosidade mostram tendências semelhantes, como mostra a Figura 19.

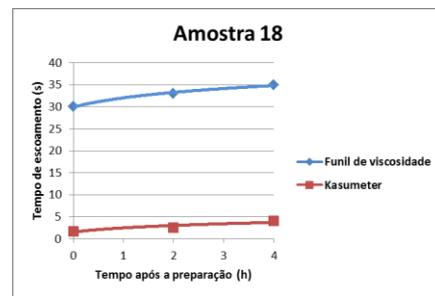


Figura 19: Desenvolvimento do tempo de escoamento, com o funil de viscosidade e com o “Kasometer”, no decorrer do tempo após a mistura da suspensão (Aguiar, 1997).

4.4 Fatores de Influência

Na mistura das suspensões com microaglomerante foram utilizados tempos de mistura com 5 e 3 minutos, velocidade dos misturadores de 5000 e 7000 rpm e dois misturadores diferentes, sendo, o S 50KR-G45M e o misturador de onda R50.

Os índices específicos das suspensões, assim como fluidez destas, foram medidos e comparados, verificando-se que estas modificações não provocam alterações consideráveis.

A maneira como a suspensão foi mantida durante a mistura (mistura contínua ou com intervalo) não exerceu influência considerável na substância ensaiada e somente no desenvolvimento da viscosidade plástica com relação ao tempo, observou-se diferença demonstrada com a superposição dos gráficos.

O fator água-aglomerante da suspensão influi claramente em quase todas as suas características, como observado nas figuras 12, 13 e 15. Com o crescimento do fator água-aglomerante, decresceu a densidade, a estabilidade à filtração, o limite de fluidez, o tempo de escoamento e a viscosidade plástica. A estabilidade à sedimentação e a temperatura da suspensão não se alteraram com a modificação do fator água-aglomerante.

4 CONCLUSÃO

Baseado nos dados obtidos concluiu-se que enquanto que o limite de fluidez e o tempo de escoamento cresceram lentamente com o tempo, a densidade da mistura permaneceu constante,

sendo, em todos os casos, maior quanto menor for o fator água-cimento.

A viscosidade plástica também cresceu com o tempo, mas ao contrário do limite de fluidez, densidade e tempo de escoamento, não com o fator água-cimento.

As suspensões com microaglomerante podem ser consideradas como substâncias de “Bingham” e não demonstram características tixotrópicas.

Os resultados de limites de fluidez obtidos pelos métodos do viscosímetro de rotação e do “Kasometer” apresentaram comportamentos diferentes.

O desenvolvimento relativo ao tempo do índice encontrado com o “Kasometer” e do tempo de escoamento, também relativo ao tempo, determinado com o funil de viscosidade mostram tendências semelhantes.

A maneira como a suspensão foi mantida durante a mistura, contínua ou com intervalo, não exerceu influência na substância ensaiada, somente no desenvolvimento da viscosidade plástica com relação ao tempo.

O decréscimo do fator água-aglomerante da suspensão refletiu-se em um aumento da maioria das características estudadas (densidade, a estabilidade à filtração, o limite de fluidez, tempo de escoamento e viscosidade plástica).

REFERÊNCIAS

Aguiar, M. F. P. (1997). *Experimentelle untersuchungen zum fließverhalten von feinstbindemittel injektionssuspensionen, wissenschaftliche abschlußarbeit zur erlangung des akademischen grades*. Magister des bauingenieurwesens für geotechnik und infrastruktur. Thesis (M. Ing.), Universität Hannover, Hannover.

DIN 1342, Teil 1. (1983). Viskosität; rheologische begriffe. Hamburg: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 1342, Teil 2. (1986). Viskosität; newtonsche flüssigkeiten. Hamburg: Deutsches Institut für Normung e.V., 1986.

DIN 13 342. (1976). Nicht-newtonsche flüssigkeiten; begriffe, stoffgesetze. Hamburg: Deutsches Institut für Normung e.V.

Donel, M. (1990). *Bodeninjektionstechnik*. Essen: Verlag Glückauf.

Krieger, I. M.; MARON, S. H. (1954). Direct determination of the flow curves of non-newtonian fluids: standardized treatment of viscometrie data. *Journal of Applied Physics*, v. 25, n. 1, p. 104-112.

Kühling, G. (1990). Feinstzement-microfeine hydraulische bindemittel. *Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Strabebau*. v. 11, s. 782-784.

Kutzner, C. (1991). *Injektionen im baugrund*. Stuttgart: F. Enke Verlag.

Mbonimpa, M. (1993). *Untersuchungen zum fließverhalten von ton-zement-und feinstbindemittelsuspensionen*. Abschlußarbeit des Postgraduierenstudium Bauingenieurwesen. Universität Hannover, Hannover.

Müller-kirchenbauer, H. (1995). *Injektionstechnik*. Vorlesungsskript, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover, Hannover.

Perbix, W. (1993). Anwendung von injektionen mit feinstbindemitteln. *Felsbau-Zeitschrift*, v. 36, s. 298-300.

PREGL, O. (1989). *Handbuch der geotechnik*. Wien: Universität für Bodenkultur. Schutz und Abdichtung von Grundbauwerken, Dichtungswände, Gesteinsinjektionen und Gesteinsanker.

Tausch, N.; Teichert, H. (1990). Injektionen mit feinstbindemitteln-zum eindringverhalten von suspensionen mit mikrodur in lockergesteine. 5. In: Christian-veder-kolloquium-neue entwicklungen in der baugrundverbesserung, 5., 1990, Graz. *Tagungsband...* Graz., v. 4.