

MARCOS FRANCISCO WOSGRAU CARLETTO

JET GROUTING (SISTEMA MONOFLUIDO):
UM MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO PARA A
PREVISÃO DO DIÂMETRO DAS COLUNAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia.

São Paulo

2009

MARCOS FRANCISCO WOSGRAU CARLETTO

JET GROUTING (SISTEMA MONOFLUIDO):
UM MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO PARA A
PREVISÃO DO DIÂMETRO DAS COLUNAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Waldemar Coelho Hachich

São Paulo

2009

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Carletto, Marcos Francisco Wosgrau

Jet grouting (sistema monofluido): um método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas / M.F.W. Carletto. -- São Paulo, 2009.

114 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Geotecnia 2. Tratamento do solo 3. Métodos de previsão e correção I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Janete e Domingos, meus pais, por tudo, sempre.

Às minhas sobrinhas Júlia e Chiara, pela alegria.

À minha irmã Paola, meu cunhado Carlos e minha avó Lúcia, pelo apoio.

À CAPES, pelo excelente programa PDEE, e ao CNPq.

Ao Prof. Waldemar, pela orientação.

A Paolo e Giuseppe, per l'amicizia scaturita da ogni momento condiviso,
e a tutti gli amici di Cassino e dell'Italia.



Muito obrigado, grazie di vero cuore...

Marcos Francisco

Agosto de 2009

RESUMO

CARLETTO, M.F.W. **Jet grouting (sistema monofluido): um método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas.** 2009. 114 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

O *jet grouting* é uma das técnicas de tratamento de solos mais utilizadas em todo o mundo. Consiste em jatear uma calda de cimento a altíssima velocidade no subsolo, com ou sem a adição de água e/ou ar comprimido. Os fluidos são injetados através de minúsculos bicos posicionados na extremidade de uma composição especial de hastes, que giram à velocidade constante enquanto sobem lentamente em direção à superfície do terreno. O jato remove e mistura o solo, produzindo um corpo consolidado de formato aproximadamente cilíndrico (a “coluna de *jet grouting*”). Variando os parâmetros operacionais (pressão de bombeamento, quantidade e diâmetro dos bicos, velocidade de extração das hastes, relação água/cimento da calda) e em função do tipo de solo, podem ser obtidas colunas de diâmetros variáveis dentro de um amplo intervalo. Na busca do diâmetro desejado, a escolha dos parâmetros de tratamento é feita atualmente com base em regras empíricas nem sempre pertinentes, causando muitas vezes o fracasso do tratamento ou, ainda, tornando-o excessivamente oneroso. Esta tese de doutorado apresenta um método simplificado para a previsão do diâmetro das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido). Conjugando a análise racional do fenômeno físico de interação jato-solo (Modoni *et al.*, 2006) à facilidade de aplicação característica dos métodos empíricos, propõe-se uma ferramenta ágil para a escolha da combinação mais adequada dos parâmetros de tratamento.

Palavras-chave: Geotecnia. Tratamento do solo. Métodos de previsão e correção.

SOMMARIO

CARLETTO, M.F.W. **Jet grouting (sistema monofluido): un metodo teorico semplificato per la previsione del diametro delle colonne.** 2009. 114 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Il *jet grouting* è una delle tecniche di trattamento dei terreni più diffuse in tutto il mondo. Consiste nell'iniettare ad altissima velocità una miscela di cemento nel sottosuolo, con o senza l'aggiunta di acqua e/o aria compressa. I fluidi sono iniettati attraverso minuscoli ugelli posti all'estremità di una batteria speciale di asti, che ruota a velocità costante mentre risale lentamente verso il piano campagna. Il getto smuove e rimescola il terreno, consentendo la realizzazione di un corpo consolidato pressoché cilindrico (la “colonna di *jet grouting*”). Variando i parametri operativi (pressione di pompaggio, quantità e diametro degli ugelli, velocità di risalita delle asti, rapporto acqua/cemento della boiaccia), e in funzione del tipo di terreno, possono essere ottenute colonne di diametri variabili entro un ampio intervallo. Alla ricerca del diametro richiesto, la selezione dei parametri di trattamento è condotta attualmente in base a criteri empirici non sempre pertinenti, il che più volte conduce l'intervento all'insuccesso, oppure lo rende eccessivamente oneroso. Questa tesi di dottorato presenta un metodo semplificato per la previsione del diametro delle colonne di *jet grouting* (sistema monofluido). Coniugando l'analisi razionale del fenomeno fisico di interazione getto-terreno (Modoni *et al.*, 2006) alla facilità di impiego caratteristica dei metodi empirici, si propone uno strumento agile per la scelta della combinazione più adatta dei parametri di trattamento.

Parole chiave: Geotecnica. Trattamento del terreno. Metodi de previsione e correzione.

ABSTRACT

CARLETTO, M.F.W. **Jet grouting (single fluid system): a theoretical simplified method for the prediction of column diameter.** 2009. 114 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Jet grouting is one of the most popular ground improvement techniques all over the world. The method is based on high-speed grouting of water-cement mixtures and/or other fluids (air, water) into the subsoil. The fluids are injected through small diameter nozzles placed on a grout pipe, which is continuously rotated at a constant rate and slowly raised towards the ground surface. The jet removes and mixes the soil, producing a cemented body of quasi-cylindrical shape (the “jet grouting column”). Varying the operational parameters (grout pressure, number and diameter of the nozzles, monitor lifting rate, water-cement ratio of the grout) and as a function of the soil type, columns of variable diameters can be obtained in a wide interval. Currently, in search of the required diameter, the choice of the operational parameters is done on the basis of empirical rules not always relevant, causing very often the failure of the treatment or making it excessively onerous. This thesis presents a simplified method for the prediction of the column diameter (single fluid system). Conjugating the rational analysis of the physical phenomenon of jet-soil interaction (Modoni *et al.*, 2006) to the typical easiness of empirical methods application, an agile tool is proposed for the choice of the most appropriate combination of the operational parameters.

Keywords: Geotechnical engineering. Soil improvement. Prediction and correction methods.

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2: Fundamentos da Tecnologia e do Projeto

Figura 2.1 – Execução de colunas de <i>jet grouting</i> (<i>apud</i> Modoni, 2006).....	5
Figura 2.2 – Retorno do refluxo, garantido através de revestimento do furo (túnel da Avenida Santo Amaro com Avenida Juscelino Kubitchek, São Paulo) (Novatecna, 2002).....	7
Figura 2.3 – Sistemas de <i>jet grouting</i> : <i>a</i>) monofluido, <i>b</i>) bifluido e <i>c</i>) trifluido.....	7
Figura 2.4 – Perspectiva espacial do tratamento de <i>jet grouting</i> subhorizontal (Novatecna, 2003).....	8
Figura 2.5 – Adesão entre duas colunas de <i>jet grouting</i> (Novatecna, 2003).....	9
Figura 2.6 – Ábacos <i>a</i>) nacional (Novatecna, 2003) e <i>b</i>) internacional (segundo Miki e Nakanishi, 1984 e JJGA <i>apud</i> Abramento, Koshima e Zirlis, 1999) que fornecem faixas de diâmetro para as colunas executadas com os métodos monofluido (CCP) e bifluido (JG) em argilas e areias em função do número de golpes do ensaio SPT.....	12
Figura 2.7 – Faixas de diâmetros de coluna que podem ser obtidos com o método monofluido em função da pressão de bombeamento em <i>a</i>) argila mole e <i>b</i>) em solo arenoso medianamente compacto (Langbehn, 1986).....	14

Capítulo 3: O Modelo Teórico de Modoni, Croce e Mongiovì (2006)

Figura 3.1 – Esquema da interação jato-solo na formação das colunas de <i>jet grouting</i> (sistema monofluido) em solos arenosos e argilosos, segundo o modelo de Modoni <i>et al.</i> (2006).....	17
Figura 3.2 – Difusão de um jato submerso plano (Prandtl, 1942).....	17
Figura 3.3 – Variação da velocidade no eixo de um jato d'água, produzido com diferentes pressões de bombeamento a partir de um bico de 2,2 mm de diâmetro (Vleeshauwer e Maertens, 2000).....	22
Figura 3.4 – Viscosidade aparente das caldas de cimento (Raffle e Greenwood, 1961 <i>apud</i> Bell, 1993).....	24
Figura 3.5 – Ao longo do eixo longitudinal do jato, variação da velocidade e do raio equivalentes para $\xi = 0,5$ e $\Lambda = 16$ (Modoni <i>et al.</i> , 2006).....	25
Figura 3.6 – Esquema dos modos de interação jato-solo (Modoni <i>et al.</i> , 2006).....	26
Figura 3.7 – Andamento das pressões (em tracejado) que atuam sobre uma placa plana atingida ortogonalmente por um jato cilíndrico (<i>apud</i> Ghetti, 1998).....	29

Capítulo 4: Proposta de Método Teórico Simplificado para a Previsão do Diâmetro das Colunas (Sistema Monofluido)

Figura 4.1 – Correlação entre a energia do jato (medida nos bicos) e o diâmetro médio das colunas obtidas pelo tratamento monofluido de diferentes tipos de solo: pedregulho arenoso (casos B e D ₁), areia siltosa piroclástica (caso C) e silte arenoso (caso D ₂) (Croce e Flora, 2000).....	35
Figura 4.2 – Para tratamentos em solo argiloso de resistência ao cisalhamento não-drenado igual a 60 kPa, correlações entre os diâmetros obtidos com o modelo teórico de Modoni <i>et al.</i> (2006) e os parâmetros J_c , calculados com diferentes valores do expoente χ	42
Figura 4.3 – Melhor ajuste das correlações entre o diâmetro obtido através do modelo de Modoni <i>et al.</i> (2006) e o parâmetro J para diferentes valores a) da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e b) da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.	43
Figura 4.4 – Correlações entre a relação água/cimento W da calda e a variável F , calculada com a) $\chi= 0,50$ (solos arenosos) e b) $\chi= 0,77$ (solos argilosos).	45
Figura 4.5 – Correlações entre o parâmetro J e o diâmetro obtido através do modelo de Modoni para tratamentos a) em solos arenosos com $s = 70$ kPa e b) em solos argilosos com $s_u = 100$ kPa.	47
Figura 4.6 – Variação do coeficiente S em relação a) à resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e b) à resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.	49
Figura 4.7 – Grandezas que descrevem o processo erosivo de formação das colunas de <i>jet grouting</i> (sistema monofluido) segundo o modelo de Modoni <i>et al.</i> (2006).	51
Figura 4.8 – Comparação entre os diâmetros de coluna obtidos através do modelo de Modoni <i>et al.</i> (2006) e aqueles calculados com o método simplificado, a partir da geração aleatória de parâmetros de tratamento e de características mecânicas para solos a) arenosos e b) argilosos.	52

Capítulo 5: Validação do Método Teórico Simplificado

Figura 5.1 – Resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso do campo de prova de Barcelona, estimada a partir de ensaios de laboratório do tipo CU e relacionada às cotas de extração das amostras indeformadas.....	54
Figura 5.2 – Campo de prova de Barcelona: medição do diâmetro das colunas a) verticais (grupos A e B) e b) subhorizontais (grupos C e D).....	55
Figura 5.3 – Comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e os diâmetros efetivamente medidos em campos de prova realizados em solos argilosos de Barcelona e da Turquia.	58
Figura 5.4 – Para os tratamentos em solos argilosos, comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e as correspondentes médias aritméticas dos diâmetros medidos.	60
Figura 5.5 – Comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e os diâmetros efetivamente medidos em campos de prova realizados em solos arenosos.	63

Figura 5.6 – Para os tratamentos em solos arenosos, comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e as correspondentes médias aritméticas dos diâmetros medidos.	64
--	----

Capítulo 6: Análise de Sensibilidade

Figura 6.1 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da velocidade inicial do jato e do diâmetro dos bicos, mantidos constantes todos os demais parâmetros de tratamento e do solo.....	69
Figura 6.2 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da velocidade de extração das hastas, mantidos constantes todos os demais parâmetros de tratamento e do solo.	72
Figura 6.3 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da resistência ao cisalhamento dos solos argilosos (em condições não-drenadas) e dos solos arenosos (em condições drenadas), mantidos constantes todos os parâmetros de tratamento.	77
Figura 6.4 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações do intercepto de coesão de areia com $\phi'=30^\circ$ e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1.5}\text{s}^{-0.5}$	79
Figura 6.5 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações do ângulo de atrito de areia com $c'=10$ kPa e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1.5}\text{s}^{-0.5}$	81
Figura 6.6 – Variações percentuais do diâmetro teórico das colunas em relação às variações específicas dos parâmetros de tratamento (velocidade inicial do jato, diâmetro dos bicos e velocidade de extração) e da resistência ao cisalhamento dos solos <i>a)</i> argilosos e <i>b)</i> arenosos.	83

Capítulo 7: Qualidade de Previsão do Método Teórico Simplificado diante da Variabilidade Natural dos Solos

Figura 7.1 – Para os solos argilosos, histograma dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).....	87
Figura 7.2 – Para os solos argilosos, curvas de frequência relativa acumulada dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).....	88
Figura 7.3 – Para os solos arenosos, histograma dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).....	90
Figura 7.4 – Para os solos arenosos, curvas de frequência relativa acumulada dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).....	91

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2: Fundamentos da Tecnologia e do Projeto

Tabela 2.1 – Faixas dos diâmetros de coluna que podem ser obtidos com os diferentes sistemas de <i>jet grouting</i> (<i>apud</i> Carletto, 2003).....	8
--	---

Capítulo 3: O Modelo Teórico de Modoni, Croce e Mongiòvi (2006)

Tabela 3.1 – Densidade, viscosidade laminar aparente e viscosidade cinemática relativa de caldas com relações água/cimento típicas do <i>jet grouting</i> (Raffle e Greenwood, 1961 <i>apud</i> Bell, 1993; Chupin <i>et al.</i> , 2003).....	25
---	----

Capítulo 4: Proposta de Método Teórico Simplificado para a Previsão do Diâmetro das Colunas (Sistema Monofluido)

Tabela 4.1 – Campo típico de variação dos parâmetros de tratamento.....	41
Tabela 4.2 – Expoente χ , correspondente ao melhor ajuste para solos arenosos e argilosos.....	44
Tabela 4.3 – Coeficiente S e expoente β em função a) da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e b) da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.	48
Tabela 4.4 – Coeficiente A e expoentes α e β propostos para as equações do método teórico simplificado.....	50

Capítulo 5: Validação do Método Teórico Simplificado

Tabela 5.1 – Estimativa da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos, campos de prova de Barcelona e da Turquia.	54
Tabela 5.2 – Campo de prova de Barcelona: resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos.	56
Tabela 5.3 – Campo de prova da Turquia (Davie <i>et al.</i> , 2003): resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos.	58
Tabela 5.4 – Estimativa da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos, campos de prova de Rio Matzeu, Veneza, Vesúvio e Barcelona.	61

Tabela 5.5 – Resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos nos campos de prova de Rio Matzeu (Bianco e Santoro, 1995), Veneza (Belloni <i>et al.</i> , 2007), Vesúvio (Croce e Flora, 2000) e Barcelona.....	61
--	----

Capítulo 6: Análise de Sensibilidade

Tabela 6.1 – Redução do diâmetro teórico da coluna com o aumento da relação água/cimento da calda para solos argilosos e arenosos de diferentes resistências ao cisalhamento e para valores médios dos demais parâmetros de tratamento.	74
Tabela 6.2 – Aumento do diâmetro teórico da coluna com o aumento da relação água/cimento da calda para solos argilosos e arenosos de diferentes resistências ao cisalhamento e para valores médios dos demais parâmetros de tratamento.	75
Tabela 6.3 – Para diferentes valores do intercepto de coesão, resistência ao cisalhamento drenado de areia com $\phi'=30^\circ$ e submetida a $\sigma_v=60$ kPa, e respectivos diâmetros teóricos resultantes do seu tratamento com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$	79
Tabela 6.4 – Variações do diâmetro teórico da coluna decorrentes de variações no intercepto de coesão de areia com $\phi'=30^\circ$ e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$	80
Tabela 6.5 – Para diferentes valores do ângulo de atrito, resistência ao cisalhamento drenado de areia com $c'=10$ kPa e submetida a $\sigma_v=60$ kPa, e respectivos diâmetros teóricos resultantes do seu tratamento com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$	81
Tabela 6.6 – Variações do diâmetro teórico da coluna decorrentes de variações no ângulo de atrito de areia com $c'=10$ kPa e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$	82

Capítulo 7: Qualidade de Previsão do Método Teórico Simplificado diante da Variabilidade Natural dos Solos

Tabela 7.1 – Variabilidade natural dos parâmetros de resistência dos solos arenosos e argilosos.	86
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

A : coeficiente que multiplica a resistência ao cisalhamento do solo na sua correlação com o diâmetro da coluna

a_{eq} : área equivalente da seção transversal do cone de jato

b_0 : largura do orifício (jato plano)

C : fator de integração ($= \sqrt{\xi} / 2$)

c : valor crítico do teste de Kolmogorov-Smirnov, obtido da distribuição de D_2 (aceita-se H_0 se a estatística D_2 tiver um valor menor ou igual a c)

c' : em condições drenadas, coesão efetiva (solos areno-argilosos, areno-siltosos ou com alguma cimentação entre os grãos) ou intercepto de coesão (areia pura)

c_u : coesão não-drenada do solo argiloso

D : diâmetro da coluna

D_2 : maior valor absoluto da diferença entre as ordenadas das curvas de frequência relativa acumulada

d : diâmetro do jato cilíndrico

d_0 : diâmetro do bico

E_n : energia medida nos bicos por unidade de comprimento da coluna

E_p : energia medida na bomba por unidade de comprimento da coluna

F : variável que correlaciona a viscosidade cinemática turbulenta relativa, o peso específico e a relação água/cimento da calda ($= N^{0,5*(\chi-1)} \sqrt{\gamma_f}$)

F_x : força na direção x

F_{yx}' : força instantânea (tangencial ao movimento)

g : aceleração da gravidade

H_0 : hipótese (a ser confirmada estatisticamente) de que o modelo representa a realidade

J : parâmetro representante da ação do jato

J_c : parâmetro representante da ação do jato para tratamentos em solos argilosos

J_s : parâmetro representante da ação do jato para tratamentos em solos arenosos

k, k' : constantes

L : comprimento da coluna

l : comprimento de mistura (distância percorrida por uma partícula de fluido sujeita a flutuações de velocidade até esgotar o seu movimento)

M : número de bicos

m : massa da calda jateada

N : viscosidade cinemática turbulenta relativa

p_0 : pressão de bombeamento

Q : vazão

R : raio da coluna

r : raio, medido a partir do eixo longitudinal do jato

r_{eq} : raio equivalente do cone de jato

R_{max} : máximo raio teórico possível para uma coluna de jet grouting

R^2 : coeficiente de determinação (valor entre 0 e 1 que revela o grau de correspondência entre os valores estimados para a linha de tendência e os dados reais)

S : parâmetro representante da ação (resistente) do solo, função da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos e da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos.

s : resistência ao cisalhamento drenado do solo arenoso

s_u : resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso

t : tempo

t^* : tempo de referência para a integração da velocidade de avanço e obtenção do diâmetro da coluna

V_c : velocidade da frente erosiva, correspondente ao avanço do jato no interior do terreno

v_{eq} : velocidade equivalente dos filetes do jato ($= v_f$)

v_f : velocidade equivalente dos filetes do jato ($= v_{eq}$)

v_L : velocidade limite, valor mínimo da velocidade do jato capaz de produzir erosão

v_s : velocidade de extração das hastas durante a operação de jateamento

v_x, \bar{v}_x : velocidade média do filete do jato na direção do seu eixo longitudinal

v_x' : componente flutuante da velocidade paralela ao eixo x

- $v_{x_{max}}$: velocidade máxima dos filetes do jato, registrada no seu eixo longitudinal
- $v_{x_{min}}$: velocidade mínima registrada pelos filetes do jato, no ponto mais afastado do seu eixo longitudinal ($\cong 0$)
- v_{x_0} : velocidade inicial dos filetes do jato (registrada no bico) na direção do seu eixo longitudinal ($= v_0$)
- v_y' : componente flutuante da velocidade paralela ao eixo y
- v_0 : velocidade inicial dos filetes do jato (registrada no bico) na direção do seu eixo longitudinal ($= v_{x_0}$)
- W : relação água/cimento (em peso) da calda jateada
- x : distância horizontal, medida a partir do bico
- x_0 : distância, a partir do bico, que delimita a zona de partida do jato
- y : fator de integração ($= r/x$)
- z : profundidade do ponto de interesse a partir da superfície do terreno

Símbolos gregos

- α : expoente que incide sobre a resistência ao cisalhamento do solo na sua correlação com o diâmetro da coluna
- β : expoente que incide sobre o parâmetro representante do jato na sua correlação com o diâmetro da coluna
- γ : peso específico do fluido jateado
- γ_n : peso específico natural do solo
- Δs : passo de extração das hastas durante o jateamento ($= 5$ cm)
- ε : coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta
- ε_f : coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta do fluido jateado
- ε_w : coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta da água
- η : coeficiente de viscosidade dinâmica turbulenta
- θ : parâmetro de calibração da velocidade de avanço, função do tipo de solo
- κ, κ' : parâmetros de calibração da velocidade do jato
- Λ : parâmetro de calibração da velocidade do jato, função de κ'

- μ : coeficiente de viscosidade dinâmica laminar
- μ_f : coeficiente de viscosidade dinâmica laminar do fluido jateado
- ν : coeficiente de viscosidade cinemática laminar
- ν_f : coeficiente de viscosidade cinemática laminar do fluido jateado
- ν_w : coeficiente de viscosidade cinemática laminar da água
- ξ : parcela da velocidade máxima conservada pelo filete do jato
- ρ : coeficiente de correlação (medida da dependência linear entre duas variáveis aleatórias X e Y; se $\rho = \pm 1$, uma observação de X permite a perfeita previsão de Y)
- ρ_f : densidade do fluido jateado
- σ_v : tensão vertical total
- σ_v' : tensão vertical efetiva
- $\bar{\tau}_{yx}, \bar{\tau}_{xy}$: tensões de cisalhamento médias
- τ_{xy}', τ_{yx}' : tensões de cisalhamento flutuantes
- φ' : ângulo de atrito do solo em condições drenadas
- φ_u : ângulo de atrito do solo em condições não-drenadas
- χ : parâmetro de calibração (expoente que incide sobre o parâmetro J)
- χ^2 : teste de aderência estatística
- ψ : pressão de equivalente do jato
- ψ_s : resistência de solo arenoso à ação erosiva do jato
- Ω : quantidade de movimento do fluido jateado
- Ω_c : parâmetro adimensional de calibração, que reúne os aspectos mecânicos e geométricos desconhecidos do jato e do solo argiloso ($= \Omega_3/\Omega_1$)
- Ω_2 : parâmetro adimensional de calibração da resistência do solo arenoso ao jato
- Ω_s : parâmetro adimensional de calibração, que reúne os aspectos mecânicos e geométricos desconhecidos do jato e do solo arenoso ($= \Omega_2/\Omega_1$)
- Ω_3 : parâmetro adimensional de calibração da resistência do solo argiloso ao jato
- Ω_1 : parâmetro adimensional de calibração da ação do jato
- Ω_0 : quantidade de movimento do fluido jateado medida no bico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE	3
2. FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA E DO PROJETO.....	5
3. O MODELO TEÓRICO DE MODONI, CROCE E MONGIOVÌ (2006)	16
3.1 PRINCÍPIOS.....	16
3.2 PROPAGAÇÃO DO JATO ANTES DE ATINGIR O TERRENO	17
3.2.1 Difusão dos jatos submersos	17
3.2.2 Difusão do jato submerso de calda de cimento, segundo o modelo de Modoni <i>et al.</i> (2006)	19
3.3 INTERAÇÃO JATO-SOLO	26
3.3.1 Princípios.....	26
3.3.2 Ação do jato	28
3.3.3 Resistência do solo arenoso ao jato	29
3.3.4 Resistência do solo argiloso ao jato.....	30
3.4 DIÂMETRO TEÓRICO DAS COLUNAS	30
4. PROPOSTA DE MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO PARA A PREVISÃO DO DIÂMETRO DAS COLUNAS (SISTEMA MONOFLUIDO).....	33
4.1 PRINCÍPIOS.....	33
4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS RELEVANTES	36
4.3 PARÂMETRO J : DEFINIÇÃO DO EXPOENTE χ	41
4.4 OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA TIPO DE SOLO	46
4.5 EQUIVALÊNCIA ENTRE OS DIÂMETROS OBTIDOS COM O MODELO DE MODONI <i>ET AL.</i> (2006) E AS PREVISÕES FORNECIDAS PELO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO	50
5. VALIDAÇÃO DO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO	53
5.1 PRINCÍPIOS.....	53
5.2 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA SOLOS ARGILOSOS.....	53
5.3 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA SOLOS ARENOSOS.....	60
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	65
6.1 PRINCÍPIOS.....	65
6.2 VELOCIDADE INICIAL DO JATO E DIÂMETRO DOS BICOS	66
6.3 VELOCIDADE DE EXTRAÇÃO DAS HASTES	69
6.4 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DA CALDA	73
6.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS	76
6.6 ÁBACOS COMPARATIVOS	82
7. QUALIDADE DE PREVISÃO DO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO DIANTE DA VARIABILIDADE NATURAL DOS SOLOS	85
7.1 PRINCÍPIOS.....	85
7.2 ADERÊNCIA ENTRE A REALIDADE E O MODELO PROPOSTO	85
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE: VISCOSIDADE TURBULENTA DOS FLUIDOS	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

As obras de Engenharia Civil, principalmente as de grande porte (túneis, barragens etc.), usualmente requerem a melhoria das características mecânicas dos terrenos onde serão implementadas. Devido a solicitações e condições de fluxo d'água particularmente adversas, é necessário aumentar a capacidade de carga e o módulo de deformabilidade do solo e/ou diminuir a sua permeabilidade.

Dentre as técnicas de tratamento de solos, o *jet grouting* é aquela que, devido à sua flexibilidade, conheceu a mais rápida difusão em todo o mundo. Pode ser aplicado a solos de qualquer composição granulométrica, além de permitir a consolidação de um determinado volume de maciço com forma geométrica bem definida, quer em planta, quer em profundidade.

Melhorias técnicas são introduzidas continuamente com o intuito de obter colunas de diâmetros cada vez maiores. Entretanto (como, aliás, frequentemente acontece), o desenvolvimento da tecnologia superou, e muito, a capacidade de modelação e análise. O projeto de *jet grouting* é ainda hoje realizado com base em critérios empíricos, fazendo-se referência a experiências anteriores nem sempre pertinentes. Como consequência, muitas vezes se verificam desperdícios de recursos em aplicações inutilmente onerosas ou, ao contrário, custosos insucessos.

No meio técnico é grande a exigência por critérios racionais capazes de orientar a escolha dos procedimentos mais adequados para o tratamento dos diferentes tipos de solo. A presente tese de doutorado pretende constituir, neste sentido, uma importante contribuição.

1.2 OBJETIVO

É notável o grau de incerteza na fase de projeto dos tratamentos com *jet grouting* devido à ausência de métodos confiáveis para a previsão do diâmetro das colunas.

A coluna de *jet grouting* é o resultado da interação entre o jato de calda cimentante e o terreno. Ao contrário do que ocorre com a parcela relativa ao solo, a contribuição do jato pode ser controlada durante a aplicação da tecnologia. De fato, impõem-se valores aos parâmetros de tratamento (pressão, relação água/cimento da calda, velocidade de extração das hastes etc.) com o intuito de se obter o diâmetro de coluna desejado.

Na literatura estão disponíveis diversas correlações de caráter empírico que indicam as faixas de variação dos diâmetros que podem ser formados em diferentes tipos de solo. Tais correlações, entretanto, são incapazes de orientar a escolha dos parâmetros de tratamento, pois não permitem a avaliação da influência relativa de todas as variáveis do terreno e do jato no diâmetro das colunas.

Na prática são realizados os chamados *campos de prova*. Em condições de subsolo representativas da subsequente fase executiva, executam-se colunas com algumas diferentes combinações de parâmetros de tratamento (geralmente poucas, por razões logísticas e econômicas). Medidos os diâmetros, a combinação de parâmetros escolhida será aquela que tiver sido capaz de garantir, em campo, o resultado dimensional desejado.

De qualquer forma, devido a uma característica fisiológica do *jet grouting*, os diâmetros obtidos em campo devem ser verificados ao longo de toda a fase executiva dos tratamentos. À diferença do que ocorre com quase todos os tipos de estaca, cujas dimensões podem ser cuidadosamente controladas durante a execução, com o *jet grouting* as características do solo têm grande influência no diâmetro dos corpos consolidados. Como consequência, podem-se verificar significativas variações locais da seção transversal das colunas devido à heterogeneidade dos terrenos naturais.

Uma vez constatada, em fase executiva, a inconformidade em relação ao diâmetro de projeto, deve-se intervir imediatamente no sentido de alterar os parâmetros de tratamento, sob pena de se comprometer a eficácia da aplicação do *jet grouting*.

O objetivo desta tese de doutorado é propor uma ferramenta de projeto capaz de interpretar os resultados de campo e de orientar, *com bases teóricas mas de forma simples e rápida*, a escolha racional dos parâmetros de tratamento na busca dos diâmetros de coluna desejados.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

No *capítulo 2* são apresentados os princípios fundamentais da tecnologia, os sistemas de jateamento (mono, bi e trifluido) e os campos típicos de aplicação, além dos aspectos mais importantes referentes ao projeto de um tratamento de *jet grouting*.

No *capítulo 3* descreve-se o modelo teórico de Modoni *et al.* (2006), que analisa de forma rigorosa o fenômeno mecânico induzido pelo jateamento dos terrenos com o sistema monofluido.

No *capítulo 4* é apresentado o método teórico simplificado de previsão do diâmetro das colunas de *jet grouting*. Quantificada, com base no modelo de Modoni, a influência relativa das variáveis do jato e do terreno no resultado dimensional do tratamento, são propostas correlações simples entre as características mecânicas do solo, os parâmetros operacionais e o diâmetro da coluna. Além disso, demonstra-se a equivalência entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e aqueles obtidos estabelecendo inter-relações entre as diversas expressões analíticas do modelo de Modoni.

No *capítulo 5*, o método proposto é validado por meio da comparação entre previsões teóricas e respectivas observações experimentais. A maior parte dos dados de campo provém de Barcelona (Espanha) e foram publicados num congresso italiano realizado em Salerno (Carletto *et al.*, 2007). Após ampla pesquisa

bibliográfica, foram também compilados dados experimentais publicados por outros autores, dos quais se destacam Croce e Flora (2000) com os tratamentos executados no campo de prova Vesúvio.

No *capítulo 6* são realizadas análises paramétricas a partir das equações do método teórico simplificado. O objetivo é quantificar o efeito que variações de cada parâmetro de tratamento e dos parâmetros do solo exercem sobre o diâmetro teórico da coluna.

Enfim, para mostrar que os erros de previsão observados no *capítulo 5* são atribuíveis à heterogeneidade dos terrenos e não a uma eventual inadequação de modelo, no *capítulo 7* avalia-se a qualidade de previsão do método teórico simplificado diante da variabilidade natural dos solos.

Completam este trabalho as conclusões e recomendações para pesquisas futuras (*capítulo 8*), além das referências bibliográficas e do *Apêndice*, relativo ao estudo da viscosidade turbulenta.

2. FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA E DO PROJETO

O *jet grouting* é uma técnica de tratamento de solos que consiste no jateamento de um fluido cimentante (geralmente calda de cimento) a alta velocidade, por meio de bicos de pequeno diâmetro (de 2 a 4 mm) dispostos lateralmente na extremidade de uma composição de hastes. Dotadas de movimento rotacional a velocidade constante, as hastes são extraídas lentamente em direção à superfície do terreno, dando origem a corpos de solo-cimento de formato aproximadamente cilíndrico, denominados *colunas de jet grouting* (fig. 2.1).

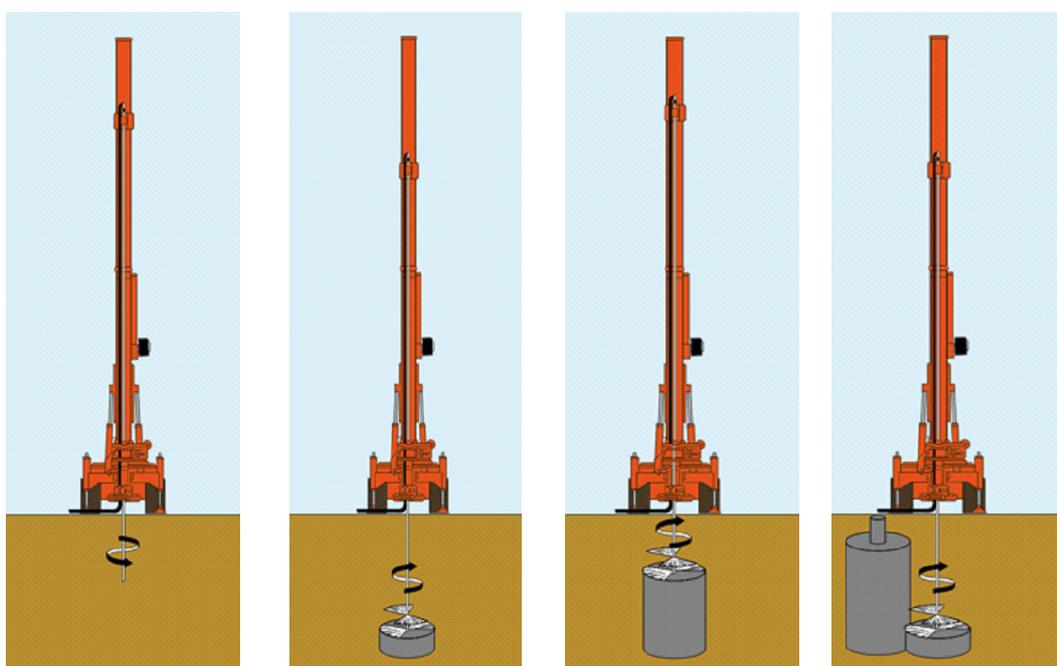


Figura 2.1 – Execução das colunas de *jet grouting* (apud Modoni, 2006)

A pressão de bombeamento utilizada (até 550 vezes a pressão atmosférica) confere ao fluido uma grande energia de natureza potencial, que se transforma em energia cinética tão logo a calda atravessa os bicos. Em geral, a velocidade do jato resultante atinge valores entre 200 e 400 m/s.

O *jet grouting* não é um método de injeção, mas sim uma técnica hidrodinâmica que promove a mistura do solo *in situ* com a calda de cimento visando à produção de um

novo material. Fundamentalmente, a técnica não procura melhorar o terreno por preenchimento de vazios, mas tem por objetivo formar elementos até certo ponto geométrica e estruturalmente controlados. Além disso, e mais uma vez em contraposição às técnicas tradicionais de injeção de solos, com o *jet grouting* podem ser aplicados volumes de tratamento muito reduzidos e seletivamente dirigidos no espaço. A quantidade necessária de aglomerante pode ser estabelecida *a priori*, bem como os custos envolvidos no tratamento.

Um dos aspectos físicos mais interessantes da técnica é o esgotamento total da elevadíssima pressão de jateamento dentro de um raio limitado a poucas vezes o diâmetro da perfuração. A enorme energia cinética inicial do fluido se dissipa rapidamente, até se esgotar por completo a uma determinada distância (raio da coluna). Tudo acontece como se o solo circundante se comportasse como uma “forma sólida”, dentro da qual ocorre todo o processo de desagregação do solo e a sua mistura com a calda de cimento. Intuitivamente, isso se explica observando que, ao longo do espaço anelar entre o furo e a composição de hastes, normalmente se produz o refluxo do material excedente do jateamento.

Se, por qualquer razão, o material excedente não conseguir fluir livremente até a superfície do terreno, ocorre a reconversão de parte da energia cinética em energia potencial. Como resultado, a parcela aprisionada do material excedente “força o seu caminho” através de discontinuidades maiores ou menores da massa de solo, gerando clacagens e deslocamentos no maciço que está sendo tratado. Este efeito colateral, extremamente danoso caso existam edificações nas proximidades do tratamento, é particularmente preocupante quando o solo a ser jateado se trata de uma argila mole. De qualquer forma, existem alguns procedimentos executivos especificamente utilizados com a finalidade de evitá-lo. Por exemplo, para impedir o fechamento das paredes do furo durante o tratamento, procede-se à perfuração com o acréscimo de revestimentos, os quais são retirados simultaneamente à extração das hastes durante a operação de jateamento (*fig. 2.2*).



Figura 2.2 – Retorno do refluxo, garantido através de revestimento do furo (túnel da Avenida Santo Amaro com Avenida Juscelino Kubitchek, São Paulo) (Novatecna, 2002)

De maneira geral, os sistemas de *jet grouting* podem ser classificados em mono, bi ou trifluido (*fig. 2.3*), de acordo com o número de fluidos jateados simultaneamente no solo.

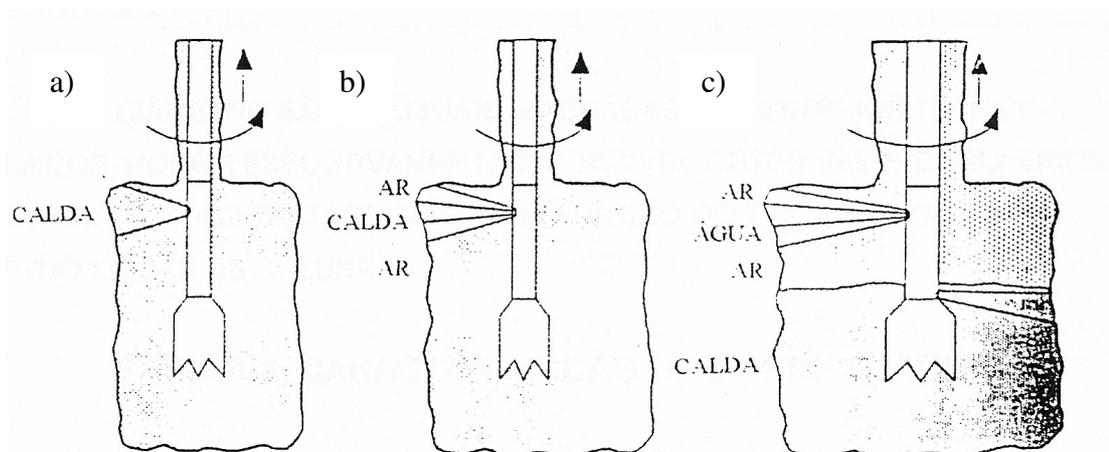


Figura 2.3 – Sistemas de *jet grouting*: a) monofluido, b) bifluido e c) trifluido

Quando a calda de cimento, que constitui o único fluido jateado com o *sistema monofluido* ou *CCP*, é envolvida por um jato coaxial de ar comprimido, tem-se o chamado *sistema bifluido*, *JG* ou *JSG*. Em ambos os casos, contudo, um mesmo jato exerce as funções de desagregar o solo e de cimentá-lo. Por outro lado, se o jato de calda é utilizado apenas para consolidar o terreno já desagregado por um outro jato (de alta velocidade) de água e ar comprimido, o sistema torna-se *trifluido* (também denominado *CJG*, *CJSG* ou *Kajima*).

Os sistemas de *jet grouting* se diferenciam pelo potencial de cada um deles em desagregar o terreno, o qual aumenta quando se utiliza o sistema bifluido ao invés do monofluido, ou o trifluido ao invés do bifluido. De fato, com o sistema trifluido são obtidos os máximos diâmetros de coluna possíveis com a tecnologia¹. A *tab. 2.1* mostra as faixas típicas de variação dos diâmetros, segundo diversas fontes bibliográficas compiladas pelo autor.

Tabela 2.1 – Faixas dos diâmetros de coluna que podem ser obtidos com os diferentes sistemas de *jet grouting* (apud Carletto, 2003)

Sistemas de <i>jet grouting</i>	Monofluido	Bifluido	Trifluido
	0,4 a 0,8 m	0,9 a 1,8 m	1,9 a 3,0 m

O *jet grouting* aplica-se, em princípio, a qualquer tipo de solo, sem restrições granulométricas, geológicas ou de presença de água. As colunas podem ser executadas a partir da superfície do terreno, na direção vertical ou inclinada, ou, ainda, a partir da frente de escavação de túneis para a formação de escudos subhorizontais de pré-revestimento (*fig. 2.4*).

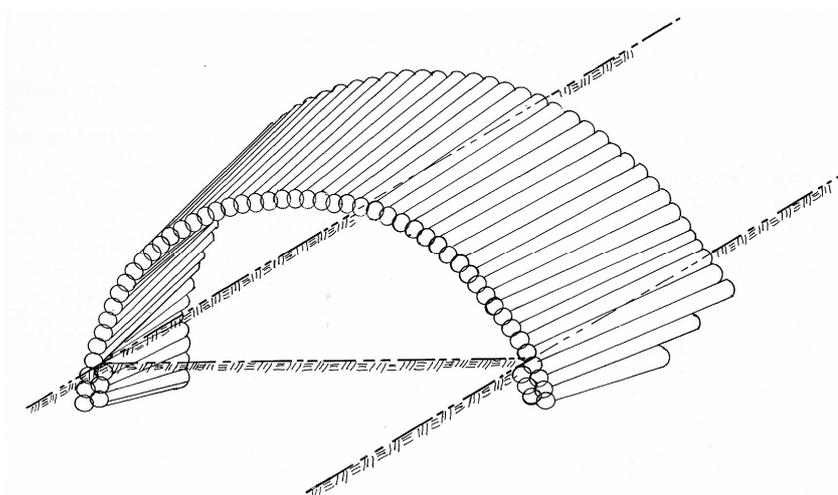


Figura 2.4 – Perspectiva espacial do tratamento de *jet grouting* subhorizontal (Novatecna, 2003)

¹ Embora produza os maiores diâmetros, o sistema trifluido é relativamente pouco utilizado devido à sua maior complexidade.

O avanço de um túnel se estende por longas distâncias, nas quais, em geral, as condições do subsolo variam substancialmente. Neste caso, o *jet grouting* é uma técnica de tratamento particularmente adequada, pois permite fácil acesso à região do maciço de interesse e é capaz de tratar uma grande variedade de solos. Graças à sua versatilidade, a execução de colunas subhorizontais para o pré-revestimento de túneis constitui uma das principais aplicações da tecnologia em todo o mundo.

Uma outra aplicação clássica do *jet grouting* refere-se à execução de barreiras impermeáveis. É possível prever a realização de colunas interpenetrantes, com perfeita adesão no contato entre as mesmas (*fig. 2.5*).



Figura 2.5 – Adesão entre duas colunas de *jet grouting* (Novatecna, 2003)

Quando o jato encontra em sua trajetória um obstáculo (por exemplo, uma outra coluna já consolidada), percebe-se um efeito análogo àquele produzido pelo vento: os filetes da calda em regime turbulento, obrigados a desviarem do seu caminho, formam um redemoinho que acaba envolvendo também a parte oposta do obstáculo. Por tal motivo, uma coluna que venha a ser executada nas proximidades de outra coluna constituirá com esta um bloco único.

Dentre as demais aplicações da tecnologia, destacam-se:

- ✓ Estabilização temporária de emboques e desemboques de túneis por meio de colunas subverticais;
- ✓ Formação de paredes de contenção e lajes de fundo para escavações cilíndricas (poços), retangulares e lineares (trincheiras);
- ✓ Formação de cortinas de vedação em barragens;
- ✓ Execução de septos antipoluentes;
- ✓ Reforço de fundações;
- ✓ Estruturação de maciços, isto é, execução de conjuntos de colunas em aterros sobre solos moles, com a finalidade de receber o carregamento e de transmitirlo à camada portante subjacente; e
- ✓ Estabilização de taludes contra escorregamentos por intermédio de conjuntos de colunas armadas que, atravessando a provável superfície de ruptura, garantam a resistência ao cisalhamento necessária.

Logo após a operação de jateamento, as colunas podem ser armadas com fibras de vidro, perfis ou vergalhões de aço etc., conferindo resistência à tração à estrutura de solo consolidado. As diferenças em relação ao concreto armado convencional estão na posição da armadura, instalada no eixo longitudinal das colunas (condição, aliás, desfavorável), e na resistência característica à compressão do “concreto” (solocimento no caso do *jet grouting*, cuja resistência à compressão é de cerca de um décimo daquela apresentada pelo concreto).

Com a aplicação do *jet grouting* podem ser realizadas verdadeiras estruturas de engenharia, formadas por conjuntos de colunas com adequadas características geométricas, mecânicas e/ou de permeabilidade. Todavia, enquanto para as estacas de fundação, por exemplo, tais características podem ser, em geral, cuidadosamente controladas durante a execução, para o *jet grouting* isto é possível apenas em parte. O diâmetro e a resistência das colunas são notavelmente influenciados pelas características do solo antes de ser tratado. Mesmo onde se espera um resultado global positivo, a experiência mostra que podem se verificar significativas variações locais das características das colunas (devido, sobretudo, à heterogeneidade dos terrenos naturais), capazes de reduzir consideravelmente a eficácia do tratamento.

Assim, é importante prever, como parte integrante do projeto, a realização de uma série de verificações experimentais com o intuito de diminuir as incertezas sobre o resultado da aplicação da tecnologia.

Uma das considerações mais importantes num projeto de *jet grouting* é o diâmetro das colunas. E a obtenção de colunas com um determinado diâmetro através do jateamento de um determinado tipo de solo compreende as seguintes etapas:

I. Caracterização geotécnica do subsolo

Com as técnicas de investigação normalmente utilizadas (ensaios de laboratório, ensaios penetrométricos, de palheta etc.), avaliam-se a composição granulométrica e a resistência ao cisalhamento dos terrenos naturais a serem tratados.

II. Escolha da técnica de tratamento

A escolha do sistema de *jet grouting* (mono, bi ou trifluido) é orientada pela caracterização geotécnica do subsolo. Pode-se contar com ábacos empíricos (como aqueles mostrados na *fig. 2.6*), que indicam as faixas de variação dos diâmetros normalmente obtidos com as diferentes técnicas de tratamento em cada tipo de solo. Ressalta-se, todavia, que tais ábacos fornecem diâmetros frequentemente discordantes entre si em função das características específicas de solo (condições geológico-geotécnicas) e tecnológicas (valores adotados para os parâmetros de tratamento) em base às quais foram elaborados.

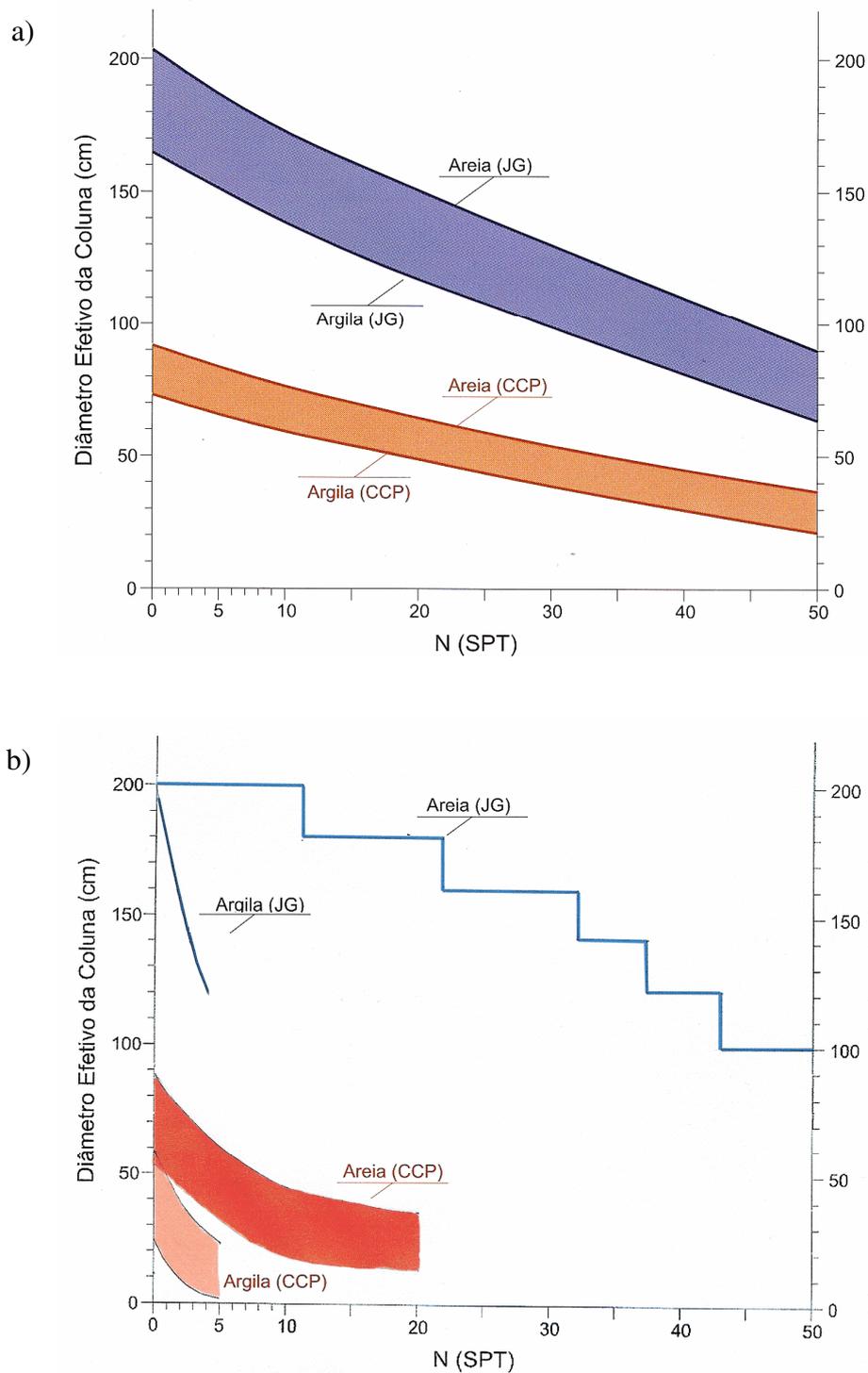


Figura 2.6 – Ábacos a) nacional (Novatecna, 2003) e b) internacional (segundo Miki e Nakanishi, 1984 e JJGA apud Abramento, Koshima e Zirlis, 1999) que fornecem faixas de diâmetro para as colunas executadas com os métodos monofluído (CCP) e bifluído (JG) em argilas e areias em função do número de golpes do ensaio SPT.

III. Escolha dos parâmetros de tratamento

Definidos o perfil geotécnico do subsolo e o sistema de *jet grouting* a ser adotado, parte-se para a escolha dos parâmetros de tratamento capazes de produzir os diâmetros de projeto.

Para o sistema monofluido, seis parâmetros devem ser definidos: a pressão de bombeamento e a relação água/cimento da calda, a quantidade e o diâmetro dos bicos, e as velocidades de extração e de rotação da composição de hastes durante o jateamento. Para o sistema bifluido existem duas variáveis adicionais (a pressão e a vazão do ar comprimido), enquanto que, para o trifluido, são onze, no total, os parâmetros operacionais (os oito do sistema bifluido, além da quantidade e do diâmetro dos bicos para a água, e da pressão em que é jateada).

Desde a criação do *jet grouting* no Japão, na década de 1970, muitos autores tentaram desvendar, interpretando de forma empírica um determinado número de resultados de campo, qual é a influência dos diferentes parâmetros de tratamento no diâmetro das colunas.

Para o sistema monofluido, por exemplo, Kanematsu (1980) sugeriu que o raio da coluna fosse igual a 300 vezes o diâmetro do bico (ambos expressos em metros), sem nenhuma referência às características do solo a ser tratado, nem aos demais parâmetros de tratamento.

Levando em conta um outro parâmetro operacional (a pressão de bombeamento da calda), Langbehn (1986) propôs faixas de variação dos diâmetros de coluna que podem ser obtidos com o tratamento de argilas moles e de areias medianamente compactas (*fig. 2.7*).

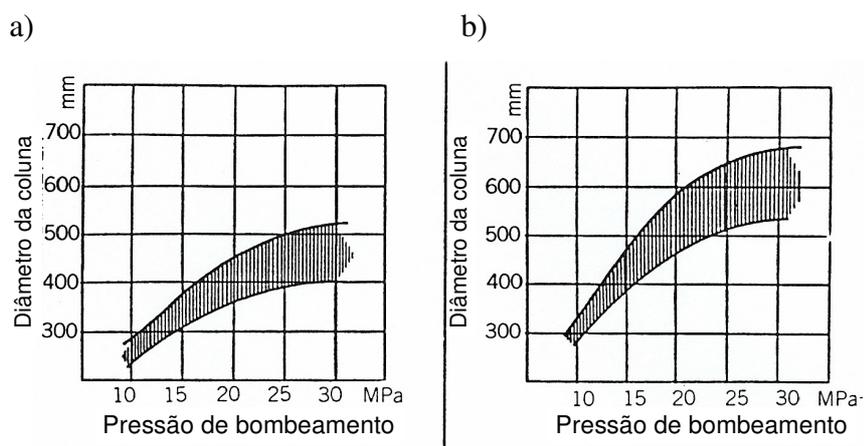


Figura 2.7 – Faixas de diâmetros de coluna que podem ser obtidos com o método monofluido em função da pressão de bombeamento em a) argila mole e b) em solo arenoso medianamente compacto (Langbehn, 1986)

Tais abordagens empíricas, pelo fato de levarem em consideração apenas alguns aspectos que concorrem à formação das colunas, não cumprem o papel de indicar os parâmetros de tratamento a serem utilizados no jateamento de um determinado terreno para a obtenção do diâmetro desejado.

Na prática, confia-se a escolha dos parâmetros de tratamento à experiência da empresa executora. De modo geral, são realizados campos de prova em áreas adjacentes e/ou representativas do terreno a ser tratado, onde colunas são executadas com algumas diferentes combinações de parâmetros de tratamento. Dentre estas combinações, escolhidas com critérios nem sempre claros ao projetista, é adotada para a realização dos tratamentos aquela que, no campo de prova, mostrar-se capaz de garantir o resultado dimensional estabelecido em projeto.

IV. Verificação dos diâmetros obtidos

A verificação, em fase executiva, da eficácia dos parâmetros de tratamento escolhidos em campo de prova é realizada através da observação direta das colunas ou, ainda, por meio de métodos geofísicos (cross-hole, tomografia sônica etc.).

Uma vez constatada a inconformidade dos diâmetros obtidos em campo, a decisão de quais parâmetros modificar deve ser tomada durante a fase executiva e em tempos extremamente reduzidos, sob pena de se comprometer o resultado global do tratamento.

Tanto a escolha inicial quanto os ajustes dos parâmetros de tratamento são realizados, atualmente, *com bases absolutamente empíricas*.

Em 2006, após quase trinta anos de pesquisas sobre a tecnologia, os professores Giuseppe Modoni e Paolo Croce, da Universidade de Cassino (Itália), e Luigi Mongiovì, da Universidade de Trento (Itália), publicaram um modelo do fenômeno mecânico induzido pelo *jet grouting* (Modoni *et al.*, 2006). A partir de então, lançou-se uma base teórica para a análise do processo erosivo desencadeado pelo jateamento dos solos.

No mesmo ano, Croce e Modoni foram contratados pela Universidade da Catalunha (Espanha) para o projeto dos tratamentos de *jet grouting* a serem executados na construção de um túnel ferroviário em Barcelona, parte da ligação em alta velocidade entre Madri e a fronteira francesa.

Com a co-orientação de ambos, o autor deste trabalho apresenta um **método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas (sistema monofluido)**. Identificando e correlacionando os parâmetros do solo e do jato que incidem sobre o resultado dimensional do tratamento, o método proposto orienta de forma simples (através de equações fechadas) a escolha da combinação mais oportuna dos parâmetros operacionais na busca do diâmetro desejado.

Validado a partir de resultados experimentais provenientes dos campos de prova de Barcelona (Carletto *et al.*, 2007) e de outros casos publicados na literatura, o método teórico simplificado demonstrou ser uma ferramenta eficaz de projeto já durante a execução do túnel catalão.

3. O MODELO TEÓRICO DE MODONI, CROCE E MONGIOVÌ (2006)

3.1 PRINCÍPIOS

Devido à complexidade do fenômeno mecânico induzido pelo *jet grouting*, o modelo teórico de Modoni *et al.* (2006) é restrito ao sistema monofluido, o mais simples de todos, e subdivide-se em duas etapas.

A primeira etapa da análise (*item 3.2*) é dedicada à propagação do jato através do espaço entre os bicos e o solo. Este espaço, geralmente preenchido por algum fluido (proveniente da perfuração, do lençol freático e do próprio jateamento), pode ser bastante estreito no começo do tratamento. Porém, à medida que o solo é erodido pelo jato, a parede do furo se alarga e amplia-se a região ocupada pelo fluido. A evolução das características geométricas e cinéticas do jato no interior dessa região é analisada com base no *modelo do comprimento de mistura* de Prandtl (1925; 1942) e na *teoria dos jatos submersos* de Hinze (1948).

Atingida a parede do furo, a interação jato-solo (*item 3.3*) é analisada de diferentes formas para solos arenosos e argilosos.

Com o estabelecimento de inter-relações entre as diversas expressões analíticas obtidas nas duas etapas de análise, chega-se ao diâmetro da coluna segundo o modelo de Modoni (*item 3.4*). Comparando-se a velocidade do fluido v_f nos pontos de impacto com o terreno a uma velocidade limite, função dos parâmetros do solo, obtém-se velocidade de avanço da frente erosiva V_c . A partir daí, é possível estabelecer o raio R da coluna através da integração da velocidade de avanço ao longo do tempo de jateamento t^* (*fig.3.1*).

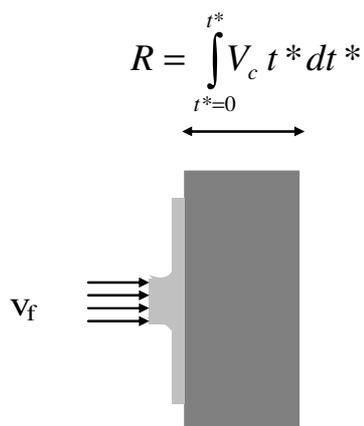


Figura 3.1 – Esquema da interação jato-solo na formação das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido) em solos arenosos e argilosos, segundo o modelo de Modoni *et al.* (2006)

3.2 PROPAGAÇÃO DO JATO ANTES DE ATINGIR O TERRENO

3.2.1 Difusão dos jatos submersos

Um jato é denominado *submerso* quando penetra num ambiente do mesmo fluido em repouso. A *fig. 3.2* mostra a difusão de um jato submerso segundo Prandtl (1942).

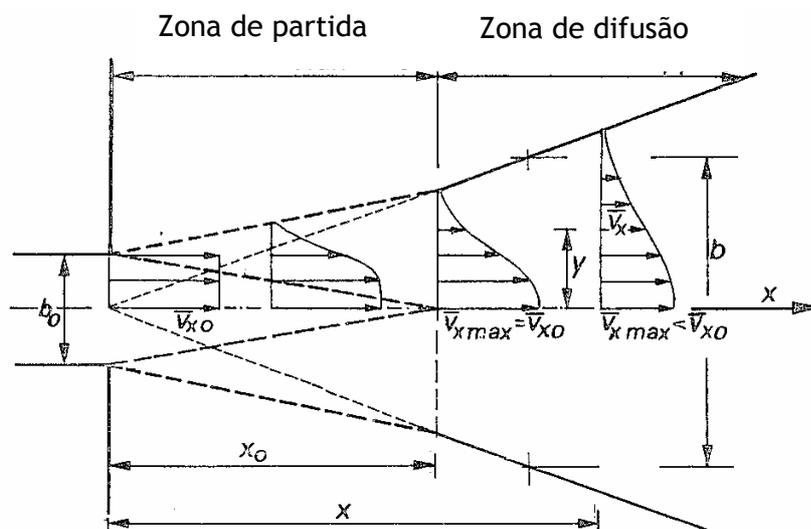


Figura 3.2 – Difusão de um jato submerso plano (Prandtl, 1942)

O jato parte com velocidade inicial transversalmente uniforme v_{x_0} através de um orifício de largura b_0 (jato plano) ou de um bico de diâmetro d_0 (jato cilíndrico). Sua difusão se manifesta inicialmente numa região delimitada por duas retas (tracejadas na *fig. 3.2*) que, a partir da borda do orifício, dividem-se, respectivamente, em direção ao eixo longitudinal do jato e rumo ao ambiente externo. As primeiras isolam um cone central, onde o movimento, ao longo do eixo, desenvolve-se incólume com a mesma velocidade inicial. Superada esta zona, os esforços tangenciais que surgem no contorno do jato devido à natureza viscosa dos fluidos aumentam a parcela da energia transferida ao fluido ambiente. Como consequência, parte da massa fluida em repouso é mobilizada na direção x (até o momento em que a velocidade v_x nas fronteiras do jato se reduz a uma parcela muito pequena da velocidade registrada no seu eixo longitudinal).

Sendo a região até x_0 uma *zona de partida*², aquela sucessiva corresponde ao movimento turbulento plenamente desenvolvido (*zona de difusão*). Nesta última, a velocidade $v_{x_{\max}}$ (sobre o eixo) diminui progressivamente em relação à velocidade inicial v_{x_0} , e os perfis transversais se dilatam, tornando-se mais uniformes.

Com o modelo do comprimento de mistura, complementado por hipóteses simplificadoras relativas ao fenômeno de turbulência livre³, Prandtl (1925; 1942) propõe que um *coeficiente de viscosidade turbulenta constante ao longo do fluxo* possa ser utilizado na descrição do escoamento turbulento de fluido newtoniano⁴ em forma de jato submerso.

Anos mais tarde, Hinze (1948) obtém a solução analítica para a distribuição transversal da velocidade de um jato d'água cilíndrico submerso no interior da zona de difusão. Admitindo-se a conservação da quantidade de movimento, a distribuição

² Resultados experimentais obtidos por Reichardt (1942) apud Ghetti (1998) mostram que a distância x_0 corresponde a poucas vezes o diâmetro d_0 .

³ A turbulência é livre quando se manifesta no interior do próprio fluido em movimento pela instabilidade do processo de contato entre correntes de diferentes velocidades.

⁴ Isaac Newton percebeu que, em escoamento laminar (à baixa velocidade), alguns fluidos (denominados *fluidos newtonianos*), dentre eles a água, apresentam taxa de deformação diretamente proporcional à tensão aplicada. À constante de proporcionalidade ele deu o nome de *viscosidade*.

transversal das velocidades médias ao longo do raio r , medido a partir do eixo longitudinal do jato, num ponto distante x do bico, é igual a:

$$\frac{v_x}{v_{x_{\max}}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(r/x)^2}{\kappa \varepsilon_w}\right]^2} \quad (1)$$

onde κ é um parâmetro de calibração a ser avaliado experimentalmente, e ε_w é a viscosidade cinemática turbulenta da água.

Sendo a viscosidade ε_w constante, para uma determinada distância x a partir do bico, quanto mais externo estiver o filete do jato (ou seja, quanto maior r), menor será a sua velocidade. Além disso, para uma determinada distância r a partir do eixo do jato, quanto mais afastado do bico estiver (isto é, quanto maior x), maior será a velocidade do filete do jato relativa à $v_{x_{\max}}$. Em conformidade com o esquema de Prandtl para a difusão de um jato submerso (*fig. 3.2*), os perfis transversais de velocidade tendem a se uniformizar à medida que se afastam do bico.

Para maiores detalhes, remete-se ao *Apêndice*.

3.2.2 Difusão do jato submerso de calda de cimento, segundo o modelo de Modoni *et al.* (2006)

A difusão do jato de calda de cimento é descrita analiticamente pelo modelo de Modoni adotando-se inicialmente duas hipóteses simplificadoras. Em primeiro lugar, as caldas de cimento são tratadas como *fluidos newtonianos equivalentes*, para os quais existem observações experimentais e modelos relativamente simples (Prandtl, 1925; 1942 e Hinze, 1948) mesmo quando se encontram em fluxos turbulentos (ver *Apêndice*). Além disso, admite-se que o *fluido jateado tenha o mesmo peso específico e a mesma viscosidade do fluido circunstante* (ambos são suspensões de cimento, embora o fluido circunstante possa conter também partículas de solo).

Com o objetivo de estender a solução de Hinze (eq. 1) para um fluido genérico, é introduzido o conceito de viscosidade cinemática turbulenta relativa N , pelo qual:

$$N = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_w} \quad (2)$$

onde ε_f é a viscosidade cinemática turbulenta do fluido jateado.

Assim:

$$\frac{v_x}{v_{x_{\max}}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(r/x)^2}{\kappa' N}\right]^2} \quad (3)$$

onde o fator $\kappa' = \kappa \varepsilon_w$ pode ser avaliado experimentalmente a partir de jatos d'água.

No modelo de Modoni, κ' e a variação de $v_{x_{\max}}$ ao longo do eixo x são obtidos admitindo que a quantidade de movimento do jato em x é constante e igual à quantidade de movimento no bico, isto é:

$$\Omega = \int_{r=0}^{\infty} \rho_f v_x^2 2\pi r dr = \rho_f v_{x_0}^2 \pi \frac{d_0^2}{4} = \Omega_0 \quad (4)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido jateado.

Na eq. (4), introduzindo v_x calculado pela eq. (3) e escrevendo $y = r/x$, tem-se:

$$v_{x_{\max}} = v_{x_0} \frac{d_0}{x} \frac{1}{\sqrt{8 \int_0^{\infty} \frac{y}{\left(1 + \frac{y^2}{\kappa' N}\right)^4} dy}}$$

A integral do segundo membro pode ser assim calculada:

$$\int_0^{\infty} \frac{y}{\left(1 + \frac{y^2}{\kappa' N}\right)^4} dy = (\kappa' N)^4 \int_0^{\infty} \frac{y}{(\kappa' N + y^2)^4} dy$$

Escrevendo $d(\kappa' N + y^2) = 2y dy$, tem-se:

$$\int_0^{\infty} \frac{y}{\left(1 + \frac{y^2}{\kappa' N}\right)^4} dy = \frac{(\kappa' N)^4}{2} \int_0^{\infty} \frac{d(\kappa' N + y^2)}{(\kappa' N + y^2)^4} = \frac{\kappa' N}{6}$$

Desta forma, a variação da velocidade registrada no eixo longitudinal do jato é igual a:

$$\frac{v_{x_{\max}}}{v_{x_0}} = \frac{\Lambda}{\sqrt{N}} \frac{d_0}{x} \quad (5)$$

onde o parâmetro Λ é uma função do κ' :

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{8}{6} \kappa'}} \quad (6)$$

Shibazaki (2003) observa experimentalmente que o decréscimo da velocidade do fluido ao longo do eixo longitudinal do jato é afetado pelo formato do bico. Em particular, a taxa de redução de $v_{x_{\max}}$ é maior quando a seção transversal do bico estreita-se abruptamente. Disto resulta que o parâmetro Λ pode ser determinado através de ensaios específicos, nos quais sejam adotados diferentes formatos de bico.

No modelo de Modoni, o parâmetro Λ é avaliado comparando-se a eq. (5) aos resultados experimentais publicados por Vleeshauwer e Maertens (2000). Estes

ensaios medem o decréscimo de velocidade ao longo do eixo em vários jatos d'água produzidos com diferentes pressões de bombeamento p_0 a partir de um bico de 2,2 mm de diâmetro (fig. 3.3).

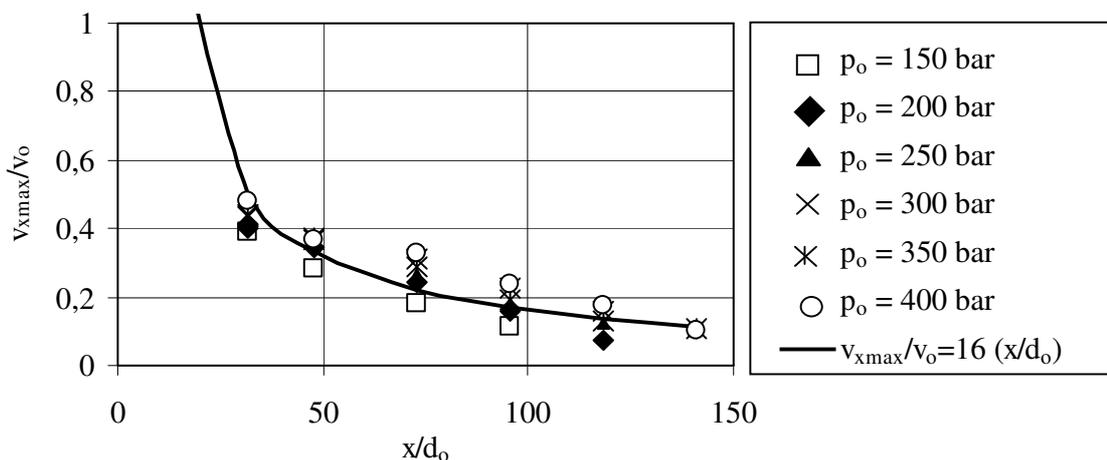


Figura 3.3 – Variação da velocidade no eixo de um jato d'água, produzido com diferentes pressões de bombeamento a partir de um bico de 2,2 mm de diâmetro (Vleeshauwer e Maertens, 2000)

Observa-se que o decréscimo de velocidade não é significativamente dependente da pressão p_0 , e que os resultados experimentais são congruentes à eq. (5) adotando-se um valor de Λ igual a 16.

Enfim, a relação entre κ' e Λ (eq. 6) permite que a distribuição transversal das velocidades médias (eq. 3) seja expressa na forma:

$$\frac{v_x}{v_{x,max}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1,33\Lambda^2(r/x)^2}{N}\right]^2} \quad (7)$$

De acordo com a eq. (7), o perfil de velocidade em cada seção transversal fornece valores positivos da velocidade v_x mesmo para valores muito grandes de r . De modo mais realístico, admite-se que o jato esteja confinado numa região cônica e que a velocidade seja nula nas fronteiras de tal cone.

No modelo de Modoni, o ângulo do cone é estimado desprezando-se os filetes do jato com velocidade inferior à parcela ξ da velocidade máxima $v_{x_{\max}}$. Isto significa que o raio equivalente do cone r_{eq} em cada distância x a partir do bico pode ser obtido fixando $v_x / v_{x_{\max}} = \xi$ na eq. (7):

$$\frac{r_{eq}}{x} = \sqrt{\frac{N}{1,33\Lambda^2} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi}} - 1 \right)} \quad (8)$$

com a área da seção transversal do cone de jato igual a:

$$\frac{a_{eq}}{x^2} = \frac{\pi N}{1,33\Lambda^2} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi}} - 1 \right) \quad (8')$$

Como simplificação, admite-se que, para um determinado valor de x , a velocidade v_x dos filetes do jato é constante e igual ao valor médio equivalente v_{eq} , assim calculado⁵:

$$v_{eq} = \frac{\int_{r=0}^{r_{eq}} 2\pi v_x r dr}{\pi r_{eq}^2} = \frac{2\Lambda}{\sqrt{N}} \frac{d_0}{x} v_0 C \quad (9)$$

onde:

$$C = \frac{1}{\left(\frac{r_{eq}}{x} \right)^2} \int_0^{\frac{r_{eq}}{x}} \frac{c}{\left(1 + \frac{c^2}{\kappa' N} \right)^2} dc = \frac{\sqrt{\xi}}{2} \quad (10)$$

⁵ A partir da eq. (9), as velocidades correspondem ao seu valor médio na direção do fluxo (eixo x), dispensando-se, por simplicidade, a notação completa (por exemplo: $v_{x_0} = v_0$).

Note-se que todos os parâmetros relevantes (r_{eq} , a_{eq} , v_{eq}) dependem da viscosidade cinemática turbulenta relativa N do fluido jateado. Porém, N é muito difícil de ser medido, uma vez que não é função apenas das propriedades do fluido, mas também das características de fluxo do jato (ver *Apêndice*).

Devido à falta de dados relativos à viscosidade turbulenta em suspensões, admite-se que a relação N entre as viscosidades cinemáticas turbulentas ε da calda e da água seja independente da velocidade do jato e do diâmetro do bico, e igual à relação entre as viscosidades cinemáticas laminares ν .

$$N = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_w} = \frac{\nu_f}{\nu_w} \quad (11)$$

A simplificação introduzida na eq. (11) poderá ser futuramente removida com a realização de ensaios específicos.

Raffle e Greenwood (1961) *apud* Bell (1993) mediram a viscosidade laminar aparente μ_f da calda de cimento em função da relação água/cimento em peso W (*fig. 3.4*).

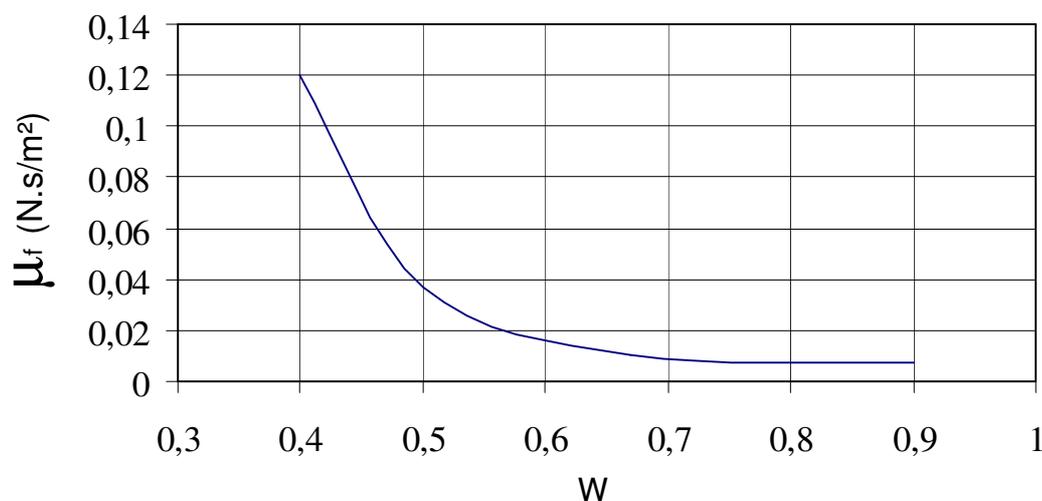


Figura 3.4 – Viscosidade aparente das caldas de cimento (Raffle e Greenwood, 1961 *apud* Bell, 1993)

Considerando-se dados publicados por Chupin *et al.* (2003), é possível correlacionar a viscosidade cinemática relativa N da calda e a sua relação água/cimento para os valores de W usualmente utilizados no *jet grouting* (tab. 3.1).

Tabela 3.1 – Densidade, viscosidade laminar aparente e viscosidade cinemática relativa de caldas com relações água/cimento típicas do *jet grouting* (Raffle e Greenwood, 1961 *apud* Bell, 1993; Chupin *et al.*, 2003)

W	ρ_f (kN/m ³)	μ_f (Pa.s)	N
0,8	16,11	0,00864	5,4
0,9	15,61	0,00782	5,0
1,0	15,18	0,00700	4,6
1,1	14,82	0,00618	4,2
1,2	14,50	0,00536	3,7

Uma vez arbitrariamente escolhido o valor de ξ , a evolução das características geométricas e mecânicas do jato submerso equivalente pode ser descrita através das eq. (8), (9) e (10) como funções da viscosidade cinemática relativa N e dos parâmetros de jateamento (d_0 , v_0). A título de exemplo, na *fig. 3.5* mostra-se a variação do raio e da velocidade equivalente de jatos d'água ($N = 1$) e de calda com relação água/cimento igual a 1 ($N = 4,6$) após a eliminação dos filetes fluidos cuja velocidade v_x é menor do que a metade do valor máximo $v_{x_{\max}}$ ($\xi = 0,5$).

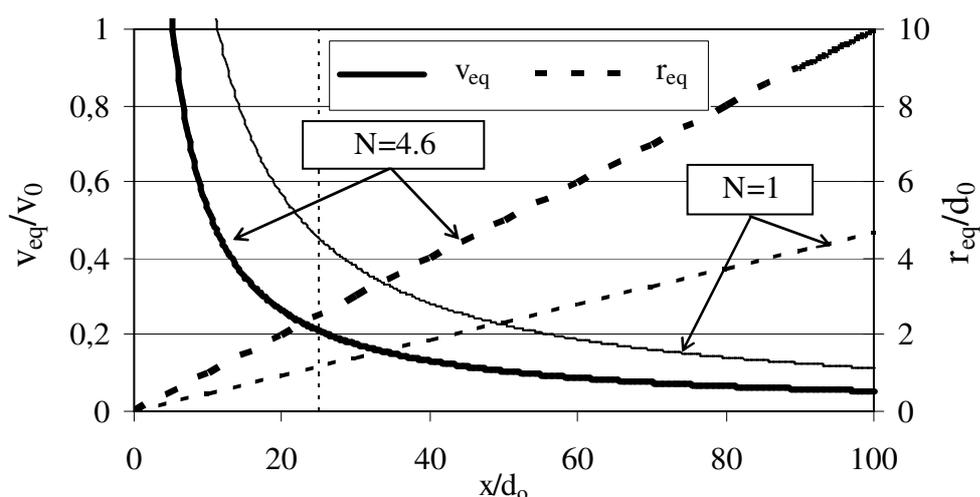


Figura 3.5 – Ao longo do eixo longitudinal do jato, variação da velocidade e do raio equivalentes para $\xi = 0,5$ e $\Lambda = 16$ (Modoni *et al.*, 2006)

Podem-se observar algumas das características mais importantes dos jatos submersos: com o aumento da viscosidade cinemática do fluido jateado, maior é a dispersão (“abertura”) do jato e mais acentuada é a redução da sua velocidade equivalente⁶.

3.3 INTERAÇÃO JATO-SOLO

3.3.1 Princípios

O modelo de Modoni propõe a distinção dos fenômenos que dão origem à coluna de acordo com a granulometria do solo que está sendo tratado (*fig. 3.6*).

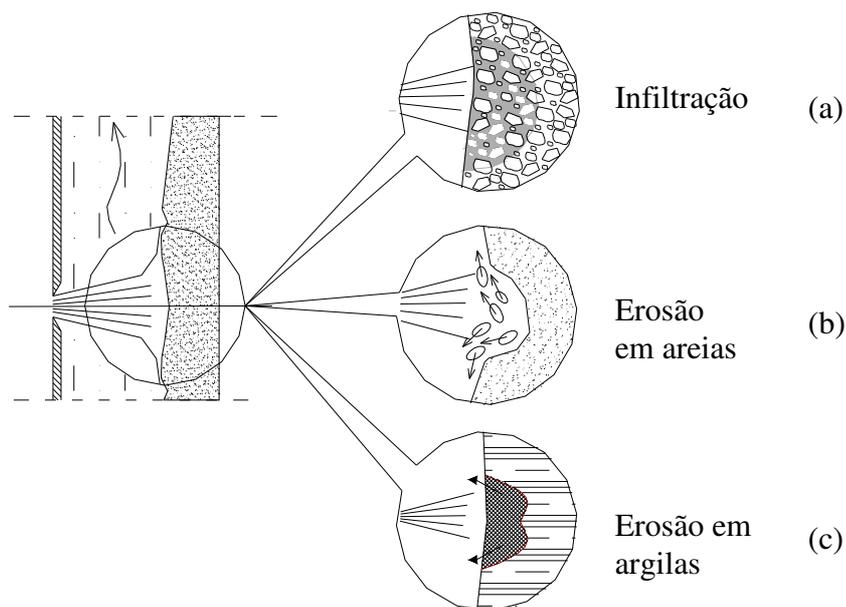


Figura 3.6 – Esquema dos modos de interação jato-solo (Modoni *et al.*, 2006)

No caso de solo pedregulhoso (*fig. 3.6a*), toda a calda jateada consegue penetrar entre os poros do terreno, percolando, aproximadamente, na direção radial, sem

⁶ Este princípio foi utilizado no desenvolvimento dos sistemas de *jet grouting*. De fato, com o sistema trifluido aproveita-se a maior eficiência do jato d’água em desagregar o solo para a obtenção de colunas de maior diâmetro.

significativo deslocamento dos grãos do solo (Miki, 1985; Croce e Flora, 2000). Este fenômeno é modelado como um problema de infiltração, e a propriedade relevante do solo é a sua permeabilidade em relação à calda de cimento⁷.

Para solos de granulometria mais fina, como as areias e as argilas, cujos poros intersticiais são muito menores, a resistência à percolação da calda aumenta consideravelmente. Assim, os filetes do jato tendem a retornar e a deslocar as partículas do solo, as quais podem ser arrastadas com a calda até a superfície do terreno (Shibazaki, 1991; Covil e Skinner, 1994). Trata-se, essencialmente, de um fenômeno erosivo, o qual, a rigor, deve ser tratado levando-se em conta a natureza particulada do solo e a interação de cada partícula com a massa fluida.

Por simplificação, o modelo de Modoni esquematiza o solo como um meio contínuo. Entretanto, o processo de erosão apresenta características distintas em função de o solo ser arenoso ou argiloso.

A experiência mostra que as argilas (não necessariamente consistentes) possuem maior resistência à erosão do que as areias. De fato, em comparação a resultados de tratamento observados em solos arenosos, os diâmetros de coluna obtidos em solos argilosos são geralmente menores. Além disso, observações experimentais feitas por Covil e Skinner (1994) indicam que, em solos argilosos, a coluna é quase totalmente formada por substituição, isto é, a maior parte do solo atingida pelo jato é arrastada com o refluxo até a boca do furo e substituída pela calda de cimento. Por outro lado, para os solos arenosos, a coluna se forma, principalmente, pela mistura da calda com o terreno.

Assim, o modelo de Modoni propõe diferentes mecanismos de erosão para solos arenosos e argilosos.

⁷ O *jet grouting* gera fenômenos de infiltração em terrenos formados por pedregulhos sem nenhuma matriz arenosa. Para estes solos, a técnica de tratamento mais adequada deve ser selecionada comparando o resultado (e o custo) do *jet grouting* àquele dos métodos tradicionais de injeção. Além disso, a escassez de dados experimentais relativos a tratamentos em pedregulhos “limpos” impossibilita a verificação das relações propostas por Modoni *et al.* (2006). Sendo assim, esta tese de doutorado não apresenta o modelo teórico desenvolvido para este tipo de solo.

Para os solos arenosos (*fig. 3.6b*), admite-se que a calda jateada penetre nos poros do terreno por percolação ao longo de uma distância limitada a partir da parede do furo, produzindo um aumento significativo das pressões neutras e uma correspondente redução das forças de contato entre os grãos. As partículas do solo são envolvidas pelo fluido jateado e arrastadas de sua posição inicial⁸. Este fenômeno é modelado através da contínua comparação entre a pressão equivalente do jato (decrecente com o avanço da calda no interior do terreno) e a respectiva resistência do solo, proporcional à sua resistência ao cisalhamento drenado.

No caso dos solos argilosos (*fig. 3.6c*), a dimensão dos poros intersticiais não permite que os filetes do jato penetrem no terreno por percolação. A análise, neste caso, é efetuada em termos de tensões totais, e o processo erosivo é descrito como uma sequência de rupturas não-drenadas⁹.

3.3.2 Ação do jato

O modelo teórico de Modoni traduz a ação erosiva do jateamento numa pressão de impacto equivalente ψ , proporcional à força que exerce um jato de fluido incompressível quando atinge ortogonalmente uma placa plana¹⁰:

$$\psi = \Omega_1 \frac{\gamma_f}{g} v_f^2 \quad (12)$$

onde Ω_1 é um parâmetro adimensional que leva em conta as dissipações de energia¹¹, γ_f é o peso específico da calda de cimento, g é a aceleração da gravidade e v_f é a

⁸ Ensaios de laboratório realizados por Bergschneider e Walz (2003) e por Stein e Grabe (2003) constataram a ação de arraste provocada por fluxos através de areias submersas.

⁹ Admite-se que a ação do jato produza um colapso global, semelhante ao mecanismo de ruptura gerado por uma força distribuída sobre uma fundação direta circular.

¹⁰ Tal força (denominada *força de inércia*) é o resultado da variação da quantidade de movimento do jato no momento em que este atinge o solo.

¹¹ O jato, ao sair pelo bico, encontra a calda de cimento anteriormente jateada misturada às partículas do solo erodido. Assim, o jato submerso perde uma parte de sua energia antes de impactar contra o terreno.

velocidade do jato nos pontos de impacto com o terreno ($v_f = v_{eq}$, calculada com as eq. 9 e 10).

3.3.3 Resistência do solo arenoso ao jato

Admite-se que a resistência de um solo arenoso à ação erosiva do jato seja proporcional à sua resistência ao cisalhamento drenado no plano horizontal, independentemente da direção em que for executada a coluna. Pode ser expressa em termos de tensões efetivas através da seguinte relação:

$$\psi_s = \Omega_2 [c' + \sigma_v' \operatorname{tg} \varphi'] \quad (13)$$

onde c' e φ' são, respectivamente, o intercepto de coesão e o ângulo de atrito efetivos do solo, σ_v' é a tensão vertical efetiva e Ω_2 é um parâmetro adimensional de calibração.

A sobrepressão intersticial provocada pelo jateamento é considerada igual ao máximo valor da pressão hidrodinâmica que um jato circular exerce quando atinge ortogonalmente uma placa plana (fig. 3.7).

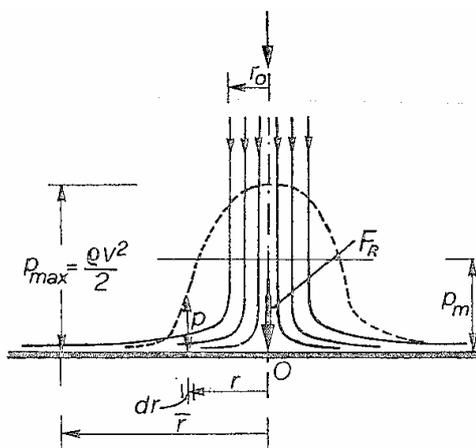


Figura 3.7 – Andamento das pressões (em tracejado) que atuam sobre uma placa plana atingida ortogonalmente por um jato cilíndrico (apud Ghetti, 1998)

Admite-se, ainda, que a pressão neutra gerada pelo impacto do jato seja muito maior do que a pré-existente, resultante da eventual presença de lençol freático ou de rede de percolação¹². Assim, a tensão vertical efetiva na eq. (13) resulta:

$$\sigma_v' = \sigma_v - \frac{\gamma_f}{2g} v_f^2 \quad (14)$$

3.3.4 Resistência do solo argiloso ao jato

A resistência de um solo argiloso à ação erosiva do jato é proporcional à sua *resistência ao cisalhamento não-drenado*. Pode ser expressa em termos de tensões totais através da seguinte relação:

$$\psi_c = \Omega_3 s_u \quad (15)$$

onde Ω_3 é um parâmetro adimensional de calibração.

3.4 DIÂMETRO TEÓRICO DAS COLUNAS

Através do modelo de Modoni é possível obter o diâmetro teórico das colunas de *jet grouting* executadas com o sistema monofluido. Para isto, a formação do corpo consolidado pode ser tratada como um *problema de frente erosiva em deslocamento, integrando-se a velocidade de avanço da calda (no interior do terreno) ao longo do tempo de atuação do jato*.

Em função da resistência ao cisalhamento do solo, seja este arenoso ou argiloso, define-se uma velocidade limite v_L como o valor mínimo da velocidade do jato capaz

¹² Esta hipótese simplificadora é verossímil ao menos no início do processo de formação da coluna, quando a velocidade equivalente do jato é bastante elevada e a sua pressão hidrodinâmica, ao primeiro impacto com o terreno (supondo-o a 5 cm do bico), fica entre 3100 e 12400 kPa ($200 \leq v_0 \leq 400$ m/s).

de produzir erosão. Igualando-se a pressão equivalente do jato ψ (eq. 12) às respectivas resistências dos solos arenosos (eq. 13 e 14) e argilosos (eq. 15), tem-se:

Para solos arenosos:

$$v_L = \sqrt{\frac{\Omega_s g}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_v \operatorname{tg}(\varphi')}{1 + \Omega_s \frac{\operatorname{tg}(\varphi')}{2}}} \quad (16)$$

Para solos argilosos:

$$v_L = \sqrt{\frac{\Omega_c g}{\gamma_f} s_u} \quad (17)$$

onde $\Omega_s (= \Omega_2/\Omega_1)$ e $\Omega_c (= \Omega_3/\Omega_1)$ são parâmetros adimensionais de calibração, que reúnem os aspectos mecânicos e geométricos desconhecidos do jato e do solo.

A velocidade da frente erosiva V_c está estreitamente relacionada à velocidade limite v_L e à velocidade do fluido v_f nos pontos de impacto com o terreno. Pode ser expressa pela seguinte relação:

$$V_c = \theta \frac{v_f - v_L}{v_L} \quad (18)$$

onde θ é um parâmetro de calibração, função do tipo de solo.

A partir daí, o processo de erosão radial pode ser simulado integrando-se a velocidade da frente de avanço V_c ao longo do tempo de atuação do jato.

Ressalta-se que particular atenção deve ser dedicada à definição do tempo de integração, uma vez que a frente de impacto do jato avança continuamente. O modelo de Modoni estabelece um tempo de referência t^* subdividindo a altura total da coluna em segmentos de espessura Δs , correspondentes ao passo de extração das hastes durante o jateamento.

$$t^* = \frac{M \Delta s}{v_s} \frac{2(r_{eq} / x)}{2\pi} \quad (19)$$

onde M é o número de bicos, v_s é a velocidade de extração das hastes e $\Delta s = 5$ cm.

Sendo a relação (r_{eq}/x) uma constante (eq. 8), quanto maior for o número de bicos e menor for a velocidade de extração das hastes durante o jateamento, maior será o tempo de atuação do jato.

4. PROPOSTA DE MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO PARA A PREVISÃO DO DIÂMETRO DAS COLUNAS (SISTEMA MONOFLUIDO)

4.1 PRINCÍPIOS

As colunas de *jet grouting* são o resultado da interação entre o jato e o solo. Assim, este trabalho de doutorado busca atingir o objetivo proposto equacionando a seguinte correlação:

$$D = f(S, J) \quad (20)$$

onde:

D é o diâmetro da coluna;

S é o parâmetro representante da ação (resistente) do solo; e

J é o parâmetro representante da ação do jato.

No passado, alguns autores buscaram compreender qual é o efeito conjunto dos parâmetros de tratamento, de modo a traduzi-lo numa única variável J . O primeiro deles foi Tornaghi (1989), que sugeriu, como parâmetro representante da ação do jato, a energia medida na bomba por unidade de comprimento da coluna:

$$E_p = \frac{p_0 Q}{v_s} \quad (21)$$

onde p_0 é a pressão de bombeamento, Q é a vazão da calda de cimento e v_s é a velocidade de extração das hastes.

A escolha de E_p , entretanto, não parecia satisfatória, uma vez que desconsiderava as perdas de carga concentradas e distribuídas ao longo do sistema de bombeamento; além disso, era expressa em função do parâmetro p_0 , que de modo geral varia muito pouco na prática (entre 40 e 55 MPa, segundo Croce *et al.*, 2004).

Observando que a eficácia do tratamento de *jet grouting* está ligada essencialmente à alta velocidade do fluido jateado, Croce e Flora (2000) propuseram, como variável do jato, a energia medida nos bicos por unidade de comprimento da coluna:

$$E_n = \frac{m v_0^2}{2 L} \quad (22)$$

onde m é a massa da calda jateada, v_0 é a velocidade da calda nos bicos, e L é o comprimento da coluna.

Sendo $m = \rho_f Q t$, onde ρ_f é a densidade da calda e t é o tempo de jateamento, e expressando v_0 como a razão entre a vazão Q da calda e a seção transversal total dos bicos, segue que:

$$E_n = \frac{8 \rho_f Q^3}{\pi^2 M^2 d_0^4 v_s} \quad (23)$$

onde M é o número de bicos e d_0 é o diâmetro dos bicos.

Além disso, a partir dos parâmetros utilizados no tratamento monofluido de quatro diferentes tipos de solo, Croce e Flora relacionaram a energia do jato nos bicos ao diâmetro médio das colunas obtidas em campo (*fig. 4.1*).

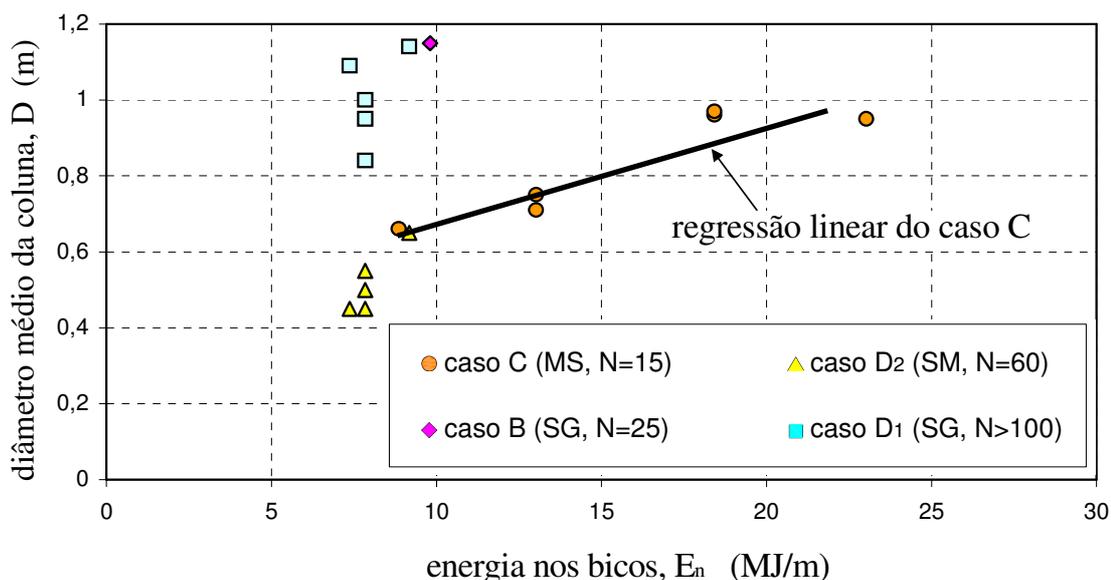


Figura 4.1 – Correlação entre a energia do jato (medida nos bicos) e o diâmetro médio das colunas obtidas pelo tratamento monofluido de diferentes tipos de solo: pedregulho arenoso (casos B e D₁), areia siltosa piroclástica (caso C) e silte arenoso (caso D₂) (Croce e Flora, 2000)

Foram analisados os seguintes tipos de solo, identificados pela sua granulometria e número N de golpes do ensaio SPT:

- ✓ Caso B: pedregulho arenoso de $N = 25$;
- ✓ Caso C: areia siltosa piroclástica de $N = 15$;
- ✓ Caso D₁: pedregulho arenoso de $N > 100$; e
- ✓ Caso D₂: silte arenoso de $N = 60$.

A energia relativa ao tratamento de todos os tipos de solo variou muito pouco (entre 7 e 10 MJ/m), com a exceção do caso C, onde foram utilizadas quatro combinações de parâmetros de tratamento que aplicaram, à areia siltosa piroclástica, energias muito diferentes entre si (de 8 a 23 MJ/m).

Embora tratados com energias semelhantes, o diâmetro médio obtido foi maior nos pedregulhos arenosos (casos B e D₁) do que nos siltes arenosos (caso D₂). Na busca de um método de previsão do resultado dimensional dos tratamentos, tal fato ressalta

a importância de se conhecer o papel desempenhado pelo solo na formação das colunas de *jet grouting*.

Para o caso C, a interpolação dos dados de campo sugere que o diâmetro médio da coluna varie linearmente com a energia do tratamento. Evidentemente, esta correlação é restrita ao terreno em análise, ou seja, uma areia siltosa piroclástica de $N = 15$. Além disso, a própria escolha da energia como parâmetro representante do jato não pode ser corroborada a partir de tão poucos dados experimentais. De qualquer forma, *a idéia de se conseguir correlações simples como esta e válidas para todos os tipos de solo foi o ponto de partida desta tese de doutorado.*

4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS RELEVANTES

Conforme o modelo teórico de Modoni, o raio da coluna, isto é, o avanço do fluido jateado no interior do terreno, é uma função do tempo de atuação do jato. Para grandes valores de t^* (valores estes que, por razões econômicas, são inviáveis na prática¹³), a velocidade equivalente do jato (eq. 9) iguala a velocidade limite¹⁴. Define-se assim, ao menos teoricamente, o máximo raio possível para uma coluna de *jet grouting*:

$$\text{➤ Para solos arenosos: } R_{\max} = \frac{2 \Lambda v_0 C d_0}{\sqrt{\frac{\Omega_s g N}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_v \operatorname{tg}(\varphi')}{1 + \Omega_s [\operatorname{tg}(\varphi')/2]}}} \quad (24)$$

onde Λ e Ω_s são parâmetros de calibração, C é um fator de integração ($=\sqrt{\xi}/2$), g é a aceleração da gravidade, N e γ_f são, respectivamente, a viscosidade cinemática turbulenta relativa e o peso específico da calda de cimento, c' e φ' são parâmetros de

¹³ Na prática, t^* pode ser aumentado reduzindo-se a velocidade de extração das hastes durante o jateamento ou aumentando-se o número de bicos (eq. 9); entretanto, o alto volume de calda jateada correspondente ao aumento dos valores de t^* pode tornar o tratamento de *jet grouting* economicamente inviável.

¹⁴ A velocidade limite é função dos parâmetros de resistência do solo (eq. 16 e 17).

resistência do solo (intercepto de coesão e ângulo de atrito efetivo, respectivamente) e σ_v é a tensão vertical total na profundidade de interesse do terreno.

➤ Para solos argilosos:
$$R_{\max} = \frac{2\Lambda C d_0 v_0}{\sqrt{\frac{\Omega_c g N s_u}{\gamma_f}}} \quad (25)$$

onde s_u é a resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso.

Os tempos de jateamento adotados na prática são, portanto, proporcionais à relação entre o raio da coluna R efetivamente obtido e o raio máximo teórico:

$$t^* \sim \frac{R}{R_{\max}} \quad (26)$$

Em outras palavras: o diâmetro das colunas de *jet grouting* pode ser correlacionado:

- a) ao máximo raio R_{\max} teoricamente obtido, e
- b) ao tempo de referência t^* , correspondente ao tempo de atuação efetiva do jato em cada porção do terreno.

Com base no raio máximo (eq. 24 e 25), é possível admitir que o parâmetro S da eq. (20) seja uma função da resistência ao cisalhamento do terreno (em condições drenadas para os solos arenosos e não-drenadas para os solos argilosos).

Vale ressaltar que o modelo de Modoni compara as propriedades do terreno natural (“intacto”) à ação erosiva do jato. Assim, mesmo quando a resistência ao cisalhamento do solo na sua situação amolgada resultar inferior àquela do estado *in situ*¹⁵, as características mecânicas a serem consideradas se referem àquelas apresentadas pelo terreno na sua condição indeformada.

¹⁵ Como acontece em areias compactas e argilas sobreadensadas ou sensíveis.

Para os solos arenosos, a resistência ao cisalhamento drenado s é avaliada no plano horizontal, independentemente da direção em que a coluna for executada, e expressa pelo critério de resistência de Mohr-Coulomb ($s = c' + \sigma_v' \operatorname{tg}\phi'$). Em particular, para o cálculo da tensão vertical efetiva σ_v' , o modelo de Modoni despreza as pressões neutras decorrentes da eventual presença de lençol freático ou rede de percolação. Desta forma, considerando-se apenas a tensão geostática:

$$\sigma_v' = \sigma_v = \gamma_n \cdot z$$

onde γ_n é o peso específico natural do solo e z é a profundidade do ponto de interesse a partir da superfície do terreno.

De acordo com a composição granulométrica dos solos arenosos, o valor de c' pode assumir diferentes significados. Para os solos areno-siltosos, areno-argilosos ou arenosos com alguma cimentação entre os grãos, trata-se da coesão efetiva e indica a resistência que o corpo de prova apresenta mesmo quando a tensão confinante for nula. Por outro lado, para as areias puras, submetidas a tensões confinantes relativamente altas, c' consiste no coeficiente linear da reta que se ajusta à envoltória curvilínea de Mohr-Coulomb.

A extração de amostras indeformadas em areias puras para a realização de ensaios de laboratório é impraticável na maioria dos casos. De qualquer forma, a resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos pode ser inferida, em geral, mediante resultados de ensaios de campo (CPT, SPT, pressiômetro).

Quanto aos solos argilosos, a resistência ao cisalhamento não-drenado s_u pode ser expressa de maneiras diversas em função do grau de saturação do terreno.

As argilas não-saturadas, quando submetidas a ensaios triaxiais do tipo UU, apresentam um acréscimo (até um determinado limite) das tensões efetivas com o aumento da tensão confinante. Neste caso, em termos de tensões totais:

$$s_u = c_u + \sigma_v \operatorname{tg} \varphi_u$$

onde c_u é a coesão não-drenada e φ_u é o ângulo de atrito não-drenado.

Para as argilas saturadas, ao contrário, a resistência ao cisalhamento não-drenado independe da tensão normal aplicada. O ângulo de atrito não-drenado φ_u é nulo e:

$$s_u = c_u$$

De modo geral, pode-se estimar a resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos a partir de ensaios *in situ* (*vane test*, CPT, pressiômetro) ou de laboratório (compressão triaxial do tipo CU, com adensamento do corpo de prova sob tensões de campo).

Por outro lado, o parâmetro J , capaz de representar por si só toda a ação do jato, pode ser definido com base nos mesmos parâmetros R_{max} e t^* .

Identificadas as constantes presentes nas fórmulas de R_{max} e t^* , é possível obter as seguintes relações de proporcionalidade:

$$\text{➤ Para solos arenosos: } R_{max} = \frac{2 \Lambda v_0 C d_0}{\sqrt{\frac{\Omega_s g N}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_v \operatorname{tg}(\varphi')}{1 + \Omega_s [\operatorname{tg}(\varphi')/2]}}} \propto \frac{v_0 d_0 \sqrt{\gamma_f}}{\sqrt{N}} \quad (27)$$

$$\text{➤ Para solos argilosos: } R_{max} = \frac{2 \Lambda C d_0 v_0}{\sqrt{\frac{\Omega_c g N s_u}{\gamma_f}}} \propto \frac{v_0 d_0 \sqrt{\gamma_f}}{\sqrt{N}} \quad (28)$$

$$t^* = \frac{M \Delta s}{v_s} \frac{2(r_{eq}/x)}{2\pi} \propto \frac{M \sqrt{N}}{v_s}, \text{ pois } \frac{r_{eq}}{x} = \sqrt{\frac{N}{1,33 \Lambda^2} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi}} - 1 \right)} \propto \sqrt{N} \quad (29)$$

Como o raio da coluna é proporcional ao produto entre R_{max} e t^* (eq. 26), *define-se o parâmetro J como o produto das relações de proporcionalidade*. Entretanto, como a viscosidade cinemática turbulenta relativa N incide tanto no valor de R_{max} quanto no cálculo de t^* , a sua influência sobre o parâmetro do jato não é clara (basta compará-la à evidente relação direta que existe entre J e a velocidade inicial do jato, ou entre J e o diâmetro do bico). Desta forma, acrescenta-se um expoente χ num dos termos do produto (no caso, relativo ao tempo de referência). Assim:

$$J = \frac{v_0 d_0 \sqrt{\gamma_f}}{\sqrt{N}} \left(\frac{M \sqrt{N}}{v_s} \right)^\chi = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^\chi N^{0,5*(\chi-1)} \sqrt{\gamma_f} \quad (30)$$

O valor do expoente χ é determinado através de simulações numéricas buscando o melhor ajuste entre o diâmetro obtido com as relações analíticas do modelo de Modoni (*item 3.4*) e o parâmetro J .

Observe-se que a expressão matemática do parâmetro J é a mesma, seja o solo arenoso ou argiloso. A diferença está justamente no valor do expoente χ , definido em função do tipo de solo no *item 4.3*.

Em resumo:

➤ Para solos arenosos: $D = f(R_{max}, t^*) = g[c' + \sigma_v \text{tg}(\phi'), J_s]$ (31)

➤ Para solos argilosos: $D = f(R_{max}, t^*) = g[s_u, J_c]$ (32)

onde J_s e J_c são os parâmetros representantes da ação do jato para tratamentos em solos arenosos e argilosos, respectivamente.

4.3 PARÂMETRO J : DEFINIÇÃO DO EXPOENTE χ

Para a definição do expoente que incide sobre o parâmetro do jato, antes de tudo é necessário limitar o campo de variação dos parâmetros de tratamento de acordo com a prática (tab. 4.1).

Tabela 4.1 – Campo típico de variação dos parâmetros de tratamento.

	d_0 (m)	v_0 (m/s)	M	v_s (m/s)	W
Min	0,002	200	1	0,002	0,8
Max	0,004	400	2	0,005	1,2

A partir de então, são atribuídos valores aos parâmetros de tratamento gerados aleatoriamente dentro do campo de variação típico de cada um deles¹⁶. Impondo-se a resistência ao cisalhamento do solo, com o modelo de Modoni é possível simular o efeito, sobre tal terreno, das várias combinações dos parâmetros de tratamento e calcular os correspondentes diâmetros de coluna. O valor do expoente χ é aquele com o qual se obtém a melhor correlação entre os diâmetros teóricos assim calculados e os respectivos parâmetros J .

Como exemplo, a *fig. 4.2* mostra as correlações obtidas para parâmetros do jato calculados com três diferentes valores de χ em tratamentos de solo argiloso com resistência não-drenada igual a 60 kPa. Observe-se como o ajuste melhora à medida que se passa de $\chi = 0,2$ para $\chi = 0,77$.

¹⁶ É adicionada uma restrição de caráter econômico, vetando toda e qualquer combinação de parâmetros que acarrete um consumo de cimento superior a 1000 kg por metro linear de coluna.

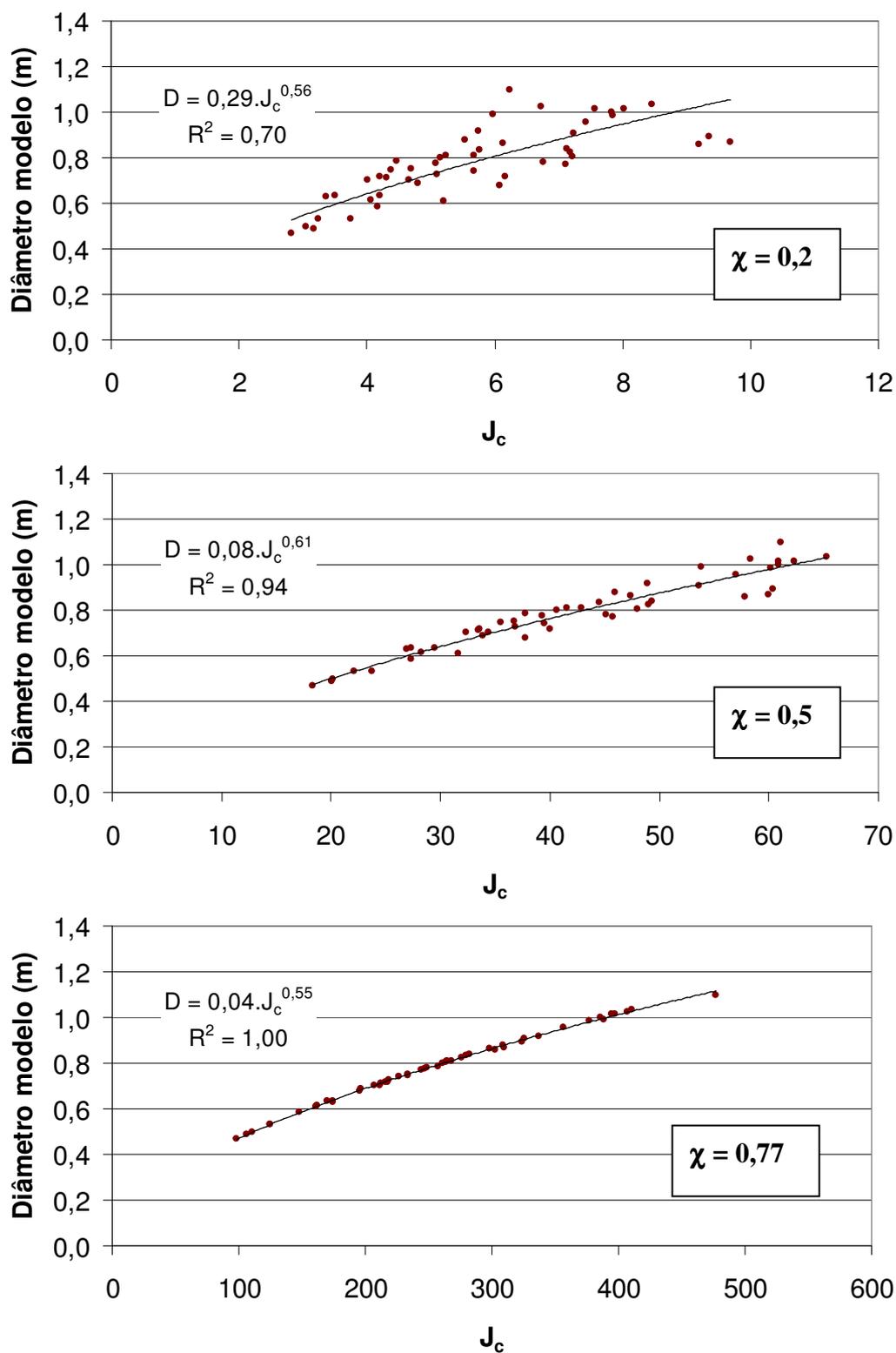


Figura 4.2 – Para tratamentos em solo argiloso de resistência ao cisalhamento não-drenado igual a 60 kPa, correlações entre os diâmetros obtidos com o modelo teórico de Modoni *et al.* (2006) e os parâmetros J_c , calculados com diferentes valores do expoente χ .

Apresenta-se, na *fig. 4.3*, o melhor ajuste das correlações entre o diâmetro do modelo e o parâmetro J para solos de diferentes características mecânicas¹⁷.

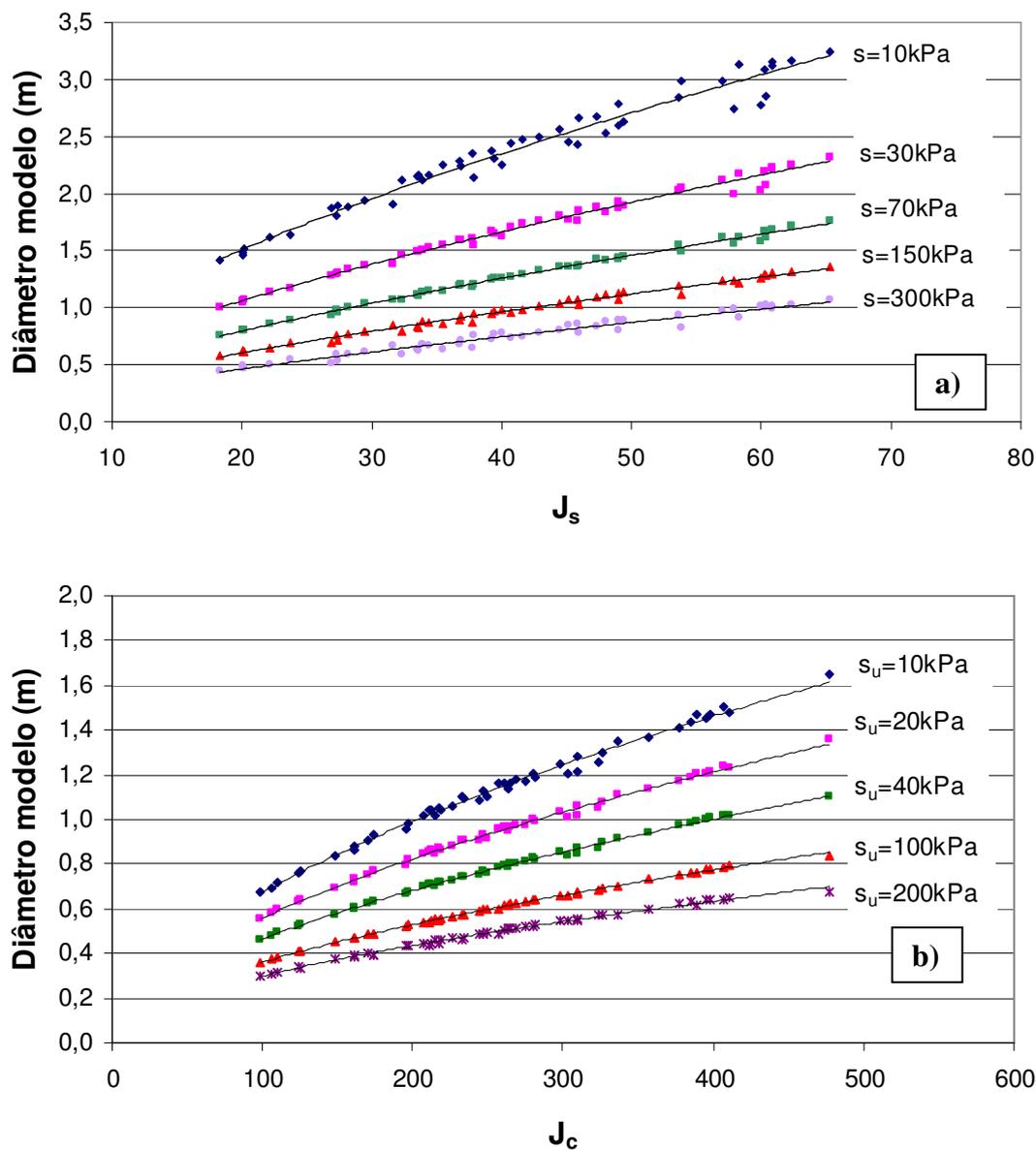


Figura 4.3 – Melhor ajuste das correlações entre o diâmetro obtido através do modelo de Modoni *et al.* (2006) e o parâmetro J para diferentes valores *a)* da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e *b)* da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.

¹⁷ As simulações realizadas foram em número maior do que aquelas apresentadas na *fig. 4.3*. Foram analisados valores intermediários de s e s_u com o intuito de tornar mais preciso o ajuste das relações de dependência.

O coeficiente de determinação, ou R^2 , é um valor entre 0 e 1 que revela o grau de correspondência entre os valores estimados para a linha de tendência e os dados reais. Sendo aqueles representados por cada linha contínua da fig. 4.3 e estes pelos diâmetros obtidos a partir do modelo de Modoni, o melhor ajuste é obtido encontrando-se o expoente χ que corresponda aos valores de R^2 mais próximos da unidade para cada um dos dois tipos de solo (tab. 4.2).

Tabela 4.2 – Expoente χ , correspondente ao melhor ajuste para solos arenosos e argilosos.

Tipo de solo	χ
Arenoso	0,50
Argiloso	0,77

Conhecidos os expoentes χ , a partir da eq. (30) são definidas as expressões do parâmetro J que melhor representam a ação do jato segundo o modelo de Modoni:

➤ Para solos arenosos:
$$J_s = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,50} N^{-0,25} \sqrt{\gamma_f} \quad (33)$$

➤ Para solos argilosos:
$$J_c = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} N^{-0,12} \sqrt{\gamma_f} \quad (34)$$

A viscosidade cinemática turbulenta relativa N e o peso específico γ_f são funções da relação água/cimento W da calda jateada. Assim, com base na eq. 30 é introduzida uma variável F , sendo:

$$F = N^{0,5*(\chi-1)} \sqrt{\gamma_f}$$

A variação de F com a relação água/cimento da calda é mostrada na fig. 4.4.

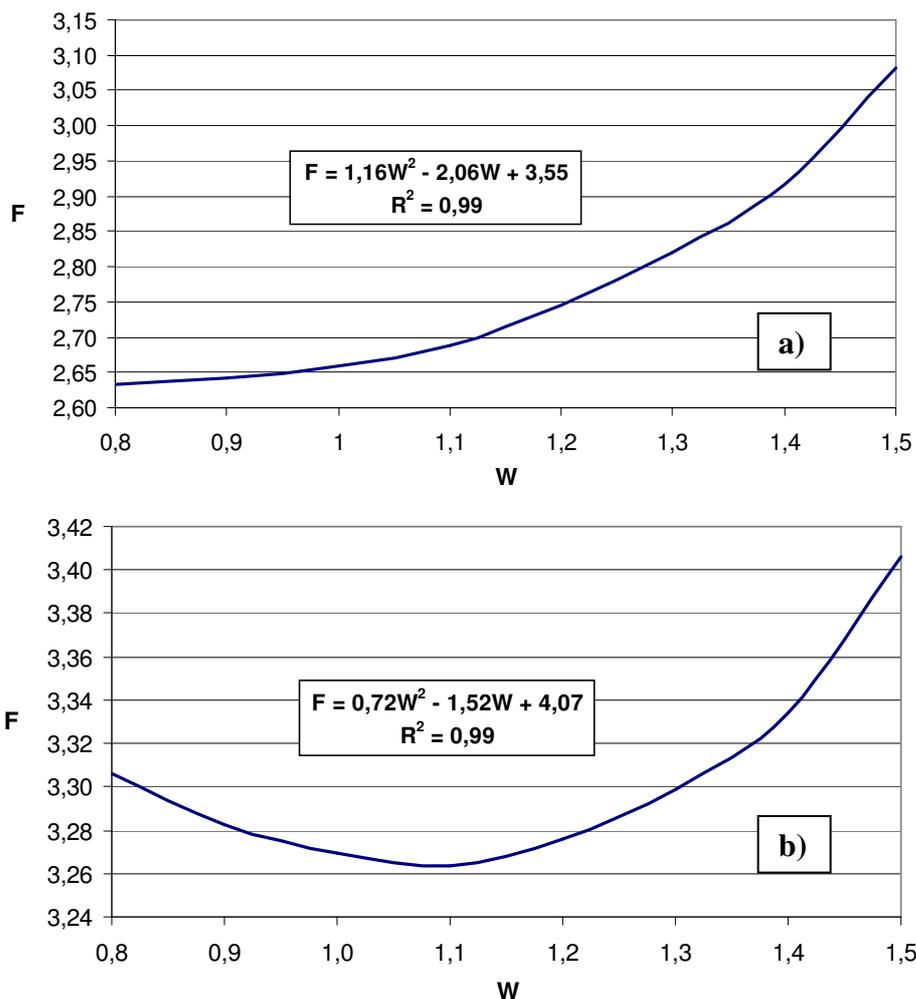


Figura 4.4 – Correlações entre a relação água/cimento W da calda e a variável F , calculada com a) $\chi = 0,50$ (solos arenosos) e b) $\chi = 0,77$ (solos argilosos).

Desta forma, obtém-se o valor de J a partir de parâmetros de tratamento imediatamente reconhecíveis:

➤ Para solos arenosos:
$$J_s = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,50} (1,16 W^2 - 2,06 W + 3,55) \quad (35)$$

➤ Para solos argilosos:
$$J_c = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07) \quad (36)$$

O parâmetro J não é um adimensional, nem uma grandeza física definível a partir de sua dimensão. Para a obtenção das relações de dependência (item 4.4), o cálculo do

parâmetro do jato será realizado com os **parâmetros de tratamento em unidades do Sistema Internacional**. Assim, a unidade do parâmetro J_s será $m^{1,5} s^{-0,5}$, enquanto a unidade do parâmetro J_c será $m^{1,23} s^{-0,23}$.

4.4 OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA CADA TIPO DE SOLO

Uma vez definido o parâmetro representante da ação conjunta de todos os parâmetros de tratamento (parâmetro J) e a característica do solo que incide no processo de formação da coluna (resistência ao cisalhamento), é necessário equacionar a interação entre essas grandezas e o diâmetro teórico dos corpos consolidados.

A *fig. 4.5* mostra as correlações entre o parâmetro J e o diâmetro obtido através do modelo de Modoni para tratamentos em solos arenosos com $s = 70$ kPa e em solos argilosos com $s_u = 100$ kPa.

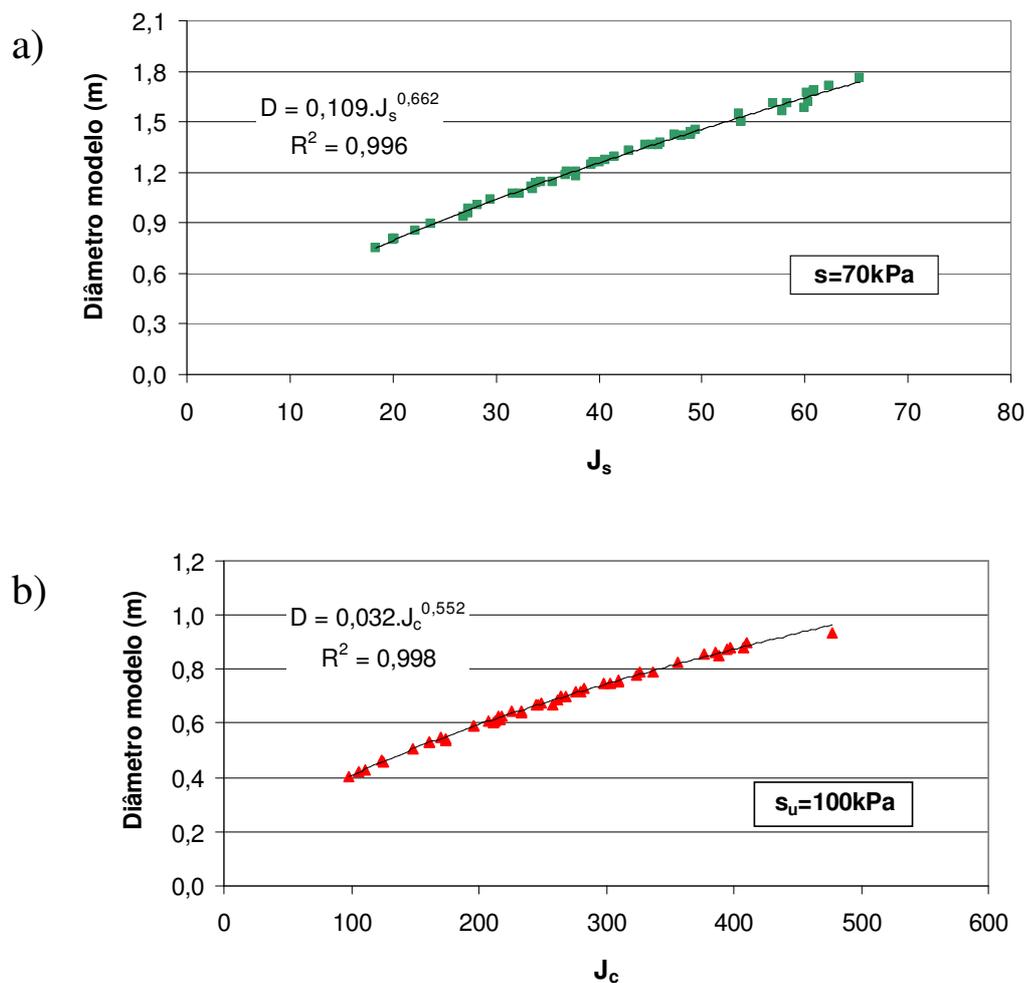


Figura 4.5 – Correlações entre o parâmetro J e o diâmetro obtido através do modelo de Modoni para tratamentos a) em solos arenosos com $s = 70$ kPa e b) em solos argilosos com $s_u = 100$ kPa.

Observa-se que a correlação entre o diâmetro teórico e o parâmetro J apresenta o andamento de uma função potência, do tipo:

$$D = SJ^\beta \quad (37)$$

onde S é função da resistência ao cisalhamento drenado (para os solos arenosos) e da resistência ao cisalhamento não-drenado (para os solos argilosos).

Funções do mesmo tipo podem ser obtidas para solos arenosos e argilosos com qualquer resistência ao cisalhamento. Para cada valor de s e s_u , a *tab. 4.3* fornece os respectivos valores do coeficiente S e do expoente β , parâmetros da eq. (37).

Tabela 4.3 – Coeficiente S e expoente β em função a) da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e b) da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.

a)	s (kPa)	S	β
	10	0,223	0,639
	30	0,152	0,649
	50	0,125	0,656
	70	0,109	0,662
	90	0,099	0,666
	110	0,091	0,670
	130	0,085	0,674
	150	0,079	0,677
	200	0,070	0,683
	300	0,058	0,694

b)	s_u (kPa)	S	β
	10	0,058	0,561
	20	0,049	0,559
	40	0,041	0,557
	60	0,037	0,555
	80	0,034	0,554
	100	0,032	0,552
	150	0,029	0,550
	200	0,027	0,548

Note-se que o expoente β varia muito pouco com as características mecânicas dos solos para as faixas de variação de s (entre 10 e 300 kPa) e de s_u (entre 10 e 200 kPa) analisadas. Assim, é adotado um único valor de β para cada um dos dois tipos de solo, correspondente à média aritmética dos valores obtidos para este expoente em terrenos de diferentes resistências, ou seja:

- Para solos arenosos: $\beta = 0,67$
- Para solos argilosos: $\beta = 0,55$

Por outro lado, as correlações entre as características mecânicas dos solos e os respectivos coeficientes S dão origem a novas funções do tipo potência (*fig. 4.6*).

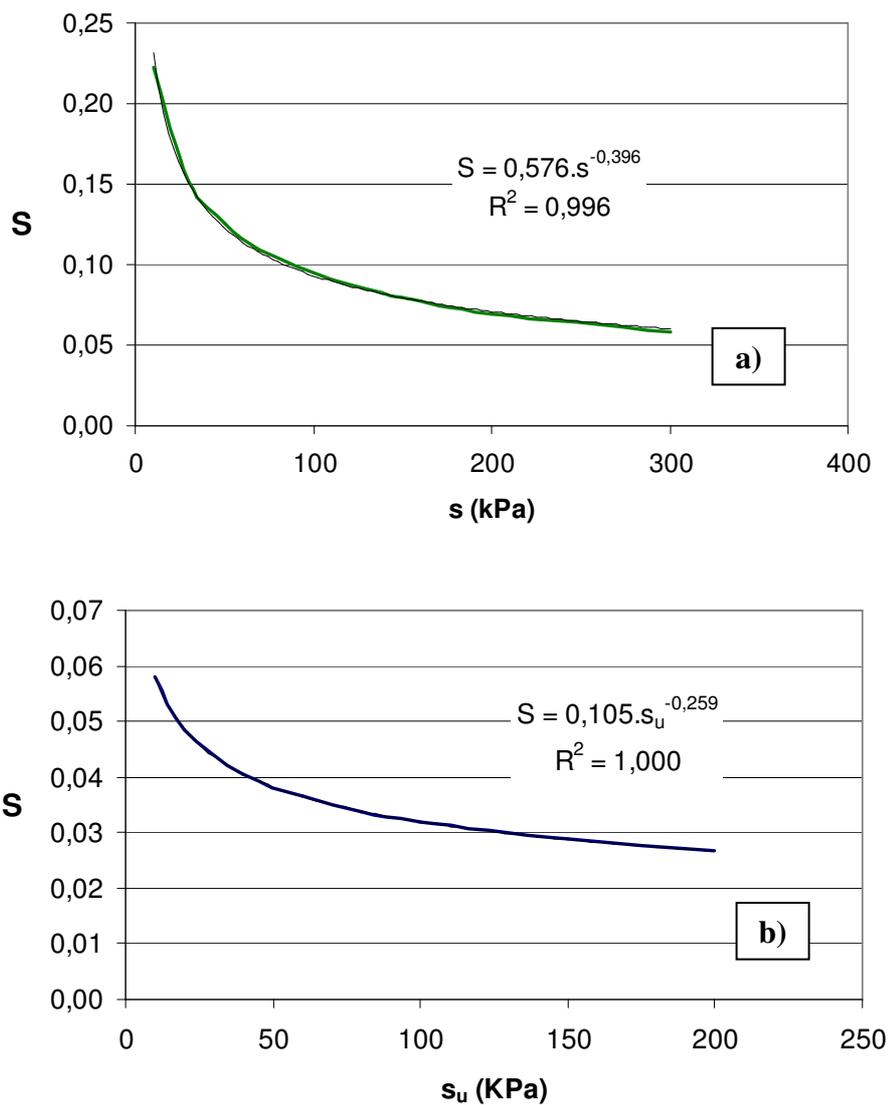


Figura 4.6 – Variação do coeficiente S em relação a) à resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e b) à resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos.

Assim:

$$D = SJ^\beta \begin{cases} \Rightarrow D = A s^\alpha J_s^\beta & \text{(solos arenosos)} & (38) \\ \Rightarrow D = A s_u^\alpha J_c^\beta & \text{(solos argilosos)} & (39) \end{cases}$$

As eq. (38) e (39) são as soluções do *método teórico simplificado* de previsão do diâmetro das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido).

Os parâmetros propostos para as equações do método teórico simplificado são apresentados na *tab. 4.4*.

Tabela 4.4 – Coeficiente A e expoentes α e β propostos para as equações do método teórico simplificado.

Tipo de solo	A	α	β
Solos arenosos	0,58	-0,40	0,67
Solos argilosos	0,11	-0,26	0,55

Com estes valores de A , α e β , a unidade do diâmetro das colunas nas eq. (38) e (39) é o **metro**, com os parâmetros J_s e J_c expressos em $m^{1,5} s^{-0,5}$ e em $m^{1,23} s^{-0,23}$, respectivamente, e a resistência ao cisalhamento do solo em **kPa**.

4.5 EQUIVALÊNCIA ENTRE OS DIÂMETROS OBTIDOS COM O MODELO DE MODONI *et al.* (2006) E AS PREVISÕES FORNECIDAS PELO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO

Deve-se atestar que o método simplificado é capaz de fornecer, como resultados, diâmetros de coluna equivalentes àqueles obtidos com a correta inter-relação das expressões analíticas propostas por Modoni *et al.* (2006). Para tanto, foram simulados cerca de 280 jateamentos, associados a diferentes combinações de

parâmetros de tratamento¹⁸, em solos arenosos e argilosos com diferentes características mecânicas. O diâmetro da coluna a ser obtido em cada jateamento foi calculado a partir das grandezas do modelo de Modoni (fig. 4.7) e através das equações do método teórico simplificado.

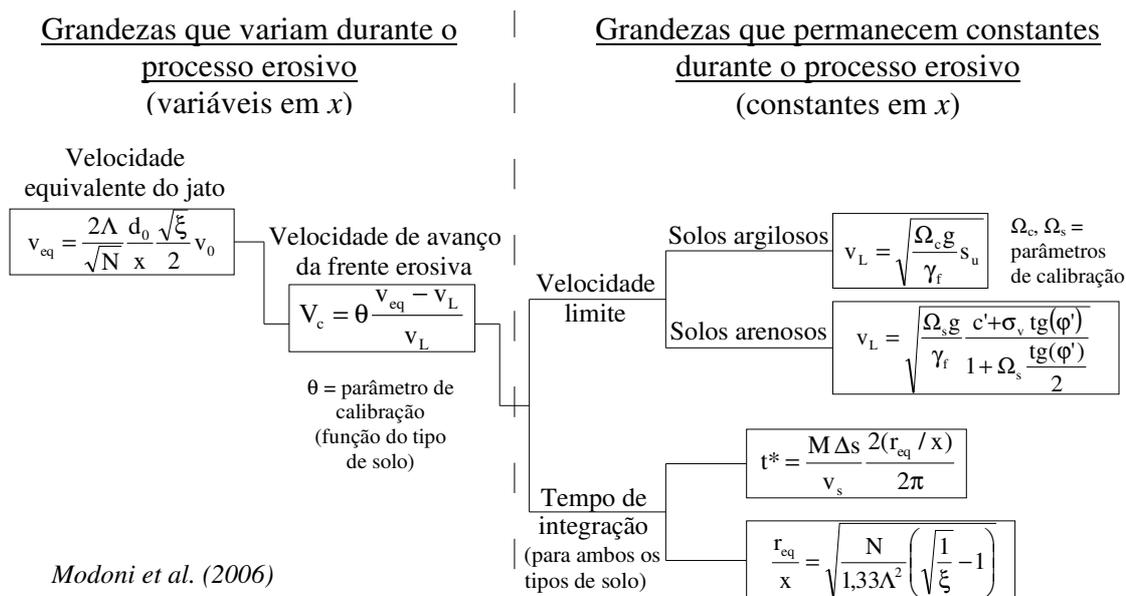


Figura 4.7 – Grandezas que descrevem o processo erosivo de formação das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido) segundo o modelo de Modoni *et al.* (2006).

A *fig. 4.8* mostra a grande concordância que existe entre os diâmetros obtidos a partir do modelo de Modoni e aqueles calculados com o método proposto.

¹⁸ Mais uma vez, gerados aleatoriamente os parâmetros de tratamento, admite-se uma restrição de caráter econômico que veta toda e qualquer combinação entre eles que conduza a um consumo de cimento superior a 1000 kg por metro linear de coluna.

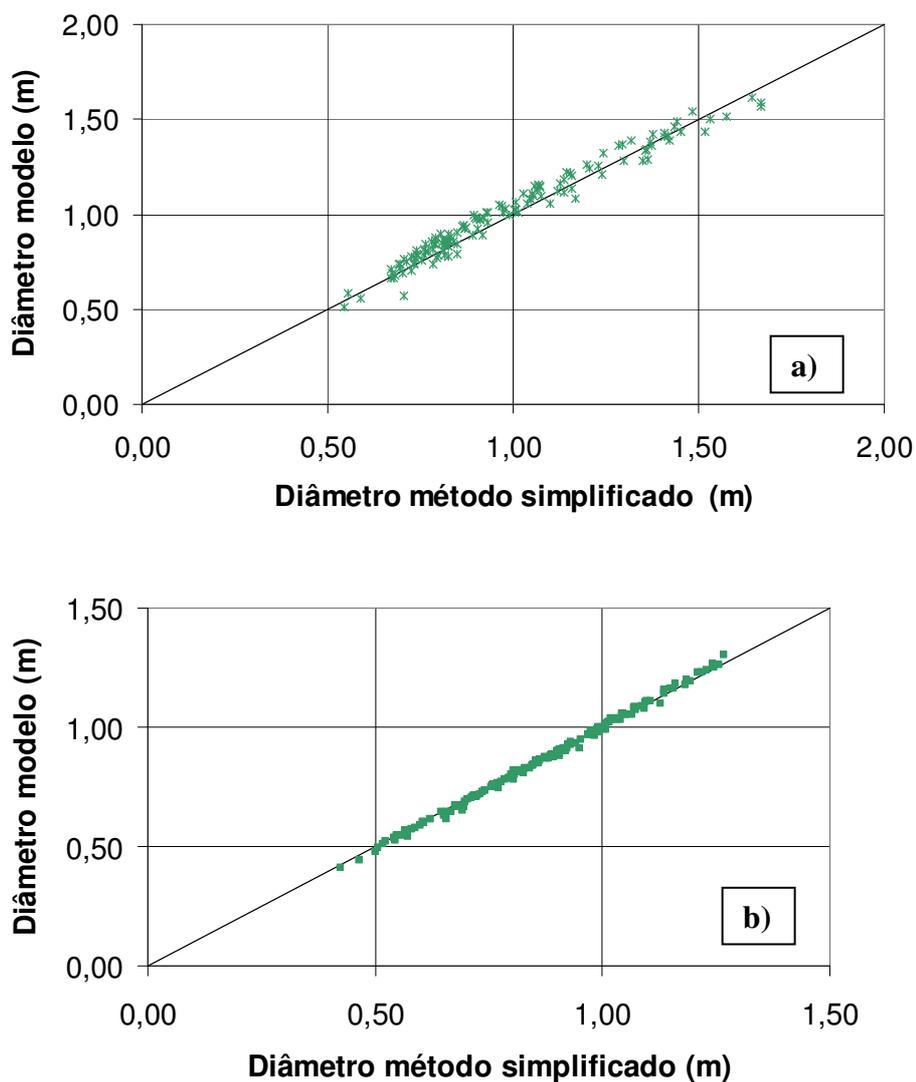


Figura 4.8 – Comparação entre os diâmetros de coluna obtidos através do modelo de Modoni *et al.* (2006) e aqueles calculados com o método simplificado, a partir da geração aleatória de parâmetros de tratamento e de características mecânicas para solos *a)* arenosos e *b)* argilosos.

A regressão linear dos diâmetros teóricos obtidos em solos arenosos (*fig. 4.8a*) apresenta um coeficiente de determinação igual a 0,975. Para solos argilosos (*fig. 4.8b*), verifica-se uma concordância ainda maior ($R^2 = 0,998$). Portanto, o método simplificado é capaz de fornecer, de forma simples e rápida, valores de diâmetro muito semelhantes àqueles que seriam obtidos estabelecendo inter-relações entre as diversas expressões analíticas do modelo de Modoni.

5. VALIDAÇÃO DO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO

5.1 PRINCÍPIOS

A validação do método teórico simplificado é realizada com base em resultados de tratamentos realizados em Barcelona, na Espanha, publicados por Carletto *et al.* (2007). Foram também incluídos dados de outros autores¹⁹, dentre os quais se destacam Croce e Flora (2000) com o campo de prova Vesúvio.

O presente trabalho reúne 145 dados de colunas executadas em solos argilosos, 87 em solos arenosos. Todos eles são fruto de observação direta, ou seja, as colunas foram expostas e os seus diâmetros, medidos a diferentes profundidades. Cada medida de diâmetro constitui um ponto experimental, a ser confrontado com a previsão fornecida pelo método proposto.

Outro aspecto comum a todos os dados experimentais apresentados é a existência de investigações do subsolo precedentes à execução do *jet grouting*, que permitiram a estimativa dos parâmetros geotécnicos de interesse, além de informações precisas a respeito dos parâmetros de tratamento utilizados.

5.2 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA SOLOS ARGILOSOS

Os dados de diâmetro obtidos para solos argilosos referem-se aos campos de prova de Barcelona (Carletto *et al.*, 2007) e da Turquia (Davie *et al.*, 2003). Previamente aos tratamentos, as características mecânicas dos terrenos foram estimadas a partir de ensaios de campo e de laboratório (*tab. 5.1*).

¹⁹ É notável a dificuldade em se obter, na literatura, informações sobre resultados de tratamentos associados aos correspondentes parâmetros utilizados e às características mecânicas dos solos. Não foi possível, por exemplo, reunir dados nacionais, nem mesmo com a cooperação de empresas executoras de *jet grouting* no Brasil.

Tabela 5.1 – Estimativa da resistência ao cisalhamento não-drenado dos solos argilosos, campos de prova de Barcelona e da Turquia.

Campo prova	Autor	Colunas	Tipo de solo	Tipo de ensaio	s_u (kPa)
Barcelona	Carletto et al., 2007	Grupos A, B, C e D	Argila siltosa	Ensaio triaxiais do tipo CU	$80+5,33z$
Turquia	Davie et al., 2003	I-PT-1 a I-PT-13	Argila pouco arenosa e pouco pedregulhosa	CPT	65 ($z = 2,5m$)

Para os solos argilosos do campo de prova de Barcelona, a *fig. 5.1* mostra os resultados desses ensaios. As amostras indeformadas, extraídas a diferentes cotas, foram adensadas nas tensões de campo. Embora com alguma dispersão, os dados obtidos indicam um aumento linear da resistência ao cisalhamento não-drenado com a profundidade z ($s_u = 80 + 5,33z$), lei de variação esta adotada para a estimativa das características mecânicas do terreno nos pontos onde foram medidos os diâmetros de coluna.

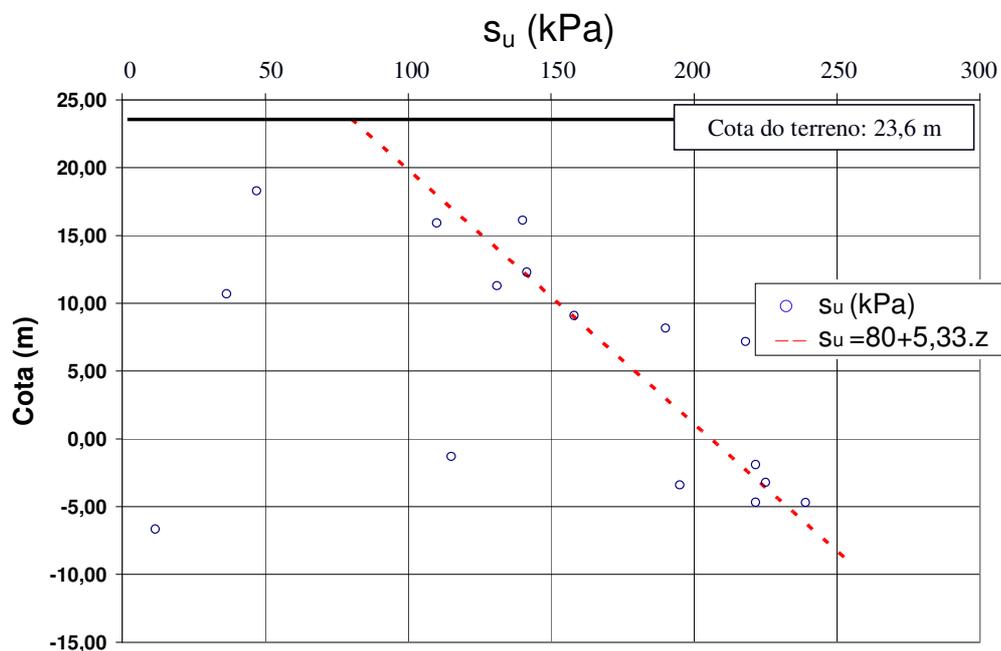


Figura 5.1 – Resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso do campo de prova de Barcelona, estimada a partir de ensaios de laboratório do tipo CU e relacionada às cotas de extração das amostras indeformadas.

Para análise, as colunas realizadas na argila siltosa de Barcelona foram agrupadas de acordo com as combinações utilizadas para os parâmetros de tratamento e com as direções nas quais foram executadas. Enquanto as colunas dos grupos A e B (fig. 5.2a) eram verticais e tiveram os seus diâmetros medidos a diferentes profundidades, aquelas dos grupos C e D (fig. 5.2b) eram subhorizontais e foram analisadas a uma só profundidade.

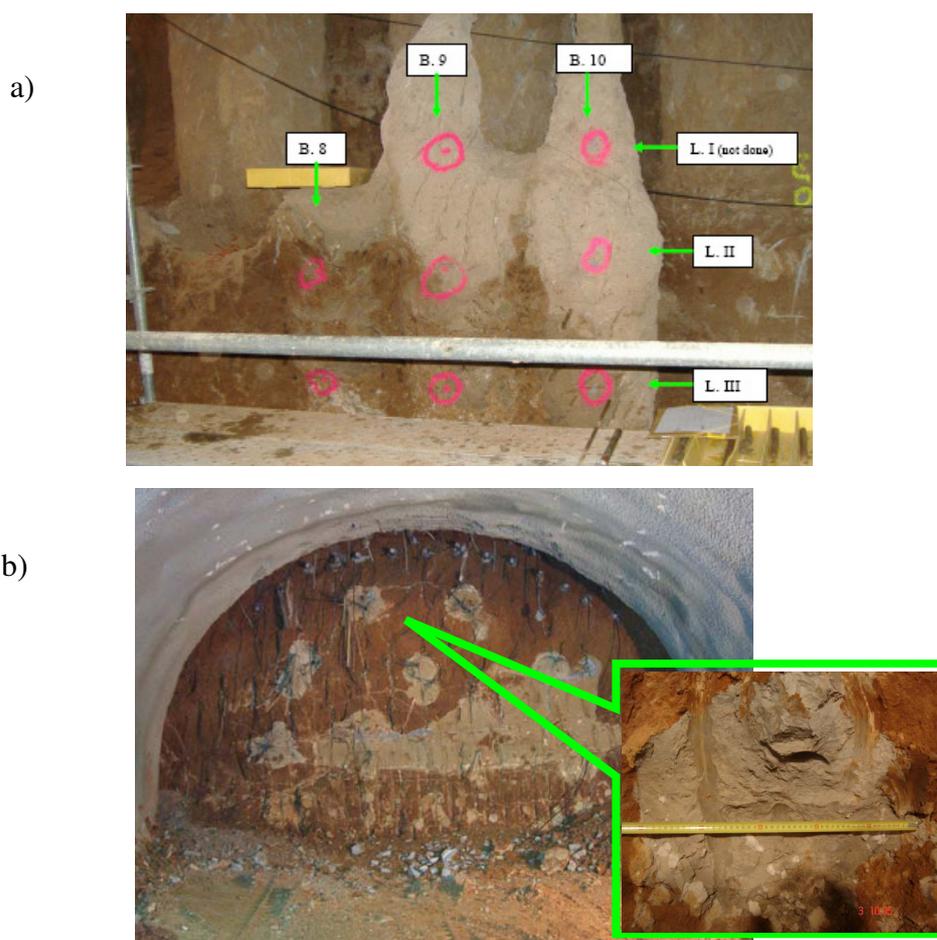


Figura 5.2 – Campo de prova de Barcelona: medição do diâmetro das colunas a) verticais (grupos A e B) e b) subhorizontais (grupos C e D).

A *tab. 5.2* mostra as características do solo nas profundidades em que foram medidos os diâmetros, os parâmetros de tratamento adotados para a execução de cada coluna (com o respectivo parâmetro J_c) e a comparação entre os diâmetros medidos em campo e aqueles calculados com a eq. (39) do método teórico simplificado.

Tabela 5.2 – Campo de prova de Barcelona: resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos.

	Coluna	z (m)	s _u (kPa)	d ₀ (m)	v ₀ (m/s)	M	v _s (m/s)	W	N	γ _f (kN/m ³)	Diâmetro calculado (m)		Diâmetro medido (m)
											J _c	D (m)	
Barcelona A	A1	6,85	117	0,003	219	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	109	0,42	0,33
	A1	7,35	119	0,003	219	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	109	0,42	0,41
	A1	7,85	122	0,003	219	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	109	0,42	0,42
	A1	8,35	125	0,003	219	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	109	0,41	0,30
	A1	8,85	127	0,003	219	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	109	0,41	0,49
	A8	7,35	119	0,003	196	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	98	0,39	0,39
	A8	7,85	122	0,003	196	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	98	0,39	0,33
	A8	8,35	125	0,003	196	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	98	0,39	0,34
	A8	8,85	127	0,003	196	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	98	0,39	0,45
	A9	6,85	117	0,003	193	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	97	0,39	0,46
	A9	7,35	119	0,003	193	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	97	0,39	0,41
	A9	7,85	122	0,003	193	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	97	0,39	0,34
	A9	8,35	125	0,003	193	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	97	0,39	0,35
	A9	8,85	127	0,003	193	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	97	0,39	0,40
	A10	6,85	117	0,003	198	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	99	0,40	0,40
A10	7,35	119	0,003	198	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	99	0,40	0,44	
A10	7,85	122	0,003	198	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	99	0,40	0,32	
A10	8,35	125	0,003	198	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	99	0,39	0,36	
A10	8,85	127	0,003	198	1	0,00615	0,8	5,4	16,11	99	0,39	0,36	
Barcelona B	B1	7,35	119	0,003	218	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	114	0,43	0,40
	B1	7,85	122	0,003	218	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	114	0,43	0,42
	B1	8,35	125	0,003	218	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	114	0,42	0,40
	B1	8,85	127	0,003	218	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	114	0,42	0,47
	B8	7,35	119	0,003	199	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	104	0,41	0,49
	B8	7,85	122	0,003	199	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	104	0,41	0,48
	B8	8,35	125	0,003	199	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	104	0,40	0,52
	B9	7,35	119	0,003	200	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,48
	B9	7,85	122	0,003	200	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,57
	B9	8,35	125	0,003	200	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,51
	B9	8,85	127	0,003	200	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,40	0,58
	B10	7,35	119	0,003	201	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,39
	B10	7,85	122	0,003	201	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,51
B10	8,35	125	0,003	201	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,41	0,49	
B10	8,85	127	0,003	201	1	0,00571	1,0	4,6	15,18	105	0,40	0,49	
Barcelona C	Seq. 1	18,80	180	0,0032	177	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	142	0,43	0,40
	Seq. 2	18,80	180	0,0035	175	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	141	0,43	0,43
	Seq. 3	18,80	180	0,0035	186	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	213	0,54	0,49
Barcelona D	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,72
	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,43
	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,58
	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,58
	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,52
	B3	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,53
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,59
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,54
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,55
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,49
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,36
	B4	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,49
	73	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,41
	73	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,29
	73	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,28
	73	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,34
	77	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,38
	77	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,42
	77	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,42
	28	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,32
28	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,32	
I107	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,49	

(continua)

Coluna	z (m)	s _u (kPa)	d ₀ (m)	v ₀ (m/s)	M	v _s (m/s)	W	N	γ _t (kN/m ³)	Diâmetro calculado (m)		Diâmetro medido (m)	
										J _c	D (m)		
Barcelona D	I107	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,52
	I107	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,48
	J117	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,50
	J117	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,45
	J117	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,46
	K95	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,48
	K95	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,50
	K95	13,10	150	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	215	0,57	0,51
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,55
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,59
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,63
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,77
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,82
	B1	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,70
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,48
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,53
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,58
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,48
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,50
	B2	13,10	150	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	199	0,55	0,51
	B3.1	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,43
	B3.1	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,88
	B3.1	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,60
	B3.3	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,50
	B3.3	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,85
	B3.3	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,75
	B3.6	13,10	150	0,004	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	206	0,56	0,47
	B3.2	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,46
	B3.2	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,75
	B3.2	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,59
	B3.4	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,44
	B3.4	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,80
	B3.4	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,65
	B3.7	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,41
	B3.5	13,10	150	0,004	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,70	279	0,66	0,49
	B3.5	13,10	150	0,004	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,70	279	0,66	0,60
	B3.8	13,10	150	0,004	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,70	279	0,66	0,47
	B3.9	13,10	150	0,004	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,70	279	0,66	0,46
	B1/B1	13,10	150	0,003	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,70	210	0,57	0,45
	B2/B2	13,10	150	0,004	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	224	0,59	0,53
	B3/B3	13,10	150	0,003	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	155	0,48	0,45
	B3/B3	13,10	150	0,003	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	155	0,48	0,42
	B4/B4	13,10	150	0,003	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	168	0,50	0,40
	B4/B4	13,10	150	0,003	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,70	168	0,50	0,40
	B5/B5	13,10	150	0,003	203	1	0,00200	1,5	2,1	13,70	249	0,62	0,50
	B5/B5	13,10	150	0,003	203	1	0,00200	1,5	2,1	13,70	249	0,62	0,44
	B150	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,44
	B150	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,33
	B150	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,37
	B150	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,45
D85	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,37	
D85	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,52	
D85	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,49	
D85	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,38	
H32	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,33	
H32	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,38	
H32	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,34	
88	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,36	
88	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,44	
88	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,35	
88	13,10	150	0,0035	179	1	0,00357	1,0	4,6	15,18	163	0,49	0,49	
A147	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,51	
A147	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,43	
A147	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,61	
C83	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,50	
C83	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,33	
C83	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,33	
E81	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,45	
E81	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,51	
E81	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,40	
F29	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,45	
F29	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,31	
F29	13,10	150	0,0035	177	1	0,00400	1,2	3,7	14,50	148	0,47	0,33	

(conclusão)

A análise relativa ao campo de prova da Turquia (Davie *et al.*, 2003) é mostrada na *tab. 5.3*.

Tabela 5.3 – Campo de prova da Turquia (Davie *et al.*, 2003): resistência ao cisalhamento não-drenado do solo argiloso e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos.

Coluna	z (m)	s_u (kPa)	d_0 (m)	v_0 (m/s)	M	v_s (m/s)	W	N	γ_i (kN/m ³)	Diâmetro calculado (m)		Diâmetro medido (m)	
										J_c	D (m)		
Turquia	I-PT-1	2,50	65	0,0018	242	2	0,00417	1,0	4,6	15,18	164	0,61	0,65
	I-PT-2	2,50	65	0,0018	231	2	0,00417	1,0	4,6	15,18	156	0,60	0,66
	I-PT-3	2,50	65	0,0018	242	2	0,00417	1,0	4,6	15,18	164	0,61	0,68
	I-PT-4	2,50	65	0,0018	231	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	121	0,52	0,47
	I-PT-5	2,50	65	0,0018	242	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	126	0,53	0,55
	I-PT-6	2,50	65	0,0018	231	2	0,00417	1,0	4,6	15,18	156	0,60	0,61
	I-PT-7	2,50	65	0,0018	242	2	0,00417	1,0	4,6	15,18	164	0,61	0,57
	I-PT-8	2,50	65	0,0018	231	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	121	0,52	0,53
	I-PT-9	2,50	65	0,0018	242	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	126	0,53	0,57
	I-PT-10	2,50	65	0,0018	225	2	0,00500	1,0	4,6	15,18	132	0,55	0,57
	I-PT-11	2,50	65	0,0018	231	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	121	0,52	0,57
	I-PT-12	2,50	65	0,0018	242	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	114	0,50	0,54
	I-PT-13	2,50	65	0,0018	235	2	0,00583	1,0	4,6	15,18	123	0,52	0,61

A comparação entre todas as medidas de diâmetro disponíveis e os respectivos valores calculados é mostrada na *fig. 5.3*.

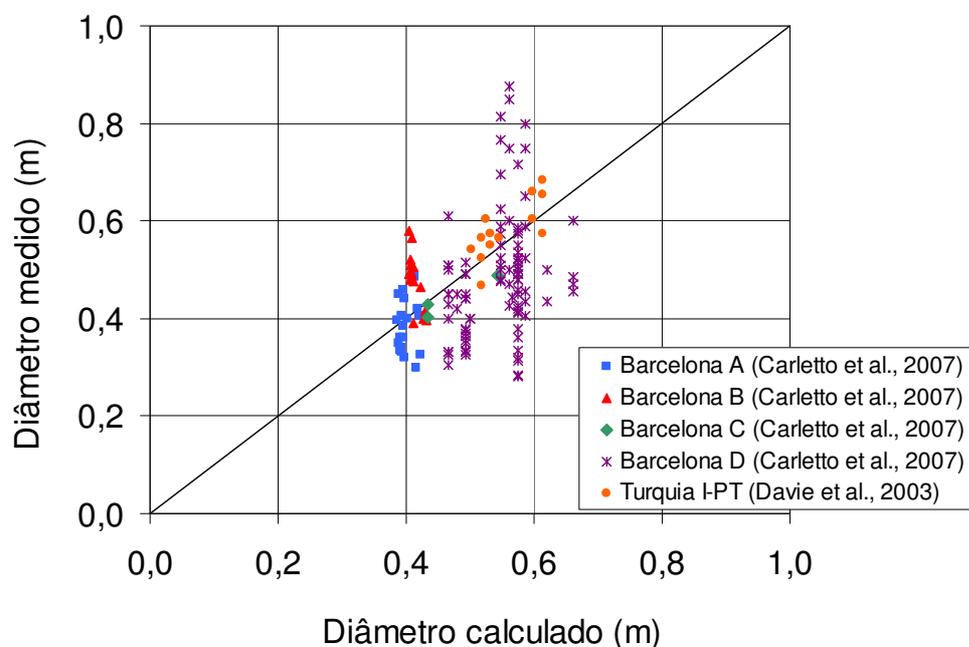


Figura 5.3 – Comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e os diâmetros efetivamente medidos em campos de prova realizados em solos argilosos de Barcelona e da Turquia.

Os 145 dados analisados apresentam uma grande dispersão ($R^2 = 0,154$), a qual, como será demonstrado nos *capítulos 6 e 7*, não se deve a uma eventual inadequação do modelo proposto, mas pode ser atribuída à variabilidade de s_u .

Embora os parâmetros de tratamento (e , portanto, o parâmetro J_c) sejam mantidos constantes durante todo o jateamento, as características de resistência dos terrenos variam de ponto a ponto do maciço. Considerando-se que foram adotados valores médios para as grandezas geotécnicas, a qualidade da previsão fornecida pelo método simplificado pode ser mais bem avaliada no que se refere aos diâmetros médios das colunas de *jet grouting* em cada profundidade.

Para tal avaliação, os dados experimentais foram divididos com base na previsão de diâmetro fornecida pelo método proposto. Procurou-se, desta forma, agrupar as observações de campo que, teoricamente, apresentariam um mesmo resultado dimensional. Por fim, em cada grupo, o diâmetro calculado em comum foi confrontado com a média dos diâmetros medidos.

Para os tratamentos em solos argilosos, a comparação entre as médias dos diâmetros medidos e os correspondentes diâmetros calculados é bastante satisfatória, com $R^2 = 0,426$ (*fig. 5.4*).

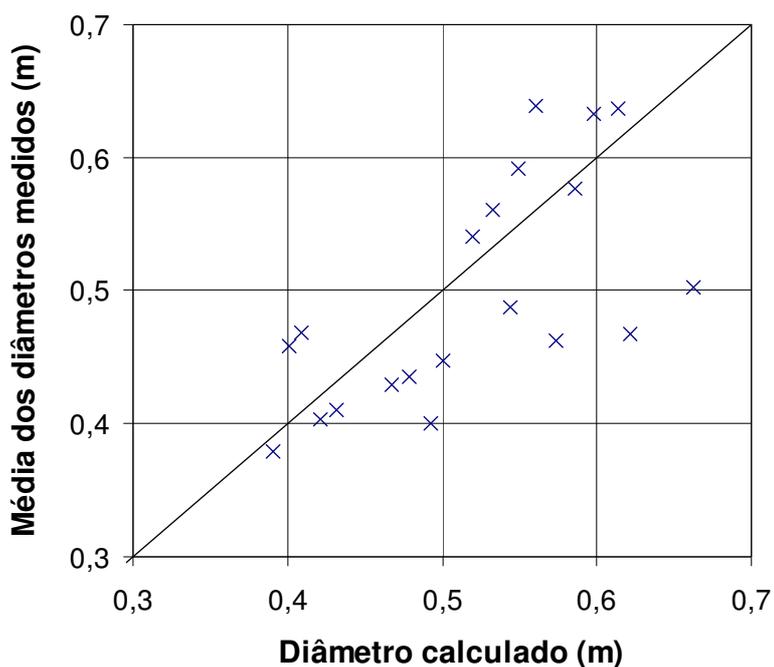


Figura 5.4 – Para os tratamentos em solos argilosos, comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e as correspondentes médias aritméticas dos diâmetros medidos.

5.3 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIÂMETRO PARA SOLOS ARENOSOS

Para os solos arenosos, a capacidade do método simplificado em prever o diâmetro das colunas foi avaliada com base em dados de quatro campos de prova (Vesúvio, Veneza e Rio Matzeu, todos na Itália, e Barcelona, na Espanha).

A *tab. 5.4* mostra as características mecânicas dos terrenos analisados.

Tabela 5.4 – Estimativa da resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos, campos de prova de Rio Matzeu, Veneza, Vesúvio e Barcelona.

Campo prova	Autor	Colunas	Tipo de solo	Tipo de ensaio	s (kPa)
Rio Matzeu	Bianco e Santoro, 1995	RM1/1, RM1/2, RM1/3, RM1/4, RM1/5	Pedregulhos em matriz arenosa	SPT	$18,5 \cdot z \cdot \text{tg}37^\circ$
Veneza	Belloni et al., 2007	JGT11A	Areia siltosa	CPTU	$10 + 19 \cdot z \cdot \text{tg}32^\circ$
Veneza	Belloni et al., 2007	JGT11B	Areia média a fina	CPTU	$18,5 \cdot z \cdot \text{tg}38^\circ$
Vesúvio	Croce e Flora, 2000	C ₀ , C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₆	Areia siltosa piroclástica	Ensaio triaxiais do tipo CD	$55 + 15 \cdot z \cdot \text{tg}35^\circ$
Barcelona	Carletto et al., 2007	A, B, Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3	Areia média bem graduada	SPT	$20 \cdot z \cdot \text{tg}39^\circ$

Os parâmetros de tratamento adotados para a execução de cada coluna (com o respectivo parâmetro J_s) e a comparação entre os diâmetros medidos em campo e aqueles calculados com a eq. (38) do método teórico simplificado são apresentados na *tab. 5.5*.

Tabela 5.5 – Resistência ao cisalhamento drenado dos solos arenosos e parâmetros de tratamento, além dos diâmetros calculados com o método simplificado e dos diâmetros efetivamente medidos nos campos de prova de Rio Matzeu (Bianco e Santoro, 1995), Veneza (Belloni *et al.*, 2007), Vesúvio (Croce e Flora, 2000) e Barcelona.

	Coluna	z (m)	s (kPa)	d ₀ (m)	v ₀ (m/s)	M	v _s (m/s)	W	N	γ _t (kN/m ³)	Diâmetro calculado (m)		Diâmetro medido (m)
											J _s	D (m)	
Rio Matzeu	RM1/1	3,00	42	0,0022	224	2	0,00800	1,0	4,6	15,18	21	0,99	0,84
	RM1/2	3,00	42	0,0022	224	2	0,00800	1,0	4,6	15,18	21	0,99	0,95
	RM1/3	3,00	42	0,0022	224	2	0,00800	1,0	4,6	15,18	21	0,99	1,00
	RM1/4	3,00	42	0,0022	211	2	0,00710	1,0	4,6	15,18	21	0,99	1,09
	RM1/5	3,00	42	0,0022	211	2	0,00570	1,0	4,6	15,18	23	1,07	1,14
Veneza	JGT11A	8,50	111	0,008	117	1	0,00548	1,0	4,6	15,18	34	0,93	0,98
	JGT11B	14,50	209	0,008	425	1	0,01026	1,0	4,6	15,18	89	1,39	1,30
Vesúvio	C ₀	2,50	81	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,79	0,61
	C ₀	3,00	86	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,77	0,66
	C ₀	3,50	92	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,75	0,73
	C ₀	4,00	97	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,74	0,78
	C ₀	4,50	102	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,72	0,67
	C ₀	5,00	107	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,71	0,68
	C ₀	5,50	113	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,69	0,66
	C ₀	6,00	118	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,68	0,67
	C ₀	6,50	123	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,67	0,64
	C ₀	7,00	128	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,66	0,62
	C ₀	7,50	134	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,65	0,61
	C ₀	8,00	139	0,002	220	2	0,00571	1,0	4,6	15,18	22	0,64	0,55
	C ₁	2,50	81	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	1,01	0,89
	C ₁	3,00	86	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,98	0,91
	C ₁	3,50	92	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,96	1,00
	C ₁	4,00	97	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,94	0,98
	C ₁	4,50	102	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,92	1,04
	C ₁	5,00	107	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,90	1,02
	C ₁	5,50	113	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,88	0,99
	C ₁	6,00	118	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,87	0,96

(continua)

	Coluna	z (m)	s (kPa)	d ₀ (m)	v ₀ (m/s)	M	v _s (m/s)	W	N	γ _f (kN/m ³)	Diâmetro calculado (m)		Diâmetro medido (m)
											J _s	D (m)	
Vesúvio	C ₁	6,50	123	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,85	0,93
	C ₁	7,00	128	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,84	0,96
	C ₁	7,50	134	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,83	0,93
	C ₁	8,00	139	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,81	0,90
	C ₂	2,50	81	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,90	0,73
	C ₂	3,00	86	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,88	0,78
	C ₂	3,50	92	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,86	0,77
	C ₂	4,00	97	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,84	0,72
	C ₂	4,50	102	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,82	0,77
	C ₂	5,00	107	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,80	0,73
	C ₂	5,50	113	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,79	0,71
	C ₂	6,00	118	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,77	0,79
	C ₂	6,50	123	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,76	0,77
	C ₂	7,50	134	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,74	0,74
	C ₂	8,00	139	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,72	0,72
	C ₃	2,50	81	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	1,01	0,96
	C ₃	3,00	86	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,98	0,99
	C ₃	3,50	92	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,96	0,97
	C ₃	4,00	97	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,94	1,01
	C ₃	4,50	102	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,92	0,98
	C ₃	5,00	107	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,90	1,02
	C ₃	5,50	113	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,88	0,93
	C ₃	6,00	118	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,87	0,96
	C ₃	6,50	123	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,85	0,98
	C ₃	7,00	128	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,84	0,97
	C ₃	7,50	134	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,83	0,94
	C ₃	8,00	139	0,0038	221	1	0,00500	1,0	4,6	15,18	32	0,81	0,91
	C ₄	2,50	81	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,90	0,69
	C ₄	3,00	86	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,88	0,75
	C ₄	3,50	92	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,86	0,71
	C ₄	4,00	97	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,84	0,73
	C ₄	4,50	102	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,82	0,80
	C ₄	5,00	107	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,80	0,73
	C ₄	5,50	113	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,79	0,69
	C ₄	6,00	118	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,77	0,74
	C ₄	6,50	123	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,76	0,60
	C ₄	7,00	128	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,75	0,71
	C ₄	7,50	134	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,74	0,70
	C ₄	8,00	139	0,0026	221	2	0,00667	1,0	4,6	15,18	27	0,72	0,68
	C ₆	2,50	81	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	1,09	0,99
	C ₆	3,00	86	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	1,06	1,02
	C ₆	3,50	92	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	1,04	1,03
	C ₆	4,00	97	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	1,01	1,05
	C ₆	6,50	123	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	0,92	0,89
	C ₆	7,00	128	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	0,90	0,90
	C ₆	7,50	134	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	0,89	0,87
	C ₆	8,00	139	0,0038	221	1	0,00400	1,0	4,6	15,18	35	0,88	0,86
	Barcelona	A	13,00	210	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	39	0,80
A		13,00	210	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	39	0,80	0,71
A		13,00	210	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	39	0,80	0,90
A		13,00	210	0,0035	188	1	0,00267	1,5	2,1	13,70	39	0,80	0,96
B		10,30	167	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	31	0,75	0,78
B		10,30	167	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	31	0,75	0,92
B		10,30	167	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	31	0,75	0,58
B		10,30	167	0,0035	173	1	0,00267	0,8	5,4	16,11	31	0,75	0,77
Tipo 1		10,30	167	0,0040	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	34	0,80	1,00
Tipo 1		10,30	167	0,0040	187	1	0,00333	0,8	5,4	16,11	34	0,80	0,82
Tipo 2		13,10	212	0,0040	203	1	0,00333	1,5	2,1	13,7	43	0,85	1,08
Tipo 3		13,10	212	0,0040	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,7	50	0,94	1,08
Tipo 3	13,10	212	0,0040	203	1	0,00250	1,5	2,1	13,7	50	0,94	1,00	

(conclusão)

Conforme realizado com os dados relativos aos tratamentos em solos argilosos, foram comparadas todas as medidas de diâmetro aos respectivos diâmetros calculados (fig. 5.5).

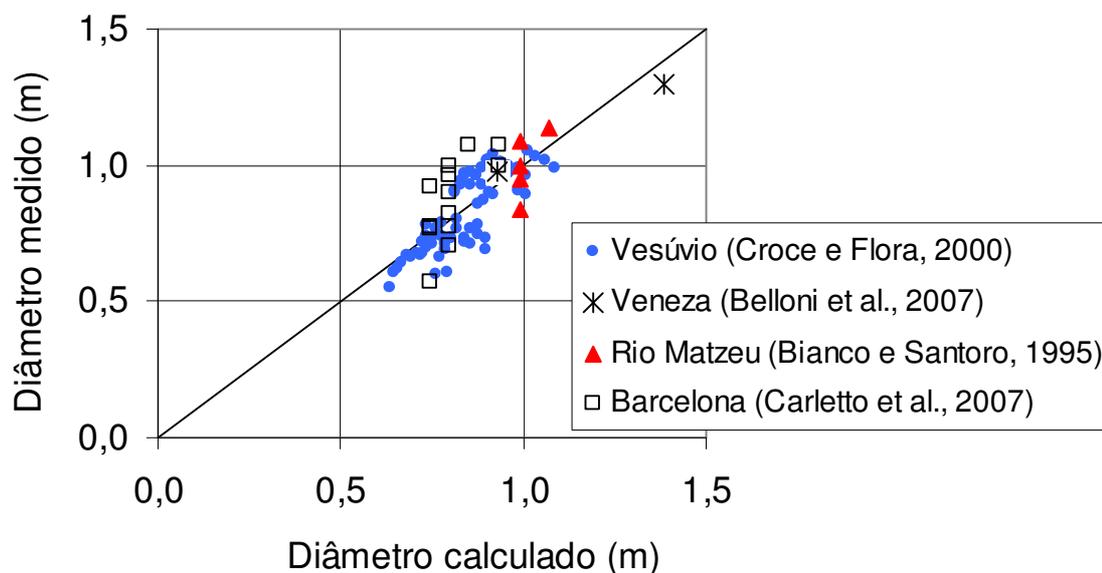


Figura 5.5 – Comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e os diâmetros efetivamente medidos em campos de prova realizados em solos arenosos.

Para os tratamentos em solos arenosos, os 87 dados experimentais apresentam uma dispersão bem menor ($R^2 = 0,623$) em relação àquela obtida para os tratamentos em solos argilosos analisados no *item 5.2*. Sendo a causa principal de tal dispersão a mesma²⁰, a maior concordância entre os diâmetros previstos e os diâmetros obtidos pode ser atribuída a uma menor variabilidade da resistência das areias em campo²¹.

Conforme realizado para os tratamentos em solos argilosos (*item 5.2*), os dados experimentais foram agrupados tendo como base a previsão de diâmetro em comum. Também para os tratamentos executados em solos arenosos, obtém-se um maior

²⁰ A heterogeneidade dos terrenos naturais, não levada em consideração quando se utilizam valores determinísticos de resistência na expressão do método teórico simplificado (ver *capítulos 6 e 7*).

²¹ Análises estatísticas (Lumb, 1966; Meyerhof, 1970; Schultze, 1975) mostram que a variabilidade natural do ângulo de atrito das areias é menor do que a da resistência ao cisalhamento não-drenado das argilas (*tab. 7.1*).

coeficiente de determinação ($R^2 = 0,864$) quando os diâmetros calculados são comparados às médias dos correspondentes diâmetros medidos (*fig. 5.6*).

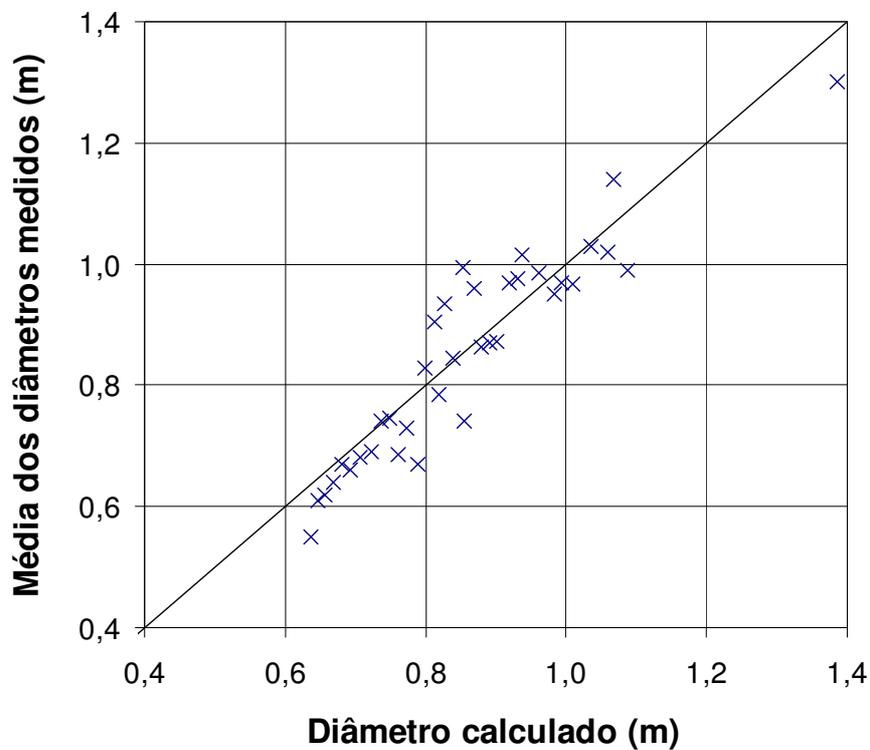


Figura 5.6 – Para os tratamentos em solos arenosos, comparação entre os diâmetros calculados com o método teórico simplificado e as correspondentes médias aritméticas dos diâmetros medidos.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

6.1 PRINCÍPIOS

Adotando-se os coeficientes e expoentes propostos na *tab. 4.4*, o diâmetro das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido) pode ser previsto através das seguintes equações segundo o método teórico simplificado:

Para os solos argilosos:

$$D = 0,11 s_u^{-0,26} J_c^{0,55}$$

onde:

$$J_c = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07)$$

Para os solos arenosos:

$$D = 0,58 s^{-0,40} J_s^{0,67}$$

onde:

$$J_s = v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,50} (1,16 W^2 - 2,06 W + 3,55)$$

Neste capítulo são analisados os resultados de estudos paramétricos envolvendo as relações acima. O objetivo é quantificar a influência de variações de cada parâmetro de tratamento no diâmetro teórico da coluna e indicar a magnitude dos erros de previsão associados à estimativa incorreta da resistência do solo.

6.2 VELOCIDADE INICIAL DO JATO E DIÂMETRO DOS BICOS

Para o tratamento de um solo argiloso, considere-se um aumento de 10% na velocidade inicial do jato, isto é, $\frac{\Delta v_0}{v_0} = 0,1$. O novo parâmetro J_c^{*22} será:

$$J_c^* = 1,1 v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07)$$

Logo: $J_c^* = 1,1 J_c$ e $\frac{\Delta J_c}{J_c} = 0,1$.

Isto significa que qualquer aumento percentual na velocidade do jato corresponde a igual aumento percentual no parâmetro J_c . O mesmo ocorre em relação ao diâmetro do bico d_0 , e deve-se ao fato de que a derivada parcial de J_c tanto em v_0 quanto em d_0 é constante em relação a estes dois parâmetros de tratamento:

$$\frac{\partial J_c}{\partial v_0} = d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07) = \text{constante } (v_0)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial d_0} = v_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07) = \text{constante } (d_0)$$

Como exemplo, imagine-se uma coluna de *jet grouting* executada em argila com os seguintes parâmetros de tratamento:

v_0 (m/s)	v_s (m/s)	M	W
300	0,0035	1	1

Neste caso: $\frac{\partial J_c}{\partial d_0} = 300 \left(\frac{1}{0,0035} \right)^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) = 76337 \text{ m}^{0,23} \text{ s}^{-0,23}$

a) Para $d_0 = 0,002$ m:

²² No capítulo 6, o asterisco indica os parâmetros que sofreram variações.

$$J_c = 300 \cdot 0,002 \left(\frac{1}{0,0035} \right)^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) = 152,7 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

Acréscimo de 10% em d_0 :

$$d_0^* = 0,0022 \text{ m}$$

$$\partial d_0 = 0,0002 \text{ m}$$

$$\partial J_c = 76337 \cdot 0,0002 = 15,3 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

$$\text{Logo: } \frac{\Delta J_c}{J_c} = 0,1$$

b) Para $d_0 = 0,0035 \text{ m}$:

$$J_c = 300 \cdot 0,0035 \left(\frac{1}{0,0035} \right)^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) = 267,2 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

Acréscimo de 10% em d_0 :

$$d_0^* = 0,00385 \text{ m}$$

$$\partial d_0 = 0,00035 \text{ m}$$

$$\partial J_c = 76337 \cdot 0,00035 = 26,7 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

$$\text{Logo: } \frac{\Delta J_c}{J_c} = 0,1$$

O aumento de 10% no parâmetro J_c , correspondente a igual aumento na velocidade do jato ou no diâmetro do bico, resulta no seguinte diâmetro de coluna:

$$D^* = 0,11 s_u^{-0,26} (1,1 J_c)^{0,55} = 1,1^{0,55} D$$

ou seja:

$$\frac{\Delta D}{D} = 1,1^{0,55} - 1 = 0,054$$

Aumentar em 10% o parâmetro J_c significa aumentar o diâmetro da coluna em 5,4%.

A derivada parcial de D em relação ao parâmetro J_c é igual a:

$$\frac{\partial D}{\partial J_c} = 0,06 s_u^{-0,26} \bar{J}_c^{-0,45}$$

onde \bar{J}_c é o valor médio entre parâmetro J_c calculado com o parâmetro de tratamento inicial (d_0 ou v_0) e aquele obtido com o parâmetro modificado (d_0^* ou v_0^*).

Quanto menor for o parâmetro \bar{J}_c , maior é a relação $\partial D / \partial J_c$, ou seja, maior é a sensibilidade do diâmetro da coluna a variações do J_c .

Do exemplo anterior, admitindo-se uma argila de $s_u = 50$ kPa e:

c) aumentando-se o diâmetro dos bicos de 0,002 m para 0,0022 m:

$$\frac{\partial D}{\partial J_c} = 0,06 \cdot 50^{-0,26} \cdot (152,7 + 15,3/2)^{-0,45} = 0,0022 \text{ m}^{-0,23} \text{ s}^{0,23}$$

$$\text{Sendo } \partial J_c = 15,3 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23} \Rightarrow \partial D = 0,0022 \cdot 15,3 = 0,034 \text{ m}$$

$$\text{OBS: } D = 0,11 \cdot 50^{-0,26} \cdot 152,7^{0,55} = 0,63 \text{ m} \quad \therefore \frac{\Delta D}{D} = \frac{0,034}{0,63} = 0,054$$

d) aumentando-se o diâmetro dos bicos de 0,0035 m para 0,00385 m:

$$\frac{\partial D}{\partial J_c} = 0,06 \cdot 50^{-0,26} \cdot (267,2 + 26,7/2)^{-0,45} = 0,0017 \text{ m}^{-0,23} \text{ s}^{0,23}$$

$$\text{Sendo } \partial J_c = 26,7 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23} \Rightarrow \partial D = 0,0017 \cdot 26,7 = 0,046 \text{ m}$$

$$\text{OBS: } D = 0,11 \cdot 50^{-0,26} \cdot 267,2^{0,55} = 0,86 \text{ m} \quad \therefore \frac{\Delta D}{D} = \frac{0,046}{0,86} = 0,054$$

Esses resultados mostram que a variação percentual do diâmetro da coluna ($\Delta D/D$) é função apenas da variação percentual do diâmetro do bico ($\Delta d_0/d_0$) ou da velocidade do jato ($\Delta v_0/v_0$), caso sejam mantidas constantes todas as demais variáveis da tecnologia e do solo (a mesma resistência ao cisalhamento não-drenado, para tratamentos em argilas). Igual conclusão pode ser obtida analisando as relações válidas para os solos arenosos. Assim, a sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações específicas de d_0 e v_0 pode ser representada de forma gráfica (*fig. 6.1*).

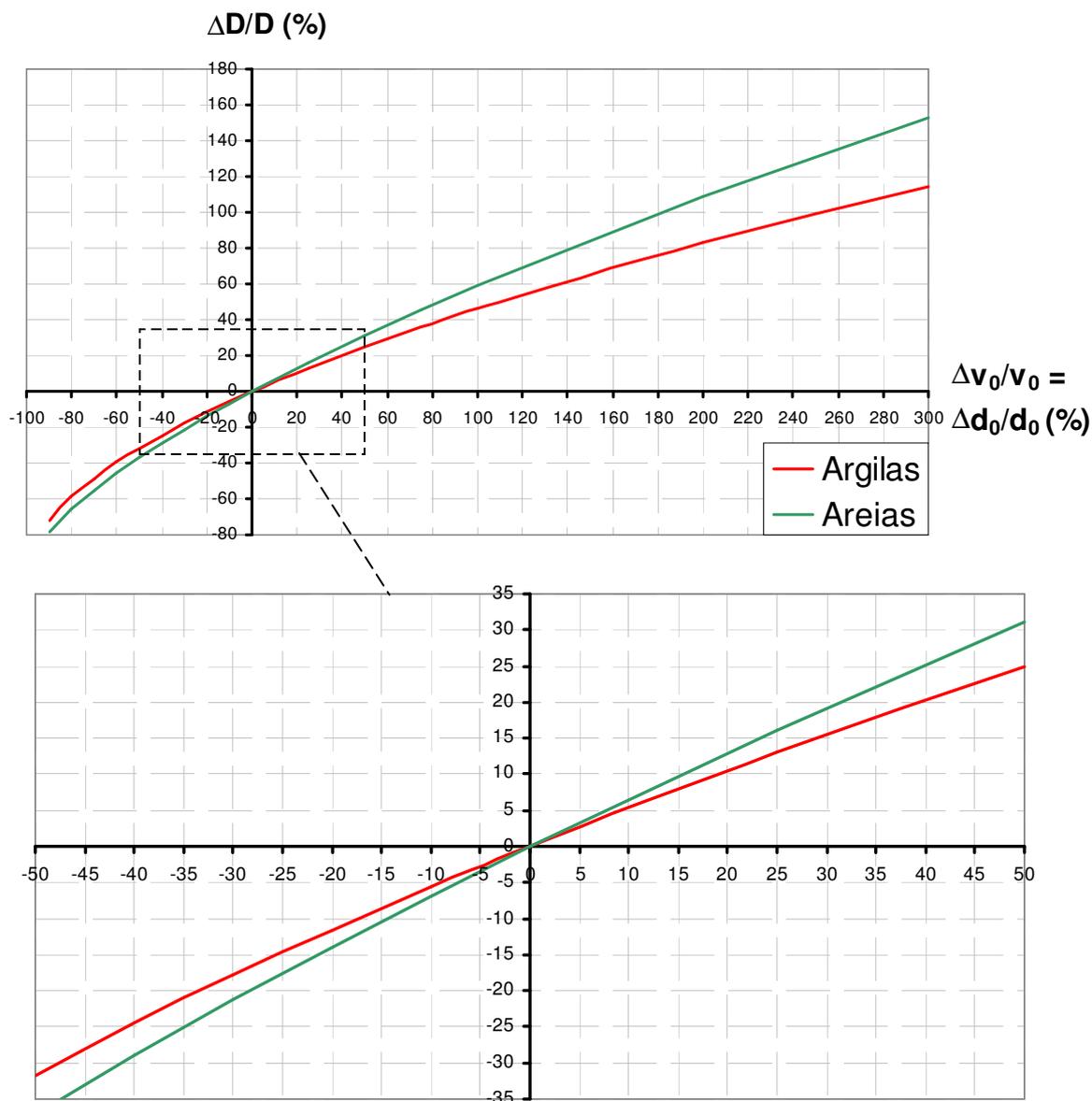


Figura 6.1 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da velocidade inicial do jato e do diâmetro dos bicos, mantidos constantes todos os demais parâmetros de tratamento e do solo.

6.3 VELOCIDADE DE EXTRAÇÃO DAS HASTES

Considere-se, então, a velocidade de extração das hastes v_s . Para o tratamento de um solo argiloso, o aumento de 10% neste parâmetro incide sobre o valor de J_c da seguinte forma:

$$J_c^* = v_0 d_0 \left(\frac{M}{1,1 v_s} \right)^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07) = \left(\frac{1}{1,1} \right)^{0,77} J_c$$

$$\text{ou seja: } \frac{\Delta J_c}{J_c} = \left(\frac{1}{1,1} \right)^{0,77} - 1 = -0,071$$

Aumentar v_s em 10% significa diminuir 7,1% o parâmetro J_c . Ao contrário do que ocorre com a velocidade do jato e com o diâmetro dos bicos, a variação percentual da velocidade de extração não corresponde a igual variação percentual do parâmetro J_c . De fato, a derivada parcial de J_c em v_s é função da própria velocidade de extração:

$$\frac{\partial J_c}{\partial v_s} = -0,77 v_0 d_0 M^{0,77} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07) \bar{v}_s^{-1,77}$$

onde \bar{v}_s é a velocidade de extração média entre o valor inicial v_s e o alterado v_s^* .

Observe-se, além disso, que tal relação apresenta valores sempre negativos, tanto maiores (em módulo) quanto menores os valores da velocidade de extração média. Portanto, quanto menor é a velocidade de extração, maior é a influência da sua variação sobre o parâmetro do jato.

Imagine-se, por exemplo, uma coluna de *jet grouting* executada, em argila, com os seguintes parâmetros de tratamento:

v_0 (m/s)	d_0 (m)	M	W
300	0,003	1	1

a) Para $v_s = 0,002$ m/s:

$$J_c = 300 \cdot 0,003 \left(\frac{1}{0,002} \right)^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) = 352,4 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

Acréscimo de 10% em v_s :

$$v_s^* = 0,0022 \text{ m/s}$$

$$\partial v_s = 0,0002 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial J_c}{\partial v_s} &= -0,77 \cdot 300 \cdot 0,003 \cdot 1^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) (0,002 + 0,0002 / 2)^{-1,77} = \\ &= -124438 \text{ m}^{0,23} \text{ s}^{0,77} \\ \partial J_c &= -124438 \cdot 0,0002 = -24,9 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23} \\ \text{Logo: } \frac{\Delta J_c}{J_c} &= \frac{-24,9}{352,4} = -0,071\end{aligned}$$

b) Para $v_s = 0,0045 \text{ m/s}$:

$$J_c = 300 \cdot 0,003 \left(\frac{1}{0,0045} \right)^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) = 188,7 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23}$$

Acréscimo de 10% em v_s :

$$v_s^* = 0,00495 \text{ m/s}$$

$$\partial v_s = 0,00045 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial J_c}{\partial v_s} &= -0,77 \cdot 300 \cdot 0,003 \cdot 1^{0,77} (0,72 \cdot 1^2 - 1,52 \cdot 1 + 4,07) (0,0045 + 0,00045 / 2)^{-1,77} = \\ &= -29620 \text{ m}^{0,23} \text{ s}^{0,77} \\ \partial J_c &= -29620 \cdot 0,00045 = -13,3 \text{ m}^{1,23} \text{ s}^{-0,23} \\ \text{Logo: } \frac{\Delta J_c}{J_c} &= \frac{-13,3}{188,7} = -0,071\end{aligned}$$

A diminuição de 7,1% no parâmetro J_c resulta na seguinte alteração do diâmetro da coluna:

$$D^* = 0,11 s_u^{-0,26} (0,929 J_c)^{0,55} = 0,929^{0,55} D$$

ou seja:

$$\frac{\Delta D}{D} = 0,929^{0,55} - 1 = -0,040$$

Mais uma vez, a variação percentual do diâmetro da coluna ($\Delta D/D$) é função apenas da variação percentual da velocidade de extração ($\Delta v_s/v_s$) caso sejam mantidas constantes todas as demais variáveis da tecnologia e do solo, seja este arenoso ou argiloso (*fig. 6.2*).

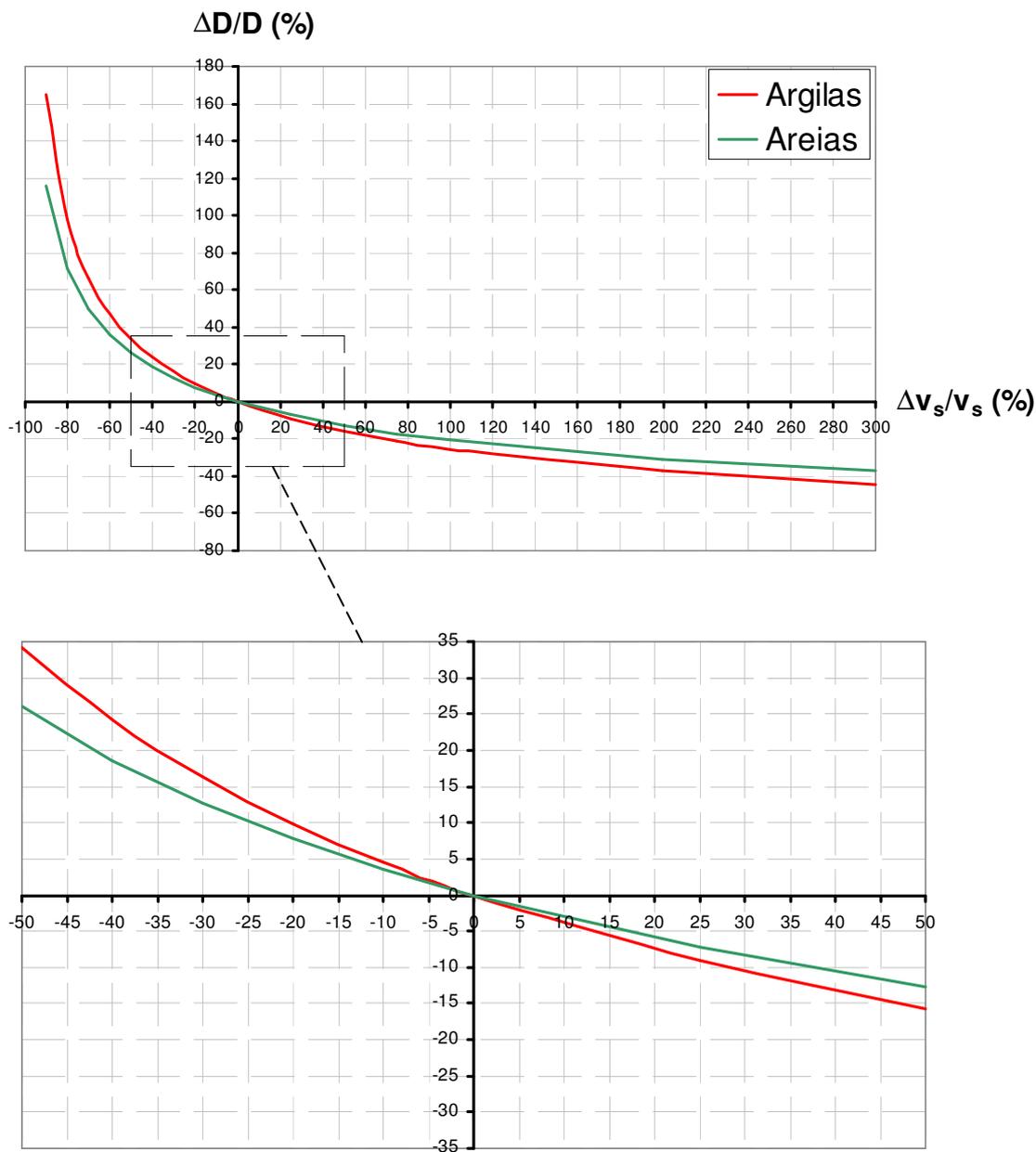


Figura 6.2 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da velocidade de extração das hastas, mantidos constantes todos os demais parâmetros de tratamento e do solo.

Por exemplo, com o aumento da velocidade de extração em 10% obtêm-se, em solos argilosos, diâmetros de coluna 4% menores (independentemente se v_s passa de 0,002 a 0,0022 ou, então, de 0,0045 a 0,00495 m/s). Em solos arenosos, a correspondente redução de diâmetro é de 3,1%.

6.4 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DA CALDA

Deve-se analisar, também, a influência de variações percentuais na relação água/cimento da calda. Por exemplo, o aumento de 10% em W corresponde à seguinte alteração de J_c :

$$\begin{aligned} J_c^* &= v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} \left[0,72 (1,1 W)^2 - 1,52 (1,1 W) + 4,07 \right] = \\ &= v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} (0,87 W^2 - 1,67 W + 4,07) \end{aligned}$$

Isto significa que o novo parâmetro J_c é função da relação água/cimento que a calda apresentava inicialmente. Logo, de acordo com o teor de cimento da calda, a variação de 10% de W resulta em diferentes variações percentuais de J_c (e, conseqüentemente, do diâmetro da coluna).

A taxa de variação do diâmetro das colunas com a relação água/cimento da calda é dada por:

Para solos argilosos:

$$\frac{\partial D}{\partial W} = 0,061 s_u^{-0,26} \left[v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,77} \right]^{0,55} (0,72 W^2 - 1,52 W + 4,07)^{-0,45} (1,44 W - 1,52)$$

$$\frac{\partial D}{\partial W} = 0 \Rightarrow W = 1,06$$

Para solos arenosos:

$$\frac{\partial D}{\partial W} = 0,389 s^{-0,40} \left[v_0 d_0 \left(\frac{M}{v_s} \right)^{0,5} \right]^{0,67} (1,16 W^2 - 2,06 W + 3,55)^{-0,33} (2,32 W - 2,06)$$

$$\frac{\partial D}{\partial W} = 0 \Rightarrow W = 0,89$$

Para valores de W menores que 1,06 para solos argilosos, e inferiores a 0,89 para solos arenosos, a função $\partial D/\partial W$ é negativa, e o aumento de W acarreta uma redução do diâmetro da coluna. Tal fato, incompatível com uma característica básica do escoamento dos jatos submersos²³, é resultado do ajuste matemático efetuado para a definição do parâmetro J . Em termos quantitativos, entretanto, a redução (irreal) do diâmetro teórico da coluna devido ao emprego de caldas menos viscosas é desprezível.

De fato, a variação da relação água/cimento da calda terá mais influência sobre o diâmetro previsto com o método teórico simplificado quanto menores forem a resistência ao cisalhamento do solo e a velocidade de extração das hastes e quanto maiores forem a velocidade inicial do jato, o diâmetro e o número de bicos. Porém, não é concebível a adoção de valores de d_0 , v_0 , v_s e M que, conjuntamente, aumentem o consumo de cimento a ponto de tornar o tratamento de *jet grouting* economicamente proibitivo. A *tab. 6.1* mostra quanto se reduz o diâmetro das colunas com o aumento de W (de 0,80 para 1,06 para solos argilosos, e de 0,80 para 0,89 para solos arenosos) quando são utilizados parâmetros de tratamento médios dentre as faixas de variação típicas da tecnologia ($d_0 = 0,003$ m; $v_0 = 300$ m/s; $v_s = 0,0035$ m/s; $M = 1$).

Tabela 6.1 – Redução do diâmetro teórico da coluna com o aumento da relação água/cimento da calda para solos argilosos e arenosos de diferentes resistências ao cisalhamento e para valores médios dos demais parâmetros de tratamento.

Solos argilosos	ΔW de 0,80 a 1,06	
	s_u (kPa)	ΔD (m)
	10	-0,010
	100	-0,005
	200	-0,004
Solos arenosos	ΔW de 0,80 a 0,89	
	s (kPa)	ΔD (m)
	10	-0,004
	100	-0,001
	200	-0,001

²³ Quanto maior a relação água-cimento da calda, menor é a sua viscosidade e menores são a dispersão e a perda de velocidade do jato (*item 3.2.2, fig. 3.5*).

Segundo o método de previsão proposto, a redução do diâmetro das colunas com o aumento da relação água/cimento da calda (considerando-se os valores típicos de W utilizados no *jet grouting*) se restringe a poucos milímetros tanto para os solos argilosos quanto para os solos arenosos.

Por outro lado, adotando-se os mesmos parâmetros de tratamento médios ($d_0 = 0,003$ m; $v_0 = 300$ m/s; $v_s = 0,0035$ m/s; $M = 1$), a *tab. 6.2* mostra o acréscimo de diâmetro que se verifica quando são utilizados valores de W maiores que 1,06 para solos argilosos, e que 0,89 para solos arenosos.

Tabela 6.2 – Aumento do diâmetro teórico da coluna com o aumento da relação água/cimento da calda para solos argilosos e arenosos de diferentes resistências ao cisalhamento e para valores médios dos demais parâmetros de tratamento.

Solos argilosos	ΔW de 1,06 a 1,20	
	s_u (kPa)	ΔD (m)
	10	0,003
	100	0,002
Solos arenosos	ΔW de 0,89 a 1,20	
	s (kPa)	ΔD (m)
	10	0,045
	100	0,018
	200	0,014

Nesta faixa de valores de W , o aumento da relação água/cimento gera acréscimos no diâmetro das colunas que vão de poucos milímetros em solos argilosos a poucos centímetros em solos arenosos.

Em termos práticos, a variação de W dentro do seu campo de valores típicos (0,8 a 1,2) resulta numa variação desprezível do diâmetro das colunas. Com fidelidade ao método proposto, pode-se prever o diâmetro das colunas adotando-se $W = 1$ nas eq. (35) e (36).

6.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

À diferença do que ocorre com os parâmetros de tratamento, a variação das propriedades do terreno em relação aos valores estimados não pode ser controlada durante a execução do *jet grouting*. Assim, a resistência ao cisalhamento dos solos que estão sendo tratados constitui a principal incerteza de parâmetro do método proposto.

Como exemplo, considere-se uma argila com s_u 10% maior que o valor estimado através de ensaios geotécnicos. O diâmetro teórico correspondente será:

$$D^* = 0,11 (1,1 s_u)^{-0,26} J_c^{0,55} = 0,976 D$$

ou seja: $\frac{\Delta D}{D} = 0,976 - 1 = -0,024$

Com os parâmetros de tratamento mantidos constantes, uma resistência ao cisalhamento não-drenado 10% maior que a adotada nos cálculos corresponde a uma redução de 2,4% no diâmetro teórico das colunas executadas em argila.

Considere-se, por sua vez, igual variação na resistência ao cisalhamento drenado das areias. O efeito sobre o diâmetro calculado com o método simplificado será:

$$D^* = 0,58 (1,1 s)^{-0,40} J_s^{0,67} = 0,963 D$$

ou seja: $\frac{\Delta D}{D} = 0,963 - 1 = -0,037$

Para os solos arenosos, a correspondente redução no diâmetro teórico das colunas será de 3,7%.

De qualquer forma, uma variação percentual na resistência ao cisalhamento dos solos argilosos (em condições não-drenadas) e dos solos arenosos (em condições drenadas) gera uma variação percentual no diâmetro das colunas que independe da variação

absoluta da resistência do solo. Aumentar s_u de 10 para 11 kPa ou, então, de 50 para 55 kPa, significa reduzir de 2,4% o diâmetro teórico da coluna.

A sensibilidade do diâmetro das colunas a variações específicas da resistência ao cisalhamento do solo é mostrada na *fig. 6.3*.

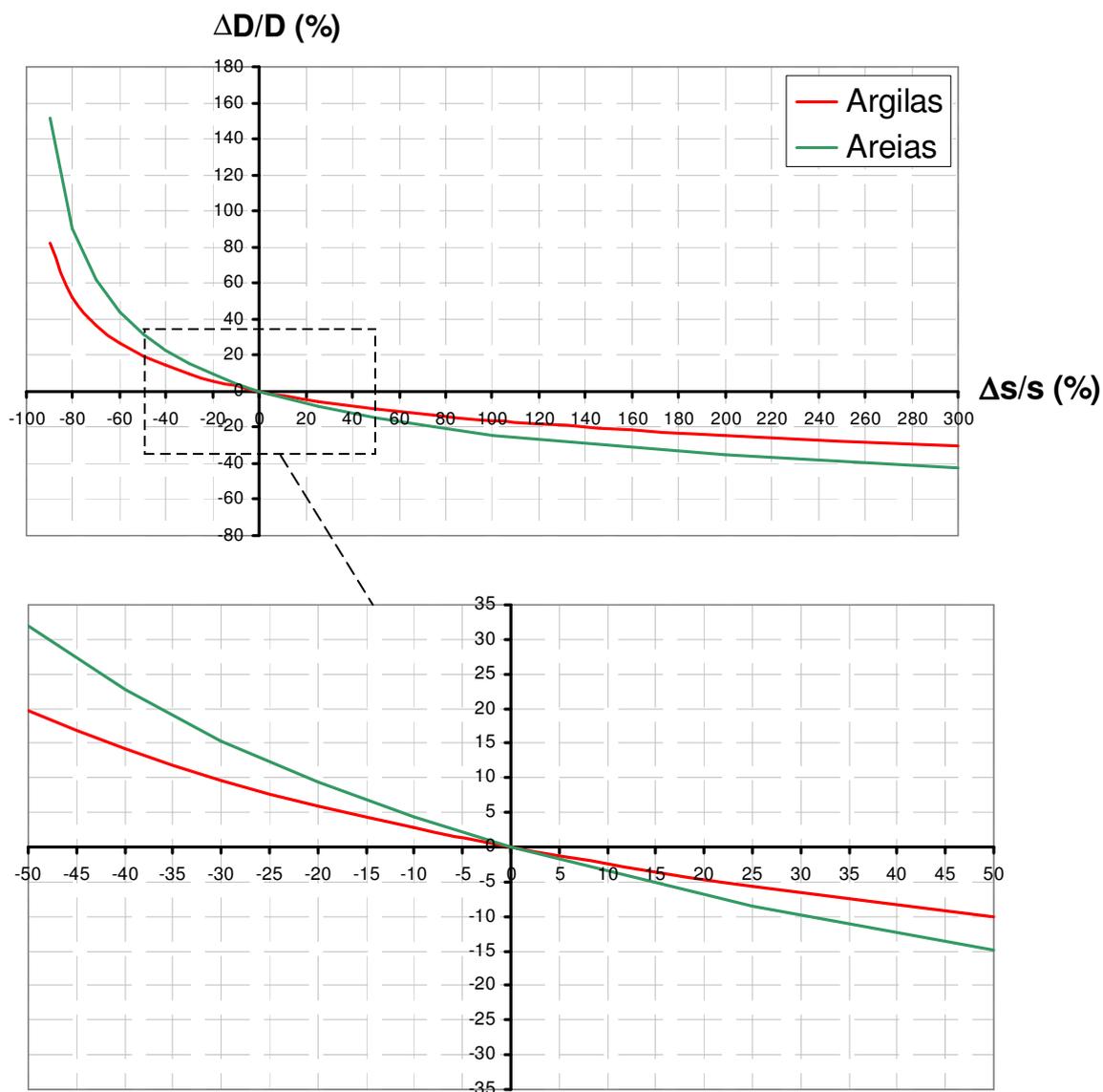


Figura 6.3 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações percentuais da resistência ao cisalhamento dos solos argilosos (em condições não-drenadas) e dos solos arenosos (em condições drenadas), mantidos constantes todos os parâmetros de tratamento.

Note-se que uma mesma diferença percentual entre a resistência ao cisalhamento real do solo e o valor de s ou s_u inferido gera erros de previsão maiores para as colunas executadas em solos arenosos do que para aquelas executadas em solos argilosos.

Para os solos arenosos, é possível analisar separadamente a influência da variação dos parâmetros de resistência c' e φ' sobre o diâmetro teórico das colunas. Inicialmente, considere-se que, numa determinada profundidade do maciço, tais parâmetros são 10% maiores do que os valores estimados a partir de ensaios. O diâmetro das colunas, calculado com o método proposto, será:

Com a variação de 10% no intercepto de coesão:

$$D^* = 0,58 (1,1 c' + \sigma_v \operatorname{tg} \varphi')^{-0,40} J_s^{0,67}$$

Com a variação de 10% no ângulo de atrito:

$$D^* = 0,58 [c' + \sigma_v \operatorname{tg}(1,1 \varphi')]^{-0,40} J_s^{0,67}$$

Para ambos os casos, o diâmetro final D^* dependerá dos valores de c' e φ' ; portanto, em função destes valores, uma mesma variação percentual em cada um deles resulta em diferentes variações percentuais do diâmetro das colunas.

A taxa de variação do diâmetro teórico das colunas em relação aos parâmetros de resistência das areias é definida da seguinte forma:

a) Para o intercepto de coesão:

$$\frac{\partial D}{\partial c'} = -0,23 J_s^{0,67} (c' + \sigma_v \operatorname{tg} \varphi')^{-1,40}$$

A variação de c' terá mais influência sobre o diâmetro da coluna quanto maior for o parâmetro J_s e quanto menores forem a tensão vertical total e o ângulo de atrito.

Como exemplo, consideremos uma areia com ângulo de atrito igual a 30° , submetida a 60 kPa de tensão vertical total e tratada com o sistema monofluido e parâmetro J_s

igual a $30 \text{ m}^{1,5} \text{ s}^{-0,5}$. Com a variação do intercepto de coesão, varia a resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, o diâmetro teórico da coluna (*tab. 6.3*).

Tabela 6.3 – Para diferentes valores do intercepto de coesão, resistência ao cisalhamento drenado de areia com $\phi'=30^\circ$ e submetida a $\sigma_v=60 \text{ kPa}$, e respectivos diâmetros teóricos resultantes do seu tratamento com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5} \text{ s}^{-0,5}$.

c' (kPa)	s (kPa)	D (m)
0	34,6	1,37
5	39,6	1,30
10	44,6	1,24
15	49,6	1,19
20	54,6	1,14
40	74,6	1,01
45	79,6	0,98
50	84,6	0,96

A sensibilidade do diâmetro teórico da coluna a variações do intercepto de coesão é apresentada na *fig. 6.4*.

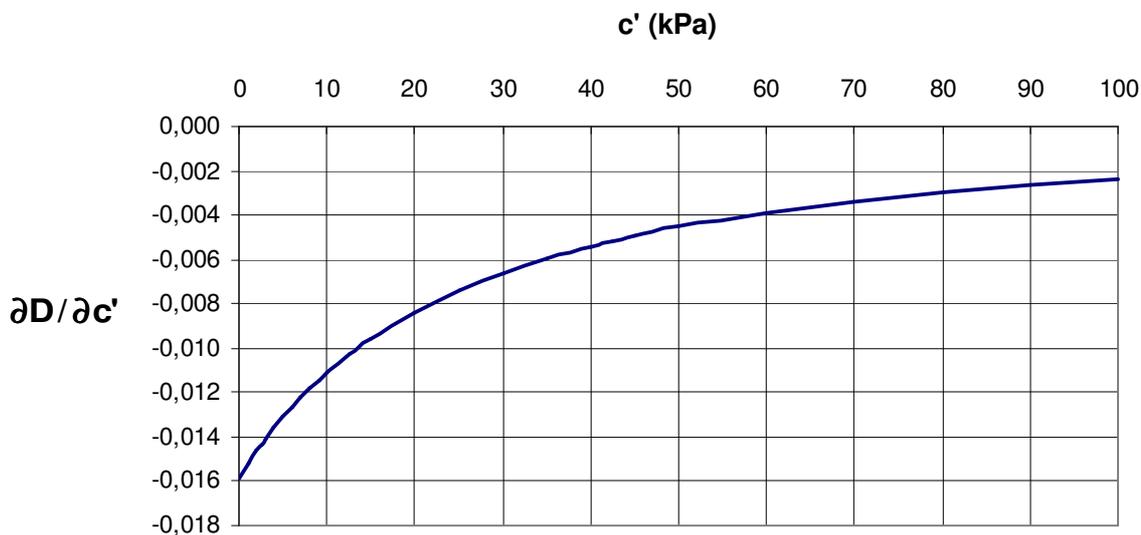


Figura 6.4 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações do intercepto de coesão de areia com $\phi'=30^\circ$ e $\sigma_v=60 \text{ kPa}$, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5} \text{ s}^{-0,5}$.

Variações no intercepto de coesão do solo resultam em alterações do diâmetro teórico da coluna que podem ser mais ou menos significativas de acordo com os valores de c' (tab. 6.4).

Tabela 6.4 – Variações do diâmetro teórico da coluna decorrentes de variações no intercepto de coesão de areia com $\phi'=30^\circ$ e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$.

c' de 0 para 5 kPa				c' de 10 para 15 kPa			
$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)	$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)
-0,014	14,43	-0,07	-5,25	-0,010	11,20	-0,05	-4,16
c' de 0 para 10 kPa				c' de 10 para 20 kPa			
$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)	$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)
-0,013	28,87	-0,13	-9,65	-0,010	22,40	-0,10	-7,77
c' de 40 para 45 kPa				c' de 40 para 50 kPa			
$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)	$\partial D/\partial c'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)
-0,005	6,70	-0,03	-2,56	-0,005	13,40	-0,05	-4,90

O acréscimo de 10 kPa no intercepto de coesão (de 0 para 10 kPa) representa uma redução de 13 cm no diâmetro da coluna obtido com o método simplificado; tal redução é bem menor (5 cm) se c' é igual a 50 kPa ao invés de 40 kPa. De qualquer forma, ressalta-se a significativa sensibilidade do diâmetro teórico a variações do valor do intercepto de coesão das areias.

b) Para o ângulo de atrito:

$$\frac{\partial D}{\partial \phi'} = -0,23 J_s^{0,67} (c' + \sigma_v \text{tg} \phi')^{-1,40} \sigma_v \sec^2 \phi'$$

A variação de ϕ' , por sua vez, terá mais influência sobre o diâmetro da coluna quanto maior for o parâmetro J_s e quanto menores forem a tensão vertical total e o intercepto de coesão.

Como exemplo, considere-se uma areia de $c' = 10$ kPa, $\sigma_v = 60$ kPa e tratada com um jato de parâmetro $J_s = 30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$. Com a variação do ângulo de atrito, variam a resistência ao cisalhamento do solo e o diâmetro teórico da coluna (tab. 6.5).

Tabela 6.5 – Para diferentes valores do ângulo de atrito, resistência ao cisalhamento drenado de areia com $c'=10$ kPa e submetida a $\sigma_v=60$ kPa, e respectivos diâmetros teóricos resultantes do seu tratamento com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$.

ϕ' (°)	s (kPa)	D (m)
25	38,0	1,32
27	40,6	1,29
30	44,6	1,24
32	47,5	1,21
35	52,0	1,17
40	60,3	1,10
42	64,0	1,07
45	70,0	1,04

A sensibilidade do diâmetro teórico da coluna a variações do ângulo de atrito é mostrada na *fig. 6.5*.

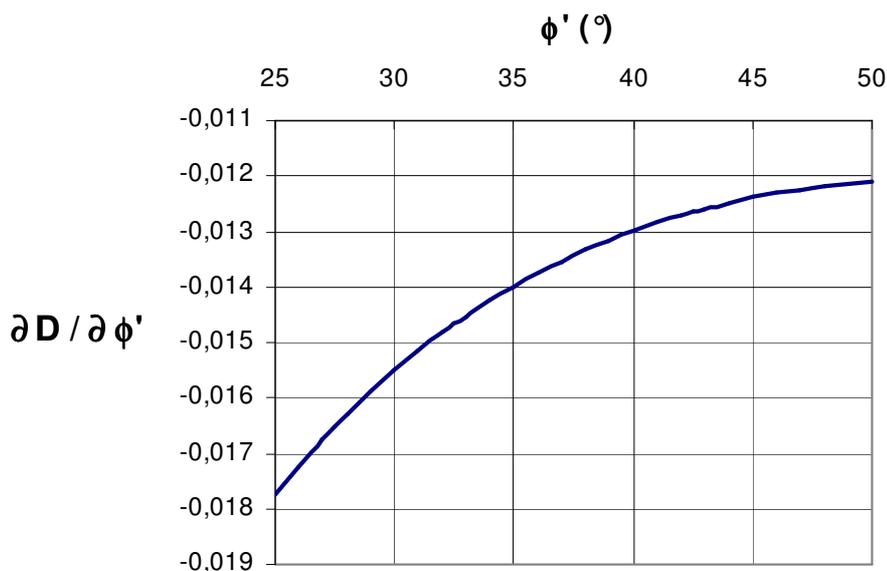


Figura 6.5 – Sensibilidade do diâmetro teórico das colunas a variações do ângulo de atrito de areia com $c'=10$ kPa e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5}\text{s}^{-0,5}$.

A *tab. 6.6* mostra as reduções no diâmetro teórico das colunas em função de acréscimos no ângulo de atrito das areias, sejam estas fofas ou compactas.

Tabela 6.6 – Variações do diâmetro teórico da coluna decorrentes de variações no ângulo de atrito de areia com $c'=10$ kPa e $\sigma_v=60$ kPa, tratada com parâmetro $J_s=30 \text{ m}^{1,5} \text{ s}^{-0,5}$.

ϕ' de 25 para 27°				ϕ' de 30 para 32°			
$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)	$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)
-0,017	6,83	-0,03	-2,61	-0,015	6,39	-0,03	-2,45
ϕ' de 25 para 30°				ϕ' de 30 para 35°			
$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)	$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)
-0,017	17,54	-0,08	-6,26	-0,015	16,51	-0,07	-5,93
ϕ' de 40 para 42°							
$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)				
-0,013	6,10	-0,03	-2,34				
ϕ' de 40 para 45°							
$\partial D/\partial \phi'$	$\Delta s/s$ (%)	ΔD (m)	$\Delta D/D$ (%)				
-0,013	16,00	-0,06	-5,76				

Neste exemplo, o aumento de 2° no ângulo de atrito faz com que as colunas executadas em areia fofa ou compacta tenham o seu diâmetro reduzido em 3 cm. Com o aumento de 5° no ângulo de atrito, as reduções de diâmetro giram em torno de 7 cm.

6.6 ÁBACOS COMPARATIVOS

Para análise comparativa, as variações percentuais do diâmetro teórico das colunas em relação às variações específicas dos parâmetros de tratamento e da resistência ao cisalhamento dos terrenos são apresentadas num único ábaco, de acordo com o tipo de solo (*fig. 6.6*).

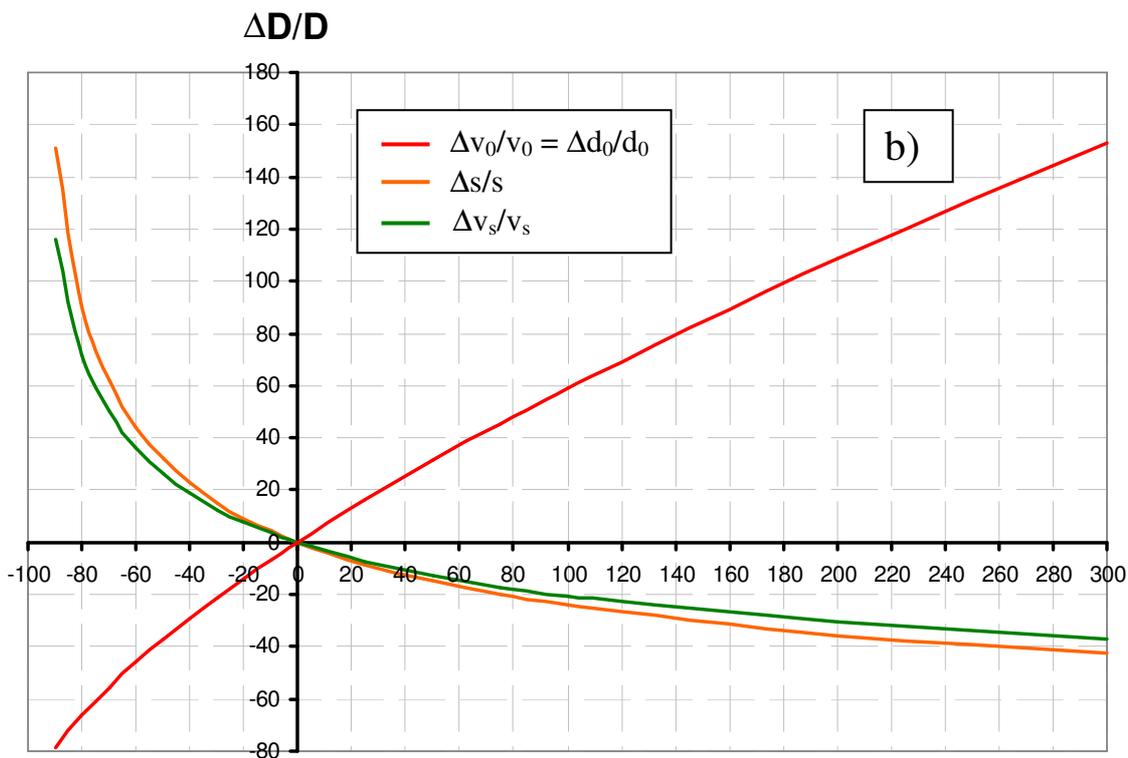
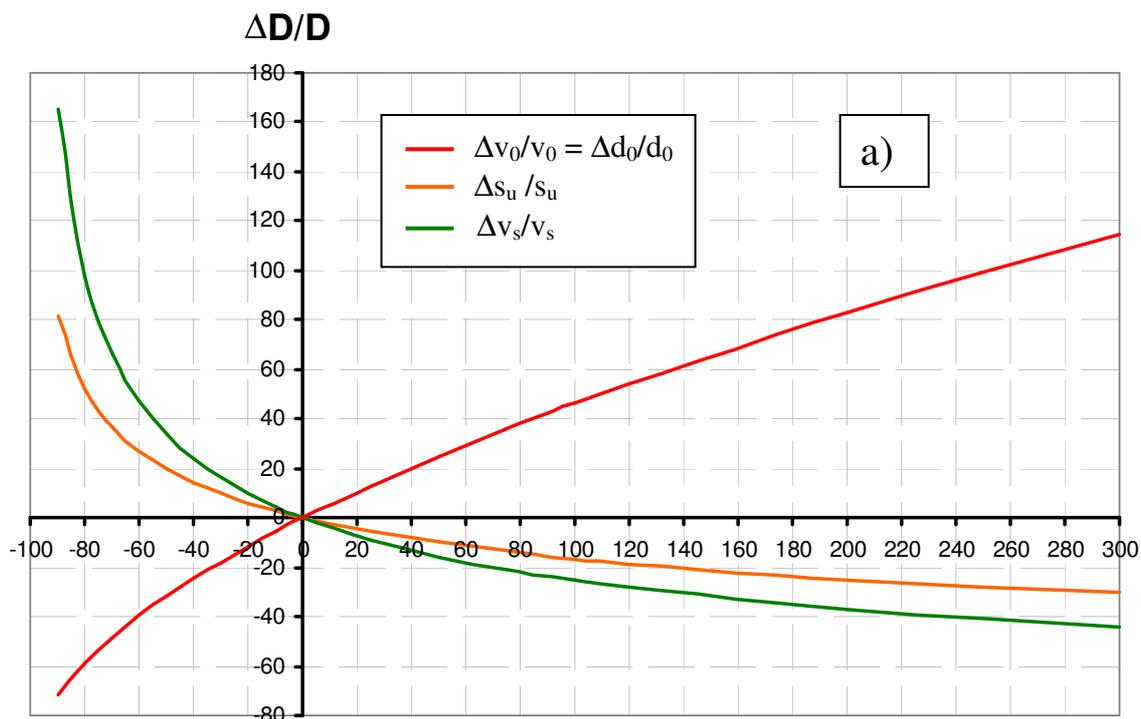


Figura 6.6 – Variações percentuais do diâmetro teórico das colunas em relação às variações específicas dos parâmetros de tratamento (velocidade inicial do jato, diâmetro dos bicos e velocidade de extração) e da resistência ao cisalhamento dos solos a) argilosos e b) arenosos.

Um dos requisitos fundamentais para o sucesso da aplicação do *jet grouting* é o controle rigoroso dos parâmetros de tratamento durante a execução das colunas. A empresa executora deve proceder ao jateamento mantendo sob controle a capacidade erosiva do jato de calda²⁴.

A análise paramétrica do método proposto ressalta a importância da correta atribuição, em campo, dos parâmetros de tratamento pré-estabelecidos em projeto. Imprecisões na velocidade de extração (sobretudo no tratamento de solos argilosos), na velocidade inicial do jato e no diâmetro dos bicos (principalmente em solos arenosos) podem alterar significativamente o diâmetro das colunas.

Além disso, demonstra-se que variações das características mecânicas dos solos têm também grande influência sobre o diâmetro das colunas de *jet grouting*. Como consequência, a variabilidade natural da resistência do solo conduz a erros de previsão nada desprezíveis, embora, de modo geral, inferiores aos resultantes de igual variação específica de algum dos parâmetros de tratamento (velocidade de extração, velocidade inicial do jato ou diâmetro dos bicos).

²⁴ É possível controlar os parâmetros de tratamento em tempo real, através de um sistema automático de aquisição de dados instalado na perfuratriz. Assim, a velocidade inicial do jato pode ser facilmente inferida através da vazão ou do volume de calda jateado por metro linear de coluna. Já os bicos devem ser avaliados periodicamente e inutilizados tão logo seja constatado o aumento do seu diâmetro (desgaste por abrasão).

7. QUALIDADE DE PREVISÃO DO MÉTODO TEÓRICO SIMPLIFICADO DIANTE DA VARIABILIDADE NATURAL DOS SOLOS

7.1 PRINCÍPIOS

No *capítulo 5* procurou-se determinar a qualidade do método teórico simplificado examinando o seu ajuste à realidade. Um primeiro critério seria, obviamente, um alto coeficiente de determinação na correlação entre diâmetros medidos e calculados. Esse coeficiente, no entanto, não é alto. Para os tratamentos em solos argilosos, o confronto entre os dados experimentais e as correspondentes previsões apresentou um R^2 de 0,154; para as colunas executadas em solos arenosos, este valor é igual a 0,623.

Neste capítulo, procura-se mostrar que tal fato pode ser consequência da variabilidade das características mecânicas do solo, e não de uma eventual inadequação do modelo proposto.

7.2 ADERÊNCIA ENTRE A REALIDADE E O MODELO PROPOSTO

Um dos fatores mais importantes que governam o diâmetro das colunas, conforme mostrado na análise de sensibilidade (*capítulo 6*), é a resistência do solo. Essa resistência, nos depósitos naturais, é claramente não determinística. Dessa forma, quando se utilizam valores determinísticos de resistência na expressão do método teórico simplificado está-se descartando o efeito da aleatoriedade das resistências sobre os diâmetros das colunas. Dado que a variabilidade das resistências no campo é inexorável, deixa de fazer sentido a comparação de diâmetros para cada coluna e para cada profundidade. De fato, as correlações dos diâmetros previstos pelo método com diâmetros médios medidos apresentam coeficientes de determinação bem mais elevados do que aqueles obtidos quando a correlação é feita para diâmetros referenciados a profundidades e colunas específicas.

Pode-se também comparar histogramas de diâmetros ou, melhor ainda, gráficos de frequência relativa acumulada. Estes últimos eliminam a arbitrariedade da escolha de intervalos para os histogramas. Esses recursos permitem conduzir alguns testes tradicionais de qualidade de ajuste do modelo proposto à realidade.

Para completar o espectro dos testes, aplicou-se o método teórico simplificado também a resistências geradas aleatoriamente. Para tanto, as resistências determinísticas anteriormente utilizadas foram adotadas como valores médios de uma distribuição normal. A variabilidade natural das características mecânicas dos solos foi expressa através do coeficiente de variação, adotado com base na literatura (*tab. 7.1*) e na dispersão observada nos resultados de resistência não-drenada da argila siltosa de Barcelona (*fig. 5.1*).

Tabela 7.1 – Variabilidade natural dos parâmetros de resistência dos solos arenosos e argilosos.

Autor	Tipo de solo	Parâmetro	Coefficiente de variação
Lumb (1966)	Arenoso	$\text{tg } \phi'$	0,14 a 0,23
Meyerhof (1970)	Arenoso	$\text{tg } \phi'$	0,10 a 0,15
Schultze (1975)	Argiloso	s_u	0,25 a 0,40

Dessa forma, nas comparações há sempre três curvas, correspondentes a diâmetros medidos, diâmetros previstos a partir de resistências determinísticas e diâmetros previstos a partir de resistências simuladas probabilisticamente. Nas legendas essas curvas são identificadas respectivamente por “*medidos*”, “*determinísticos*” e “*probabilísticos*”.

Apresenta-se, na *fig. 7.1*, o histograma para os solos argilosos. A simulação de resistências foi conduzida para um coeficiente de variação de 40%.

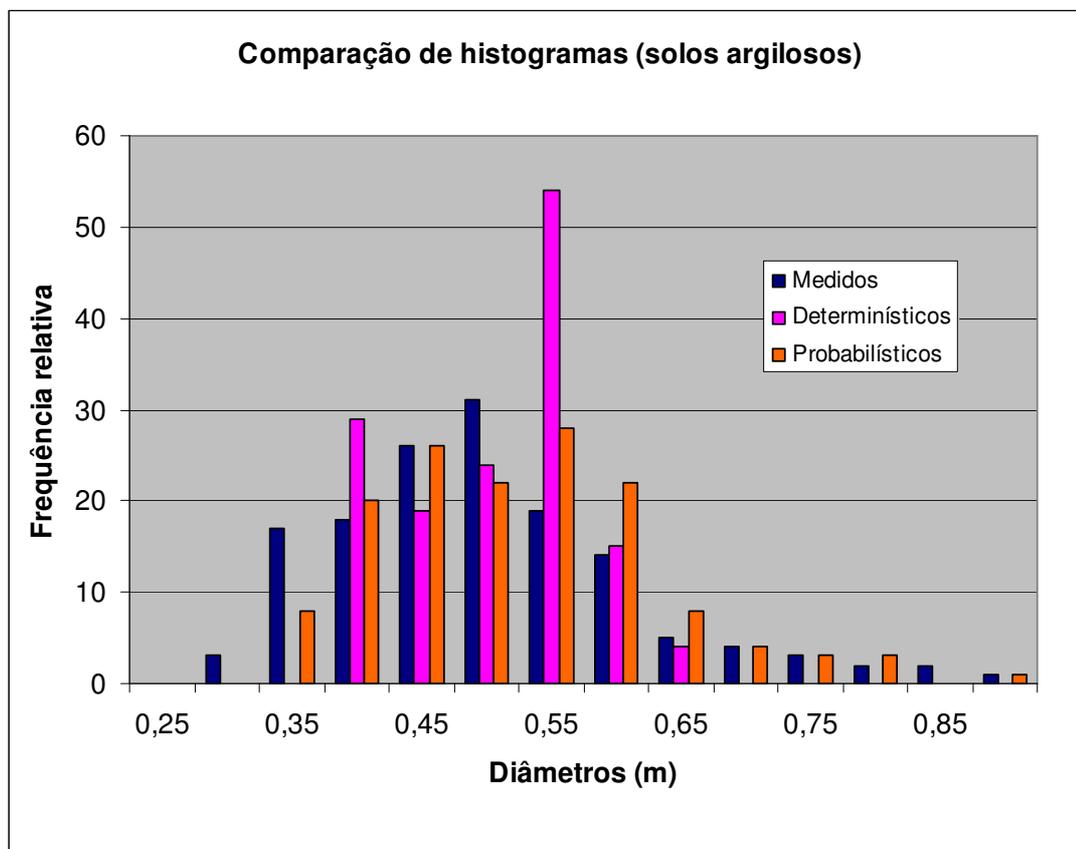


Figura 7.1 – Para os solos argilosos, histograma dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).

Na *fig. 7.2* estão apresentadas as respectivas curvas de frequência relativa acumulada.

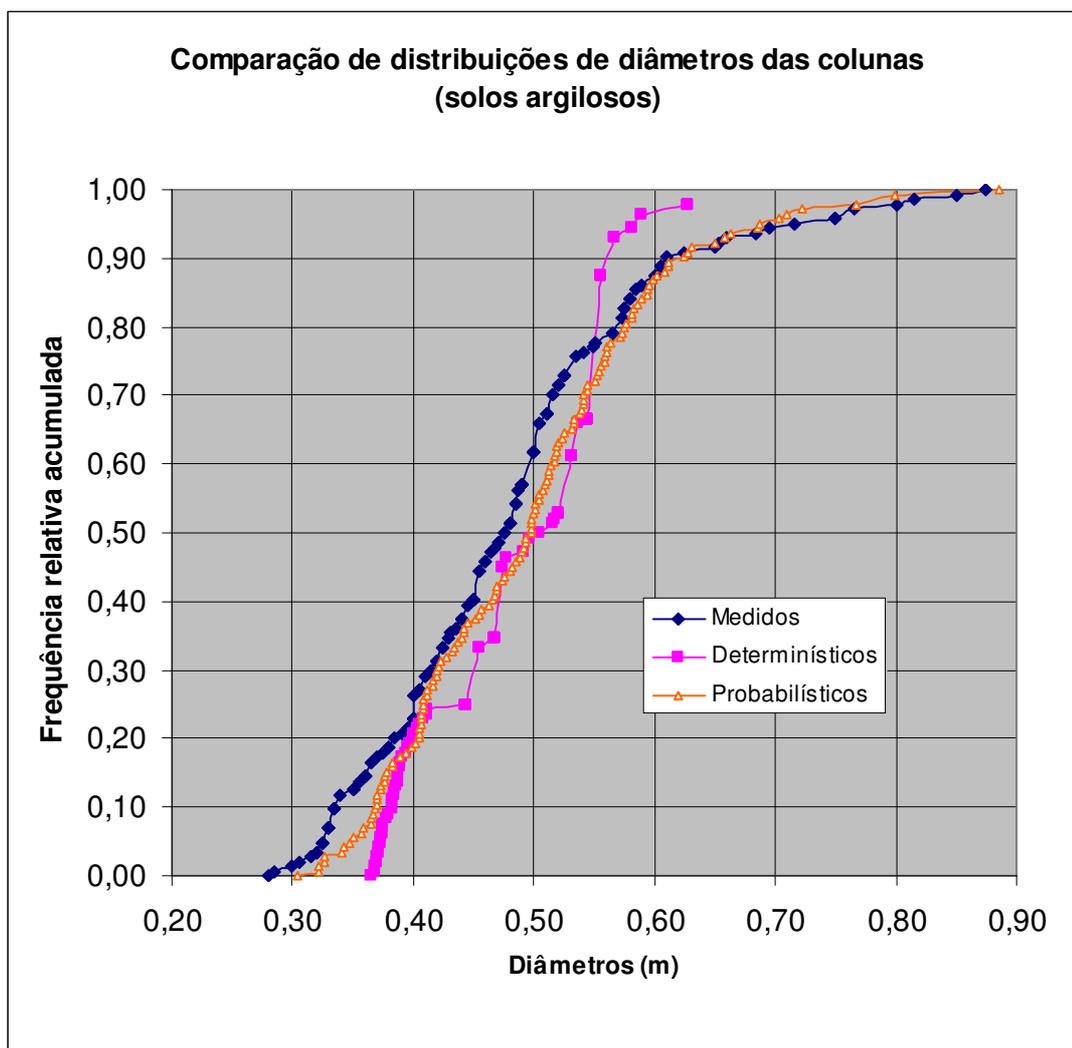


Figura 7.2 – Para os solos argilosos, curvas de frequência relativa acumulada dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).

O exame das *fig. 7.1* e *7.2* confirma a dificuldade em prever o diâmetro de uma coluna específica, a uma profundidade específica a partir da resistência determinística.

A aderência entre a realidade e o modelo proposto pode ser avaliada pelo teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov (Benjamin e Cornell, 1970), que se baseia na estatística D_2 , o maior valor absoluto da diferença entre as ordenadas das curvas de frequência relativa acumulada (*fig. 7.2*). A hipótese H_0 é que o modelo represente a

realidade. Aceita-se H_0 se a estatística D_2 tiver um valor menor ou igual a c , o valor crítico, obtido da distribuição de D_2 para um certo nível de significância (em geral adota-se 5%).

No caso dos campos de prova em solos argilosos o tamanho da amostra é 145. Para essa situação e para nível de significância de 5% encontra-se $c = 0,113$ (Benjamin e Cornell, 1970). Aceita-se H_0 , no nível de significância de 5%, se $D_2 \leq 0,113$.

A partir da *fig. 7.2* obtém-se $D_2 = 0,188$ para a curva “*determinísticos*” e $D_2 = 0,097$ para a curva “*probabilísticos*”. Tal resultado confirma que o método teórico simplificado é, de fato, um bom modelo da realidade. A não consideração da variabilidade da resistência dos solos argilosos reduz a aderência do modelo proposto à realidade, mas a *fig. 5.4* confirma que ele permite, ainda assim, boas previsões de diâmetros médios. Vale lembrar que a variabilidade dos diâmetros na obra terá que ser estudada e controlada, de forma a minimizar o seu impacto na probabilidade de desempenho insatisfatório, seja do ponto de vista estrutural, seja do ponto de vista de estanqueidade, dependendo da finalidade do tratamento. As simulações aqui apresentadas oferecem uma primeira idéia sobre uma possível via de pesquisa sobre o tema.

Apresenta-se, na *fig. 7.3*, o histograma para os solos arenosos. A simulação de resistências foi conduzida para um coeficiente de variação de 15%.

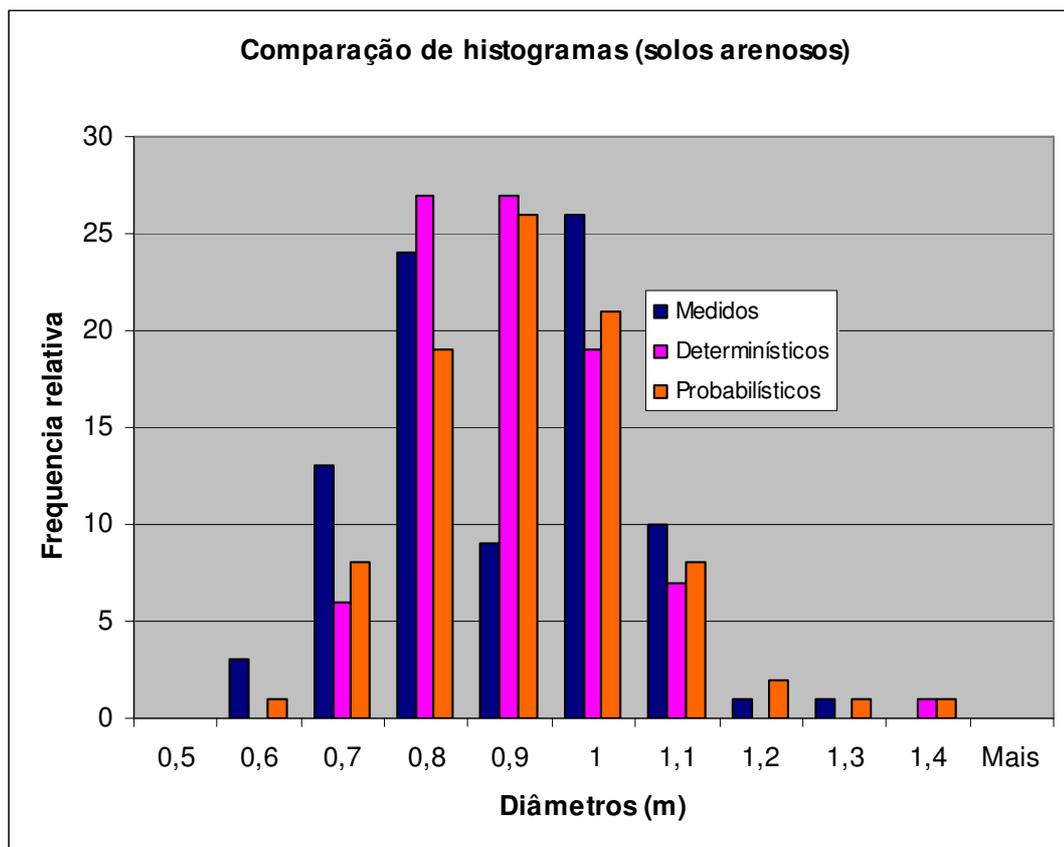


Figura 7.3 – Para os solos arenosos, histograma dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).

Na *fig. 7.4* estão apresentadas as respectivas curvas de frequência relativa acumulada.

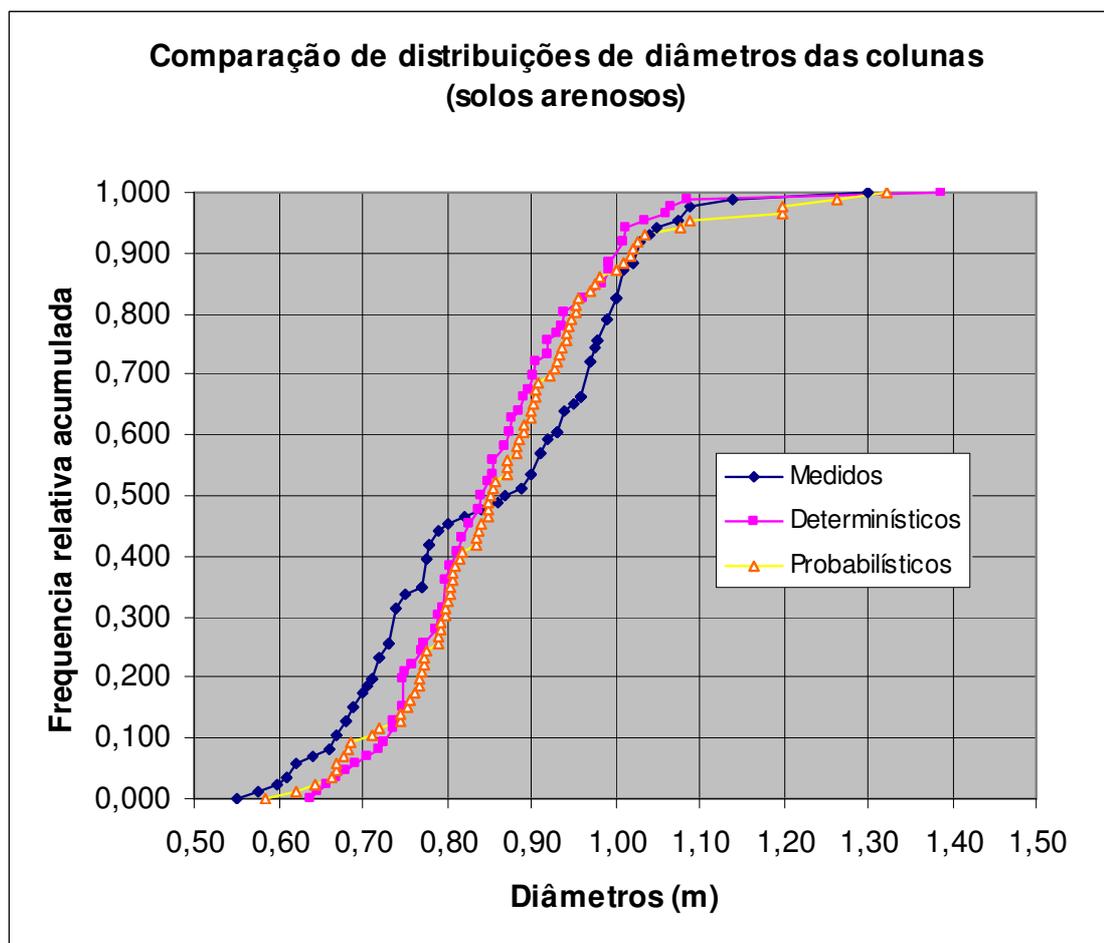


Figura 7.4 – Para os solos arenosos, curvas de frequência relativa acumulada dos diâmetros medidos e previstos (a partir de resistências determinísticas e de resistências simuladas probabilisticamente).

No caso dos campos de prova em solos arenosos o tamanho da amostra é 87. Para essa situação e para nível de significância de 5% encontra-se $c = 0,146$ (Benjamin e Cornell, 1970). Aceita-se H_0 , no nível de significância de 5%, se $D_2 \leq 0,146$.

A partir da *fig. 7.4* obtém-se $D_2 = 0,198$ para a curva “*determinísticos*” e $D_2 = 0,186$ para a curva “*probabilísticos*”. Como no caso dos solos argilosos, a incorporação da variabilidade das resistências aproxima o modelo da realidade, embora neste caso não o suficiente para a aceitação da hipótese H_0 no nível de significância de 5%, o que sugere que a variabilidade natural da resistência dos solos nos campos de prova

analisados é possivelmente maior do que a adotada. De fato, para uma simulação com coeficiente de variação de 20% obteve-se $D_2 = 0,139$.

Resultados qualitativamente similares aos do teste de Kolmogorov-Smirnov foram obtidos, tanto para solos argilosos quanto para solos arenosos, com a utilização do teste χ^2 de aderência estatística.

As conclusões acima colocam em relevo a necessidade de bem conhecer a variabilidade dos parâmetros de resistência, para poder garantir desempenho satisfatório ao tratamento com *jet grouting*.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O *jet grouting* é uma das técnicas de tratamento de solos mais utilizadas em todo o mundo. Com o jateamento de um fluido cimentante a alta velocidade, é possível executar, *in situ* e sem a necessidade de escavações, corpos de solo-cimento aproximadamente cilíndricos, as chamadas *colunas de jet grouting*.

As aplicações típicas da tecnologia incluem a execução de barreiras impermeáveis, de sistemas de contenção para escavações a céu aberto e de escudos de pré-revestimento para a construção de túneis.

Um dos principais indicadores do resultado dos tratamentos de *jet grouting* em todos os seus campos de aplicação é o diâmetro das colunas. Entretanto, para a execução de colunas com o diâmetro desejado, a escolha dos parâmetros de tratamento é feita atualmente com base em regras empíricas nem sempre pertinentes.

A partir de análises publicadas, em 2000, por Croce e Flora (*fig. 4.1*), o autor deste trabalho se propôs a demonstrar que existe um *parâmetro J*, função dos parâmetros de tratamento e que representa, por si só, toda a ação do jato, bem como um *parâmetro S* capaz de traduzir, sozinho, a correspondente ação resistente do solo. E, assim, o *diâmetro da coluna*, visto como o resultado da interação jato-solo, nada mais seria do que uma *função de J e S*.

A comprovação dessa tese é conduzida por meio da validação experimental do **método teórico simplificado de previsão do diâmetro das colunas de *jet grouting* (sistema monofluido)** aqui apresentado.

Foram definidas *equações de caráter geral* para os solos arenosos e argilosos (eq. 38 e 39) que traduzem com fidelidade a análise racional do fenômeno físico de interação jato-solo feita por Modoni *et al.* (2006). De fato, o método simplificado fornece valores de diâmetro muito semelhantes àqueles obtidos estabelecendo inter-relações entre as diversas expressões analíticas do modelo de Modoni (*fig. 4.8*). O que

distingue o método proposto do modelo a partir do qual foi desenvolvido é a sua capacidade de orientar, de forma simples e rápida, a escolha dos parâmetros de tratamento para a obtenção, em campo, dos diâmetros de projeto.

A validação do método teórico simplificado foi realizada com base em resultados de tratamentos executados em Barcelona, publicados pelo autor (Carletto *et al.*, 2007), e em inúmeros outros dados experimentais compilados na literatura.

No total, foram analisadas 232 medições de campo, das quais 145 em solos argilosos e 87 em solos arenosos. Todas elas são resultantes de observação direta, isto é, as colunas foram expostas e os seus diâmetros, medidos a diferentes profundidades. Outro aspecto comum a todos os dados experimentais é a existência de investigações do subsolo que permitiram a estimativa dos parâmetros geotécnicos de interesse (*tab. 5.1 e 5.4*), além de informações precisas a respeito dos parâmetros de tratamento utilizados (*tab. 5.2, 5.3 e 5.5*).

A comparação entre cada medida de diâmetro e a correspondente previsão fornecida pelo método proposto apresentou uma considerável dispersão (*fig. 5.3 e 5.5*).

Através de cálculos paramétricos, demonstrou-se a grande sensibilidade do diâmetro teórico da coluna a variações tanto dos parâmetros de tratamento quanto das características mecânicas dos terrenos (*fig. 6.6*). Entretanto, ao contrário das variáveis operacionais, que podem ser controladas do início ao fim do tratamento, os parâmetros do solo podem ser apenas estimados a partir das técnicas usuais de investigação geotécnica. Como consequência, a variabilidade da resistência ao cisalhamento do solo, constituindo-se na maior incerteza de parâmetro do método teórico simplificado, pode conduzir a erros de previsão nada desprezíveis.

Para mostrar que os erros de previsão constatados neste trabalho são atribuíveis à heterogeneidade dos terrenos e não a uma eventual inadequação de modelo, aplicou-se o método teórico simplificado também a resistências do solo geradas aleatoriamente. As resistências determinísticas anteriormente utilizadas foram

tomadas como valores médios de uma distribuição normal, adotando-se um coeficiente de variação com base na literatura (*tab. 7.1*) e na análise dos poucos ensaios de investigação publicados para os solos dos diferentes campos de prova. A partir daí, testes estatísticos (χ^2 e Kolmogorov-Smirnov) comprovaram a aderência entre a realidade e o modelo proposto, tanto para os tratamentos em solos argilosos quanto para aqueles em solos arenosos (*item 7.2*), desde que explicitamente considerada a variabilidade da resistência do solo. Quando essa variabilidade não pode ser considerada, o método proposto oferece uma boa previsão da média do diâmetro a ser obtido com o tratamento (*fig. 5.4*, $R^2 = 0,426$; e *fig. 5.6*, $R^2 = 0,864$).

Verificara-se, além disso, que a dispersão na comparação entre diâmetros previstos e medidos era maior para os tratamentos em solos argilosos (*fig. 5.3*, $R^2 = 0,154$) do que para aqueles em solos arenosos (*fig. 5.5*, $R^2 = 0,623$). A análise de sensibilidade, por si só, conduziria a uma conclusão contrária, pois demonstrou que iguais erros percentuais na inferência de s ou s_u geram erros de previsão maiores para as colunas executadas em solos arenosos (*fig. 6.3*). Entretanto, a variabilidade natural do ângulo de atrito das areias é menor do que a da resistência ao cisalhamento não-drenado das argilas (*tab. 7.1*). Como o parâmetro de resistência das argilas é mais variável em campo, justificam-se os maiores desvios associados à previsão do diâmetro das colunas executadas em solos argilosos.

Ainda com base na análise de sensibilidade, constatou-se que imprecisões na atribuição das variáveis operacionais podem alterar significativamente o resultado dimensional do tratamento (*fig. 6.6*). Variações na velocidade de extração (sobretudo no tratamento de solos argilosos), na velocidade inicial do jato e no diâmetro dos bicos (principalmente em solos arenosos) têm grande influência sobre o diâmetro das colunas. Especial atenção, portanto, deve ser dedicada ao controle do processo executivo. É responsabilidade da empresa responsável pelo *jet grouting* respeitar a modalidade executiva prevista em projeto, de modo que o parâmetro J pré-estabelecido seja efetivamente aplicado na realização do tratamento.

Obviamente, devido à complexidade do fenômeno induzido pelo jateamento dos solos, alguns parâmetros do método (coeficiente A e expoentes α e β) devem ser calibrados comparando previsões a resultados de campo. Os valores destes parâmetros foram propostos na *tab. 4.4* com base no limitado número de dados experimentais atualmente disponível. De qualquer forma, ao definir os parâmetros principais (J e S) e a sua correlação com o diâmetro da coluna, o método simplificado constitui uma base teórica para a interpretação de resultados obtidos em campos de prova. Assim, os seus coeficientes e expoentes podem ser facilmente calibrados a partir da aquisição de novos dados experimentais.

Observa-se que os valores propostos de A , α e β refletem algumas premissas, relativas tanto ao modelo de Modoni quanto ao método simplificado. No modelo de Modoni, por exemplo, a resistência ao cisalhamento do solo foi avaliada na sua condição indeformada (antes do tratamento). Além disso, para os solos arenosos, considerou-se tal resistência no plano horizontal, independentemente da direção em que a coluna é executada, e as eventuais pressões neutras decorrentes de nível d'água ou rede de percolação foram desprezadas. Essas hipóteses simplificadoras merecem revisão em estudos futuros. Quanto ao método proposto, ressalta-se que as características mecânicas dos solos foram inferidas através dos ensaios de campo e de laboratório indicados nas *tab. 5.1* e *5.4*, e sabe-se que a resistência não-drenada dos solos argilosos, em particular, é bastante suscetível ao método de investigação utilizado. Enfim, os valores indicados de β decorrem das faixas de s e s_u propostas na *tab. 4.3* e, portanto, estão sujeitos a ajustes para tratamentos a maiores profundidades.

O diâmetro da coluna, assim como as características mecânicas do material consolidado, constitui um indicador do resultado do tratamento universalmente utilizado por ser de imediata compreensão e de fácil medição. Convém destacar, entretanto, que o êxito da aplicação do *jet grouting* não depende somente desses indicadores, mas, sobretudo, da resposta global do inteiro volume tratado. Oportunos cálculos de verificação devem ser realizados, levando em conta a finalidade específica do tratamento e os problemas gerados pela variabilidade fisiológica das

características das colunas. Aconselha-se, para tanto, uma abordagem de tipo probabilística que, a partir dos valores médios das grandezas geométricas e mecânicas (diâmetro das colunas, resistência do material consolidado etc.) e da sua variabilidade, permita que os projetos de *jet grouting* incluam uma estimativa da margem de risco para o tratamento como um todo.

Além de recomendar o desenvolvimento de modelos probabilísticos para o *jet grouting*, o autor recorda que o método de previsão apresentado foi desenvolvido exclusivamente para os tratamentos realizados com o sistema monofluido. Portanto, pesquisas deverão ser realizadas com o objetivo de modelar o efeito adicional de jatos de água e/ou ar comprimido no diâmetro das colunas. Só assim será possível obter uma ferramenta de projeto análoga que possa ser utilizada para os tratamentos com os sistemas bi e trifluido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMENTO, M. ; KOSHIMA, A. ; ZIRLIS, A.C. Reforço do terreno. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: teoria e prática.** São Paulo: Pini, 1998. p.641-56.

BELL, A.L. **Engineering properties of soils.** London: E & FN Spon, 1993.

BELLONI, L.G. et al. Efficienza del trattamento jet-grouting nei terreni della laguna veneta. In: CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA, 23., Padova, 2007.

BENJAMIN, J.R. ; CORNELL, C.A. **Probability, Statistics, and Decisions for Civil Engineers.** McGraw-Hill Book Company, 1970.

BERGSCHNEIDER, B. ; WALZ, B. Jet grouting – range of the grouting jet. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 13., Prague, 2003. **Proceedings.** Prague: Vanicek et al. (eds.), CGTs, 2003. p.53-6.

BIANCO, B. ; SANTORO, V.M. L'importanza dei campi prova e delle sperimentazioni nella progettazione dei trattamenti colonnari – l'esempio delle fondazioni del viadotto Rio Matzeu della nuova SS 131 variante nei pressi di Cagliari. In: CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA, 19., Pavia, 1995.

BOUSSINESQ, J. Théorie de l'écoulement tourbillant. In: **Mémoires présentés par divers savants.** Paris: Académie des Sciences-Institut de France, 1877. vol. 23, p. 46-50.

CARLETTO, M.F.W. **A influência dos parâmetros do jet grouting no solo tratado.** 2003. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CARLETTO, M.F.W. ; MODONI, G. ; CROCE, P. Previsione del diametro delle colonne di jet grouting. In: INCONTRO ANNUALE DEI RICERCATORI DI GEOTECNICA, Salerno, 2007.

CHUPIN, O. ; SAIYOURI, N. ; HICHER, P.Y. Numerical modeling of cement grout injection in saturated porous media. In: ASCE ENGINEERING MECHANICS CONFERENCE, 16., Seattle, 2003.

COVIL, C.S. ; SKINNER, A.E. Jet grouting – a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. **Grouting in the ground.** London: Thomas Telford, 1994. p.605-27.

CROCE, P. ; FLORA, A. Analysis of single-fluid jet grouting. **Géotechnique**, London, v.50, n.6, p.739-48, 2000.

CROCE, P. ; FLORA, A. ; MODONI, G. **Jet grouting: tecnica, progetto e controllo.** Benevento: Hevelius, 2004.

DABBAGH, A.A. ; GONZALEZ, A.S. ; PEÑA, A.S. Soil erosion by a continuous water jet. **Soils and Foundations**, Tokyo, v.42, n.5, p.1-13, 2002.

FOX, R.W. ; McDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** Tradução de Ricardo Koury e Geraldo França. São Paulo: LTC, 2001. p.19-23.

GHETTI, A. **Idraulica.** Padova: Libreria Cortina, 1998.

HINZE, J.O. **Turbulence.** New York: McGraw Hill, 1948.

KANEMATSU, H. High pressure jet grouting method. **Civil Construction**, Doboku Sekoh, v.21, n.13, 1980.

LANGBEHN, W.K. The jet grouting method: applications in slope stabilization and landslide repair. **Master of Engineering report**. Berkeley: University of California, Dept. of Civil Engineering, 1986. p.72.

LUMB, P. The variability of natural soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v.3, n.2, p.74-97, 1966.

MEYERHOF, G.G. Safety factors in soil mechanics. **Canadian Geotechnical Journal**, v.7, n.4, p.349-55, 1970.

MIKI, G. Soil improvement by jet grouting. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SEMINAR ON SOIL IMPROVEMENT METHODS, 3., Singapore, 1985.

MIKI, G. ; NAKANISHI, W. Technical progress of the jet grouting method and its newest type: lecture notes. In: IN-SITU SOIL AND ROCK REINFORCEMENT. **Proceedings**. Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées, 1984. p.195-200.

MODONI, G. Jet Grouting. Diapositiva del corso “Consolidamento dei terreni e delle fondazioni”, Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Cassino, 2006.

MODONI, G. ; CROCE, P. ; MONGIOVÌ, L. Analisi e modellazione dei fenomeni indotti dal jet grouting. In: INCONTRO ANNUALE DEI RICERCATORI DI GEOTECNICA, Milano, 2001.

MODONI, G. ; CROCE, P. ; MONGIOVÌ, L. Theoretical modeling of jet grouting. **Géotechnique**, London, v.56, n.5, p.335-47, 2006.

NOVATECNA CONSOLIDAÇÕES E CONSTRUÇÕES S.A. Artigos técnicos a respeito das atividades da empresa. São Paulo, disponível em: <<http://www.novatecna.com.br/4000.htm>>. Acesso em: 25 abr. 2002.

NOVATECNA CONSOLIDAÇÕES E CONSTRUÇÕES S.A. Catálogo técnico. São Paulo, 2003.

PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2004.

PRANDTL, L. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. **Z. Angew. Math. Mech.**, Weinheim, n.5, p.136-9, 1925.

PRANDTL, L. **Führer durch die Strömungslehre**. Braunschweig: Vieweg, 1942.

SCHULTZE, E. Some aspects concerning the application of statistics and probability to foundation structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY IN SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 2., Aachen, 1975. **Proceedings**. v.4, p.457-94.

SHIBAZAKI, M. State of practice of jet grouting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUTING AND GROUND TREATMENT, 3., New Orleans, 2003. **Proceedings**. New Orleans: ASCE's Geo-Institute Grouting Committee, 2003. p.56-71.

SHIBAZAKI, M. The state of art in jet-grouting. In: SYMPOSIUM ON SOIL AND ROCK IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS, Milano, 1991. **Proceedings**. Milano: Società Italiana Gallerie, 1991. p.19-46.

STEIN, J. ; GRABE, J. Jet grouting tests and simulation. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 13., Prague, 2003. **Proceedings**. Prague: Vanicek et al. (eds.), CGTs, 2003. p.899-902.

TORNAGHI, R. Trattamento colonnare dei terreni mediante gettiniezione (Jet grouting). In: CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA, 17., Taormina, 1989.

VLEESHAUWER, P.de ; MAERTENS, J. Jet-grouting: state of the art in Belgium.
In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND IMPROVEMENT
GEOSYSTEMS – GROUTING, SOIL IMPROVEMENT AND GEOSYSTEMS
INCLUDING REINFORCEMENT, 4., Helsinki, 2000. **Proceedings.** Helsinki:
Finnish Geotechnical Society, 2000. p.145-56.

APÊNDICE

VISCOSIDADE TURBULENTA DOS FLUIDOS

1. PRINCÍPIOS DE HIDRODINÂMICA

Um *fluido* é definido como uma matéria que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento.

Considere-se o comportamento de um elemento fluido entre duas placas infinitas mostradas na *fig. I*.

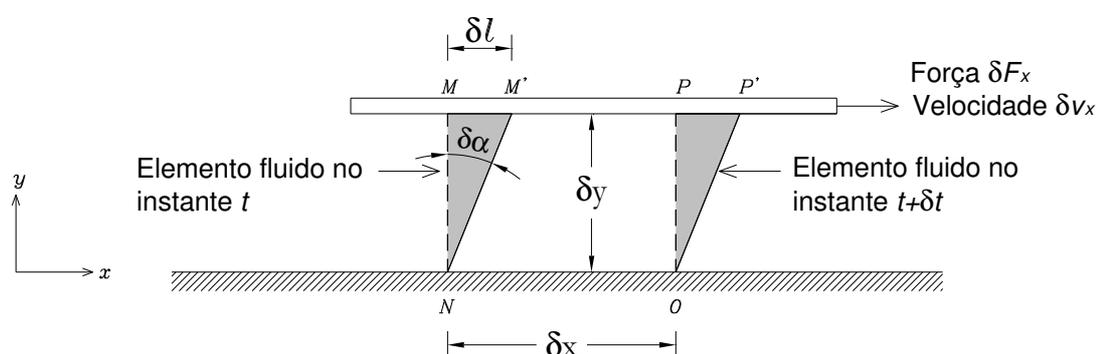


Figura I – Deformação de um elemento fluido (apud Fox e McDonald, 2001)

A placa superior move-se à velocidade constante δv_x , sob a influência de uma força também constante δF_x . A tensão de cisalhamento τ_{yx} aplicada ao elemento fluido é dada por:

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A_y \rightarrow \infty} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y}$$

onde δA_y é a área do elemento fluido em contato com a placa. Durante o intervalo de tempo δt , o elemento fluido é deformado da posição MNOP para a posição M'NOP'. A taxa de deformação do fluido é dada por:

$$\text{taxa de deformação} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt}$$

Para calcular a tensão de cisalhamento τ_{yx} é desejável expressar $d\alpha/dt$ em função de quantidades prontamente mensuráveis. Isso pode ser facilmente feito. A distância δl entre os pontos M e M' é dada por:

$$\delta l = \delta v_x \delta t$$

ou, alternativamente, para pequenos ângulos:

$$\delta l = \delta y \delta \alpha$$

Igualando-se estas duas expressões, obtém-se:

$$\frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta v_x}{\delta y}$$

Enfim, tomando os limites em ambos os lados da igualdade, tem-se:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{dv_x}{dy}$$

Dessa forma, o elemento fluido da *fig. I*, quando submetido à tensão de cisalhamento τ_{yx} , sofre uma taxa de deformação angular (*taxa de cisalhamento*) dada por dv_x/dy .

Os fluidos podem ser classificados, de modo geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação.

Os denominados *fluidos newtonianos* (a água é um exemplo) são aqueles nos quais, para um escoamento unidimensional laminar¹, a tensão de cisalhamento relaciona-se com o gradiente transversal de velocidade pela simples relação:

¹ Tem-se um regime *laminar* de escoamento quando as trajetórias das partículas em movimento são bem definidas e não se cruzam. O aumento da velocidade média do fluxo gera uma instabilidade no processo de contato entre correntes de diferentes velocidades, dando origem a um escoamento sob regime *turbulento*.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (I)$$

onde μ é um coeficiente característico do fluido, em determinada temperatura e pressão, denominado coeficiente de *viscosidade dinâmica* ou, apenas, *viscosidade*².

Para os *fluidos não-newtonianos*, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é constante. As caldas de cimento, utilizadas na maioria dos tratamentos de *jet grouting*, são fluidos *não-newtonianos*, especificados como *plástico Bingham*: comportam-se como um sólido até que uma tensão de cisalhamento mínima seja atingida e, só a partir daí, apresentam uma relação linear entre a tensão e a taxa de deformação. Além disso, estas suspensões são suscetíveis a um aumento da viscosidade aparente com o tempo devido à hidratação do cimento; entretanto, se o período entre o preparo e o jateamento da calda for relativamente curto, tal variação da viscosidade aparente pode ser desprezada.

2. COEFICIENTE DE VISCOSIDADE TURBULENTA

A viscosidade cinemática turbulenta da água pode ser avaliada através do modelo do comprimento de mistura de Prandtl (1925; 1942).

Para um escoamento turbulento, flutuações aleatórias e tridimensionais de velocidade transportam quantidade de movimento através das linhas de corrente do escoamento médio, aumentando a tensão de cisalhamento efetiva. As *tensões de cisalhamento turbulentas* assim originadas sobrepõem-se àquelas de origem viscosa (eq. I).

Considere-se, por simplicidade, um movimento bidimensional³ turbulento, com o escoamento médio paralelo ao eixo x e com as componentes flutuantes da velocidade v_x' , v_y' paralelas aos eixos x e y , respectivamente (*fig. II*).

² Dividindo-se o valor do coeficiente de viscosidade μ pela massa específica do fluido ρ_f , obtém-se o coeficiente de *viscosidade cinemática* ν . Este coeficiente tem a vantagem de não depender da unidade de massa (por exemplo, para a água a 20°C e 1 atm, ν é igual a 10^{-6} m²/s).

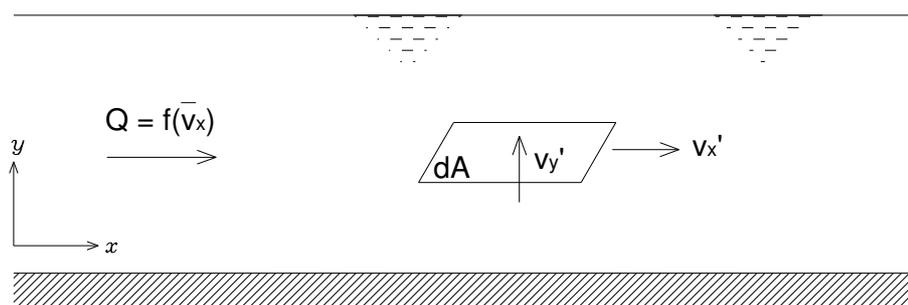


Figura II – Componentes flutuantes de um escoamento turbulento bidimensional (Prandtl, 1925 *apud* Ghetti, 1998)

Um elemento de superfície dA , normal ao eixo y , será continuamente atravessado por uma massa instantânea igual a $\rho_f v_y' dA$. Isso acontece em concomitância com uma variação da quantidade de movimento na direção x , em relação à condição média de base, igual a $\rho_f v_y' dA(0 - v_x')$, considerando que a massa transportada esgota a sua flutuação transversal cedendo (se v_x' é positivo) ou adquirindo (se v_x' é negativo) tal quantidade de movimento.

À variação da quantidade de movimento na direção x corresponde uma força tangencial instantânea ($dF_{yx}' = -\rho_f v_y' v_x' dA$), a qual dá origem, por unidade de área dA , a uma tensão cisalhante:

$$\tau_{yx}' = -\rho_f v_y' v_x'$$

Com a média temporal do produto das flutuações de velocidade obtém-se a tensão de cisalhamento média atuante na superfície.

$$\overline{\tau_{yx}'} = \overline{\tau_{xy}'} = -\rho_f \overline{v_x' v_y'} \quad (\text{II})$$

Note-se que, se as flutuações de velocidade fossem consideradas como fatos puramente casuais, não apenas os valores médios $\overline{v_x'}, \overline{v_y'}, \overline{v_z'}$ de cada componente mas

³ Um movimento é dito *bidimensional* quando o campo de velocidade é uma função das coordenadas espaciais x e y , sendo idêntico em todos os planos perpendiculares ao eixo z .

também os seus produtos $\overline{v_x'v_y'}, \overline{v_y'v_z'}, \overline{v_z'v_x'}$ seriam iguais a zero. Na verdade, uma certa correlação existe, e estes esforços originados pela turbulência apresentam valor não nulo.

Para o cálculo das componentes flutuantes, considere-se um campo fluido bidimensional cujo movimento de base é paralelo ao eixo x , com uma distribuição das velocidades médias $\overline{v_x}$ conforme indicada na *fig. III*.

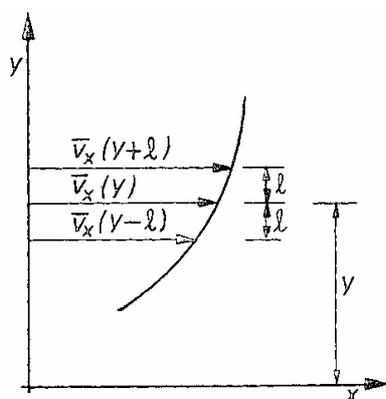


Figura III – Distribuição não-uniforme das velocidades médias num escoamento bidimensional, com movimento de base paralelo ao eixo x (Prandtl, 1925 *apud* Ghetti, 1998)

Prandtl propõe que uma partícula fluida, sujeita a flutuações de velocidade v_x' e v_y' , esgota o seu movimento *transversal* num percurso de comprimento médio l entre regiões de diferentes velocidades. Em analogia ao conceito de livre caminho médio molecular da teoria dos gases, define essa distância como o *comprimento de mistura*; sugere, ainda, que a variação de velocidade sofrida por uma partícula que se desloca pelo comprimento de mistura é proporcional a $l \cdot dv_x / dy$ (*fig. IV*).

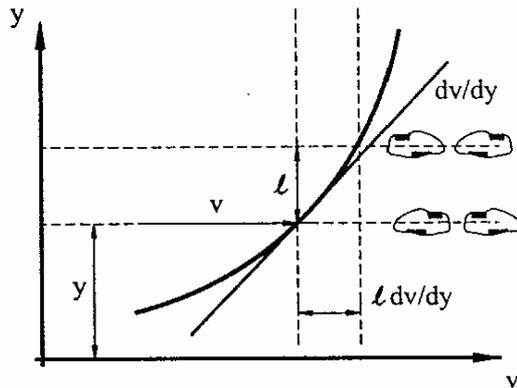


Figura IV – Comprimento médio de mistura turbulenta (Prandtl, 1925 *apud* Porto, 2004)

Complementando as hipóteses acima, Prandtl considera que as velocidades de flutuação longitudinal v_x' e transversal v_y' têm a mesma ordem de grandeza, isto é, a turbulência é isotrópica. Isso se deve ao fato físico pelo qual o encontro e o afastamento, ao longo do nível y , de duas partículas provenientes da flutuação com uma diferença de velocidade $2v_x'$ gera um movimento transversal de duas partículas deste nível com velocidade v_y' , de certo modo correspondente.

Logo:

$$|v_y'| \approx |v_x'| \approx l \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{III})$$

Convém salientar que, na flutuação do nível inferior em direção a y , portanto com velocidade positiva v_y' , tem-se predominantemente um valor negativo de v_x' ; por outro lado, na flutuação do nível superior rumo a y , com velocidade negativa v_y' , tem-se predominantemente um valor positivo de v_x' . Assim, o valor médio $\overline{v_x' v_y'}$ resulta:

$$\overline{v_x' v_y'} = -\rho |v_x'| |v_y'| \approx -\rho l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^2 \quad (\text{IV})$$

sendo ρ um *coeficiente de correlação*⁴ das componentes flutuantes da velocidade, de difícil avaliação mas que certamente é diferente de zero, como já observado.

Se o coeficiente de correlação for englobado no valor ainda não determinado do comprimento de mistura l , pode-se enfim dizer que:

$$\overline{v_x'v_y'} = -l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^2 \quad (\text{V})$$

e portanto resulta, com base na eq. (II):

$$\overline{\tau_{xy}'} = \rho_f l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^2 \quad (\text{VI})$$

A eq. (VI) trata-se da *fórmula de Prandtl* para o cálculo das tensões de cisalhamento induzidas pelos escoamentos turbulentos.

Comparando-se as tensões de cisalhamento que surgem por interação molecular (eq. I) àquelas de origem turbulenta (eq. VI), constata-se que ambas dependem do gradiente da velocidade média (movimento de base), embora com leis diversas. Pode-se definir, portanto, em analogia ao coeficiente de viscosidade laminar μ , um coeficiente de *viscosidade dinâmica turbulenta* η , já proposto por Boussinesq (1877), de tal modo que a eq. (VI) resulte:

$$\overline{\tau_{xy}'} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{VII})$$

obtendo-se, por comparação:

⁴ O coeficiente de correlação é a medida da dependência linear entre duas variáveis aleatórias X e Y; se $\rho = \pm 1$, uma observação de X permite a perfeita previsão de Y.

$$\eta = \rho_f |v_y'| l = \rho_f l^2 \left| \frac{dv_x}{dy} \right| \quad (\text{VIII})$$

Define-se, ainda, um coeficiente de *viscosidade cinemática turbulenta*, análogo ao coeficiente ν (ver nota 2):

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\rho_f} = l |v_y'| = l^2 \left| \frac{dv_x}{dy} \right| \quad (\text{IX})$$

Note-se que os coeficientes de viscosidade turbulenta η e ε , além de serem grandezas características do fluido, são suscetíveis às flutuações (isto é, são funções do instante e do ponto de medição).

A teoria dos fenômenos de turbulência livre⁵ encontra uma particular simplificação em hipóteses formuladas pelo próprio Prandtl (1942).

No caso de um *jato plano*, Prandtl observa que a largura $b(x)$ do jato cresce proporcionalmente à distância x (fig. V).

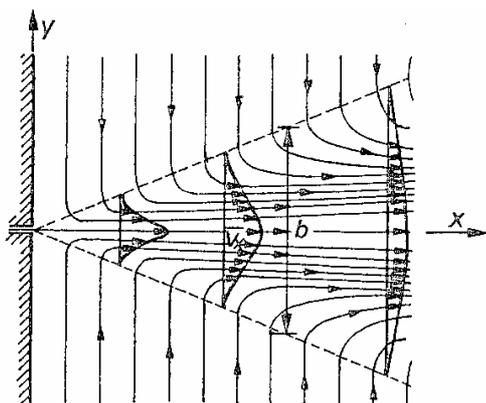


Figura V – Evolução das características geométricas do jato submerso (Prandtl, 1942 apud Ghetti, 1998)

⁵ A turbulência é *livre* quando se manifesta no interior do próprio fluido em movimento pela instabilidade do processo de contato entre correntes de diferentes velocidades. É o fenômeno turbulento que ocorre nos jatos, por exemplo. Contrapõe-se à turbulência *de parede*, a qual se manifesta pelo fato que, aproximando-se de uma parede, o movimento é necessariamente retardado (a velocidade no contato é nula), gerando, assim, uma instabilidade no movimento laminar.

Analogamente, para um *jato cilíndrico* de diâmetro $d(x)$:

$$d \sim x \quad (\text{X})$$

Prandtl admite que, em cada seção transversal do jato cilíndrico, a flutuação transversal v_y' é proporcional à máxima diferença das velocidades longitudinais ($v_{x_{\max}} - v_{x_{\min}}$), e o comprimento de mistura l proporcional ao diâmetro d .

Além disso, considerando-se que o processo ocorra à pressão uniforme, a quantidade de movimento nas seções transversais do jato deverá ser independente de x :

$$\Omega = \rho_f \int_{r=0}^{\infty} v_x^2 2\pi r dr = \text{constante} (x) \quad (\text{XI})$$

Admite-se, portanto, que os sucessivos perfis transversais de velocidade são semelhantes entre si, permitindo a criação de adimensionais com a introdução de oportunas escalas de redução.

Pode-se dizer, com $k = \text{constante}$:

$$v_{x_{\max}} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\int_{r=0}^{\infty} v_x^2 r dr}{k}}$$

e, pelas eq. (X) e (XI):

$$v_{x_{\max}} \sim \frac{1}{x} \quad (\text{XII})$$

Assim, o coeficiente de viscosidade cinemática ε (eq. IX), considerando que $v_{x_{\max}} \sim 1/x$ (eq. XII), $v_{x_{\min}} \cong 0$ e $d \sim x$ (eq. X), resulta, com $k' = \text{constante}$:

$$\varepsilon = k' d v_{x_{\max}} = \text{constante } (x) \quad (\text{XIII})$$

Anos mais tarde, Hinze (1948) determina analiticamente a distribuição transversal da velocidade média de um jato d'água cilíndrico submerso. Ao longo do raio r , medido a partir do eixo do jato, num ponto distante x do bico, a distribuição transversal das velocidades médias⁶ é:

$$\frac{v_x}{v_{x_{\max}}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{v_{x_{\max}} r^2}{\kappa \varepsilon x} \right]^2} \quad (\text{XIV})$$

onde κ é um parâmetro de calibração a ser avaliado experimentalmente, e ε é a viscosidade cinemática turbulenta da água.

Observe-se que a solução de Hinze (eq. XIV) é coerente com a hipótese adotada por Prandtl de conservação da quantidade de movimento. Sendo a viscosidade ε uma constante ao longo de x (eq. XIII), os perfis de velocidade, expressos por uma função do tipo $v_x / v_{x_{\max}} = f(r/x)$, apresentam formatos semelhantes em todas as seções transversais do jato.

Admitindo-se a conservação da quantidade de movimento, $v_{x_{\max}}$ é inversamente proporcional à distância x (eq. XII) e a solução de Hinze torna-se igual a:

$$\frac{v_x}{v_{x_{\max}}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(r/x)^2}{\kappa \varepsilon} \right]^2} \quad (\text{XV})$$

⁶ Para o escoamento turbulento, essencialmente constituído por inúmeros pequenos vórtices, a velocidade instantânea em determinado ponto do fluxo é a soma da velocidade média, correspondente ao movimento de base e igual à média temporal das velocidades naquele ponto, e da velocidade fluante, sobreposta ao movimento de base. No *Apêndice* e em todo o trabalho, as velocidades dos escoamentos turbulentos analisadas correspondem às *velocidades médias*, salvo indicação em contrário, dispensando-se, assim, a notação completa ($\bar{v}_x = v_x$).

Resultados experimentais em jatos d'água publicados por Reichardt (1942) *apud* Ghetti (1998) são compatíveis com a solução analítica de Hinze quando assume-se $\varepsilon = \varepsilon_w = 0,013 d v_{x_0}$. Reafirma-se, assim, o fato de que a viscosidade cinemática ε não é apenas uma propriedade do fluido, mas depende das características iniciais do jato (velocidade e diâmetro do bico).

O modelo de Modoni *et al.* (2006) analisa, com base na eq. (XV), a difusão do jato de calda de cimento utilizado no *jet grouting*.