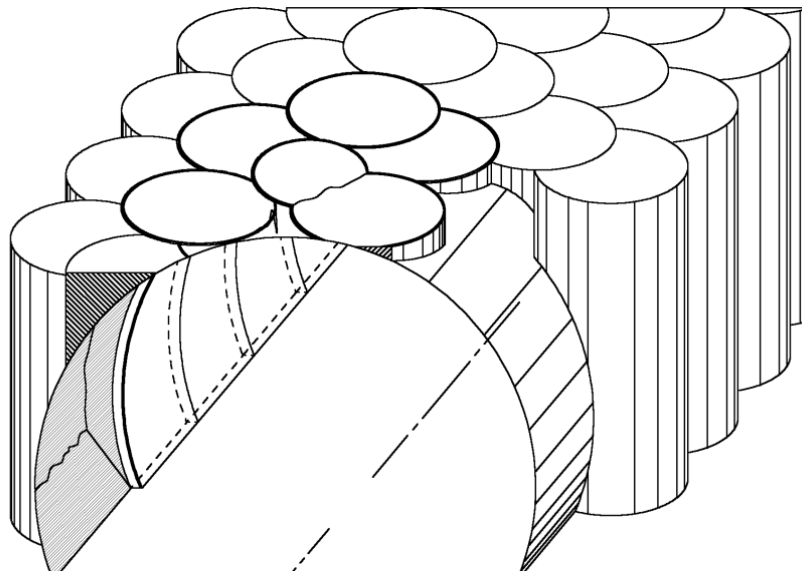




**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Colunas de *jet-grouting* na construção de túneis**

**INÊS MARANGA ROBERTO**  
Licenciatura em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de  
Especialização em Estruturas

(DOCUMENTO DEFINITIVO)

**Orientador:**

Eng.º, Frederico Florentino Simões Melâneo, (Eq. a professor Adjunto ISEL)

**Júri:**

**Presidente:**

Mestre, Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado (Prof. Coordenadora do ISEL)

**Arguentes:**

Eng.º, Frederico Florentino Simões Melâneo, (Eq. a professor Adjunto ISEL)

Mestre, Júlio Walter Miguel Fernandes (Eq. Prof. Adjunto do ISEL)

Doutor, Carlos Jorge Amorim Trancoso Vaz (Prof. Coordenador do ISEL)

**Dezembro de 2012**



## **Agradecimentos**

A realização desta dissertação representa o fim de uma fase, de muito estudo e dedicação, e o alcance de um dos objetivos aos quais me propus. Assim desejo expressar o meu mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível, nomeadamente:

À minha família, em especial aos meus pais, pelo incentivo e apoio dado ao longo destes anos, pelo esforço que fizeram para que nada me faltasse e pela educação e princípios que me transmitiram ao longo da minha vida, tornando-me na pessoa que sou hoje;

Aos meus amigos, pelo companheirismo e amizade demonstrados ao longo destes anos, tal como pelos momentos fantásticos que passámos juntos, pelas brincadeiras e rizadas que tornaram os momentos mais difíceis em boas lembranças;

Ao meu professor e orientador Frederico Melâneo, pelo apoio e paciência demonstrados, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos, pela revisão e crítica deste trabalho e pelos conselhos transmitidos.



## Resumo

A crescente utilização do espaço subterrâneo, em particular nos meios urbanos densamente ocupados em superfície e em condições geotécnicas difíceis, tem exigido um crescente desenvolvimento das técnicas de reforço dos terrenos com o objetivo de mitigar riscos de danos nas edificações.

Dentro das várias técnicas seguidas o *jet-grouting* tem vindo a assumir um papel relevante no tratamento de solos de fraca qualidade geotécnica, pela sua versatilidade no modo de aplicação, quer em superfície quer em subterrâneo.

Com a realização deste trabalho pretende-se efetuar um levantamento das técnicas de tratamento de terrenos por *jet-grouting* e a sua aplicação à construção de túneis.

Assim, numa primeira fase, descreve-se o que é o *jet-grouting*, o modo como é aplicada a técnica de *jet-grouting*, quais as suas características, quais as propriedades adquiridas pelo produto final, como se realiza o controlo de qualidade de todo o processo de execução. Também se faz referência aos equipamentos e materiais utilizados, tal como às suas vantagens e desvantagens.

Posteriormente faz-se referência aos problemas decorrentes da construção de túneis, da forma como influenciam o meio onde são escavados e o porquê da necessidade de reforço, chegando-se ao modo como a técnica de *jet-grouting* tem vindo a ser utilizada na construção dos túneis, citando-se alguns casos práticos.

Por fim resumem-se os pontos mais importantes da realização deste trabalho.

**Palavras-chave:** *jet-grouting*, Túneis, Reforço do Terreno



## Abstract

The increasing use of underground space, particularly in densely populated urban areas in surface and difficult geotechnical conditions, has required an increasing development of techniques for ground reinforcement in order to mitigate risks of damage to buildings.

Among the various techniques the *jet-grouting* has assumed an important role in the treatment of soils of poor geotechnical quality, for its application versatility, either in surface or in underground.

With this work we intend to carry out a research of the ground treatment techniques with *jet-grouting* and its application to the construction of tunnels.

In a first step, *jet-grouting* technique is described. It is referred how this technique is applied, its characteristics, the acquired properties by the final product, how to do the quality control of all process. Reference is also made to equipment and materials, such as its advantages and disadvantages.

Subsequently, reference is made to the problems resulting from the construction of tunnels, the way tunnels influence the surrounding ground where they are excavated and why the need for reinforcement, reaching up to how the *jet-grouting* technique has been used in the construction of tunnels , citing some practical cases.

Finally a summary of the most important points of this work is made.

**Key-words:** *jet-grouting*, Tunnels, Ground Reinforcement



## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	2
2	Caracterização da técnica do <i>jet-grouting</i> .....	5
2.1	História .....	5
2.2	Definição .....	7
2.3	Importância.....	9
2.4	Técnica de execução.....	9
2.5	Sistemas de jet.....	10
2.5.1	Domínios de aplicação .....	14
2.6	Características do material tratado.....	21
2.6.1	Geometria .....	21
2.6.2	Resistência mecânica.....	34
2.6.3	Deformabilidade .....	40
2.6.4	Impermeabilização .....	43
2.7	Controlo de qualidade .....	44
2.8	Materiais e equipamentos.....	51
2.8.1	Materiais .....	51
2.8.2	Equipamento .....	53
2.9	Vantagens e desvantagens .....	54
3	<i>Jet-grouting</i> em túneis .....	57
3.1	A problemática dos túneis .....	57
3.2	Principais aplicações .....	64
3.2.1	Consolidação da abóbada e da frente de escavação de túneis .....	65
4	Conclusão.....	77

5 Bibliografia..... 79

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Desenvolvimento da técnica de <i>jet-grouting</i> no Japão [3].....	5
Figura 2.2 – Utilização da técnica de <i>jet-grouting</i> . a) Estabilização de taludes, b) Reforço de fundações, c) <i>jet-grouting</i> sub-horizontal no reforço de escavações de túneis, d) Cortina de estanqueidade em fundações de barragens [6].....	7
Figura 2.3 – Campo de aplicação da técnica de <i>jet-grouting</i> [4].....	8
Figura 2.4 - Aplicabilidade do <i>jet-grouting</i> vs. outros tipos de injeção de calda. Adaptada de [7].....	8
Figura 2.5 – Fases de execução do <i>jet-grouting</i> [6].....	9
Figura 2.6 – Sistema de jacto simples [10].....	11
Figura 2.7 – Sistema de jacto duplo [10].....	11
Figura 2.8 – Sistema de jacto triplo [10].....	12
Figura 2.9 – Sistema SuperJet [8].....	13
Figura 2.10 – Sistema X- <i>jet-grouting</i> [13].....	13
Figura 2.11 – Escala de erodibilidade dos solos [8].....	15
Figura 2.12 - Relação entre a pressão do jet e a distância de erosão [15].....	17
Figura 2.13 – Relação entre a pressão dinâmica e a distância ao bico de injeção em diferentes meios [1].....	17
Figura 2.14 – Relação da pressão dinâmica da água e do fluxo de ar com a distância [1].....	18
Figura 2.15 – Diferentes geometrias das colunas de <i>jet-grouting</i> [7].....	22
Figura 2.16 – a) Geometria hexagonal conseguida através da intersecção de diversas colunas de <i>jet-grouting</i> ; b) Esquema de colunas secantes [19].....	22
Figura 2.17 – Colunas de <i>jet-grouting</i> realizadas com diferentes parâmetros de execução [20].....	23
Figura 2.18 – Diâmetro das colunas em função do tempo de erosão do solo 1- Solo coesivo; 2- Solo com pouca coesão; 3- Solo sem coesão [17].....	24
Figura 2.19 – Relação entre o diâmetro das colunas e a pressão de injeção do fluido 1- Solo sem coesão; 2- Solo com pouca coesão [17].....	25
Figura 2.20 – Relação entre o diâmetro das colunas e a velocidade de rotação da vara [17].....	26
Figura 2.21 – Solos incoerentes, relação entre a compacidade do solo e o diâmetro das colunas [2].....	29

Figura 2.22 – Solos coesivos, relação entre a coesão do solo e o diâmetro das colunas [2] .....	30
Figura 2.23 – Solos incoerentes, relação entre a compactidade do solo e o diâmetro das colunas [2].....	31
Figura 2.24 – Solos coesivos, relação entre a resistência ao corte não drenada e o diâmetro das colunas [2].....	31
Figura 2.25 – Relação entre resistência à compressão com o tempo de cura para cada tipo de solo [8] .....	35
Figura 2.26 – Relação entre a quantidade de água e a resistência do material tratado através do sistema jet1, Casalmaiocco (Itália) [3].....	36
Figura 2.27 – Resistência do material tratado através dos diferentes sistemas de jet em função da profundidade [3].....	37
Figura 2.28 – Relação entre a resistência à compressão do material tratado e o consumo de cimento [18] .....	39
Figura 2.29 – Relação entre a resistência à compressão e o tempo de cura [21].....	39
Figura 2.30– Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples. Adaptado de [2] E/R – módulo de deformabilidade/ Resistência à compressão simples .....	41
Figura 2.31 – Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples, em solos siltosos e arenosos [3].....	42
Figura 2.32 – Relação entre o módulo de deformabilidade do material tratado e o consumo de cimento [18].....	42
Figura 2.33 – Relação entre a tensão de compressão uniaxial e o módulo de Young [21] .....	43
Figura 2.34 – Efeito do desvio durante a execução de uma coluna [1].....	44
Figura 2.35 – a) Amostras para ensaios de laboratório; b) Coluna de ensaio (Inspeção visual) [24] .....	47
Figura 2.36 – a) Unidade de aquisição de dados; b) Registo dos parâmetros de execução [25] .....	48
Figura 2.37 – Material rejeitado à superfície [26].....	49
Figura 2.38 – Estaleiro necessário à realização da técnica de <i>jet-grouting</i> [10].....	53
Figura 3.1 – Modificação da trajetória das tensões produzida pela escavação [37] .....	58
Figura 3.2 – Formação do <i>efeito de arco</i> [36].....	59

Figura 3.3 – Distribuição das tensões verticais em duas cavidades diferentes.....	60
Figura 3.4 – Influência do tamanho do túnel na estabilidade do maciço [40].....	61
Figura 3.5 – Tipos de deformações e instabilidade dos túneis [36].....	62
Figura 3.6 – Definição das categorias de comportamento vendo o núcleo como instrumento estabilizados [36].....	63
Figura 3.7 – Reforço da abóbada do túnel: a) Colunas sub-horizontais; b) Colunas sub-verticais [44] .....	65
Figura 3.8 – Enfilagens de <i>jet-grouting</i> “Guarda-chuva” [24].....	66
Figura 3.9 – a) “Guarda-chuvas” simples; b) “Guarda-chuvas” duplo [45] [21].....	66
Figura 3.10 – <i>Jet-grouting</i> em “Guarda-chuva” duplo de enfilagens e reforço de fundação dos hasteais [43].....	67
Figura 3.11 – Aplicação de colunas sub-horizontais de <i>jet-grouting</i> na abóbada e núcleo do um túnel [36].....	68
Figura 3.12 – Reforço da envolvente do túnel [49] .....	70
Figura 3.13 – Corte transversal da zona tratada com <i>jet-grouting</i> [50] .....	71
Figura 3.14 – Esquema do ecrã de estabilidade.....	71
Figura 3.15 – Local e execução das colunas de <i>jet-grouting</i> na construção dos ecrãs de estabilidade [51].....	72
Figura 3.16 – Corte longitudinal e transversal da secção tratada nos seus 360° [53] .....	73
Figura 3.17 – “Laje” de <i>jet-grouting</i> . Adaptado de [54].....	74
Figura 3.18 – Esquema representativo da solução adotada na estação do Terreiro do Paço. Adaptado de [55].....	74
Figura 3.19 – Vista da obra da estação do metro Terreiro do Paço [56].....	75
Figura 3.20 – Aspeto da contenção e do escoramento da escavação [56].....	75

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Expansão da técnica de <i>jet-grouting</i> [2] [4].....	6
Tabela 2.2 – Aplicações dos sistemas de <i>jet-grouting</i> .....	14
Tabela 2.3 – Principais parâmetros do <i>jet-grouting</i> [14].....	16
Tabela 2.4 – Valores característicos dos vários parâmetros dos diferentes sistemas de <i>jet-grouting</i> [4].....	16
Tabela 2.5 – Diâmetros das colunas de <i>jet-grouting</i> [9].....	19
Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de <i>jet-grouting</i> [2] [9]	20
Tabela 2.7 – Incremento do valor do diâmetro das colunas .....	25
Tabela 2.8 – Resultados dos testes realizados em São Paulo, Brasil [3].....	27
Tabela 2.9 – Resultados obtidos por Shibazaki (sistema de jacto triplo) [3].....	27
Tabela 2.10 – Diâmetros de colunas realizadas em solos incoerentes segundo diversos autores [2] .....	32
Tabela 2.11 - Diâmetros de colunas realizadas em solos coesivos segundo diversos autores [2] .....	33
Tabela 2.12 – Relação entre o tempo de impacto do jacto e a resistência do material tratado [3].....	38
Tabela 2.13 - Valor do módulo de deformabilidade para cada tipo de solo [11].....	41
Tabela 2.14 – Sistemas de <i>jet-grouting</i> – Capacidade técnica vs. Preferência económica [35] .....	55

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e justificação do tema

A construção de túneis apresenta inúmeras vantagens, principalmente em áreas urbanas congestionadas por construções em que a necessidade de estabelecer redes de transportes rápidos exige o recurso ao subsolo e, também, no atravessamento de zonas montanhosas por redução da extensão de traçados sinuosos e íngremes e na mitigação de impactos ambientais, assumindo assim um importante papel no planeamento e gestão do espaço e do ambiente.

As obras subterrâneas permitem a concretização de infraestruturas que seriam impossíveis de realizar à superfície devido à falta de espaço, reduzem o impacto ambiental que determinadas obras causariam, como sejam escavações para taludes em zonas montanhosas, e apresentam vantagens por pequena ou nula sensibilidade aos sismos. Nas grandes cidades, as infraestruturas subterrâneas de transportes contribuem positivamente para a qualidade de vida dos cidadãos ao possibilitarem o atravessamento das barreiras físicas como sejam edificações, e permitem reduzir e limitar a poluição causada pela circulação dos veículos com motores de combustão.

Na construção de túneis em meio urbano e em zonas de terrenos de fracas qualidades mecânicas, tem vindo a ser utilizada a técnica de reforço dos terrenos através de injeção, procurando-se aumentar a segurança na escavação e minorar riscos de danos sobre as estruturas localizadas à superfície.

De todas as técnicas de injeção, o *jet-grouting* é aquela que tem vindo a ser utilizada no melhoramento e reforço dos terrenos de má qualidade e que tem ganho uma importância cada vez maior, quer pela facilidade da utilização quer pela versatilidade que o método permite ao ser executado em locais exíguos de difícil manobra dos equipamentos.

É um processo de injeção de calda de cimento nos terrenos, que recorre a elevadas pressões de injeção, a uma rapidez executiva na desagregação e mistura das partículas dos terrenos com o cimento, formando no interior do terreno uma coluna de solo melhorado nas suas características mecânicas e hidráulicas.

Devido ao facto de não necessitar de escavação para a sua execução e poder ser realizada em qualquer direção e num local específico torna-se numa técnica com grande potencial de utilização em zonas urbanas.

Existem vários fatores que condicionam as características que as colunas resultantes desta técnica devem exibir, sendo uma delas as características geológicas e geotécnicas dos terrenos.

Para o efeito, o estudo geológico e geotécnico assume um papel importante na caracterização dos terrenos, sendo este estudo ainda mais importante quando nos referimos a obras subterrâneas, nomeadamente aos túneis, em que esta atividade faz parte de todas as fases inerentes à sua construção, revelando-se ainda um fator que determina o sucesso da obra. Permite-nos conhecer a qualidade dos terrenos e a sua aptidão para a realização da obra, tal como nos proporciona conhecimento para a diminuição dos riscos decorrentes do seu comportamento enquanto materiais naturais quando sujeitos a perturbações produzidas pelas obras subterrâneas.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo abordar uma das técnicas de melhoramento de terreno, o *jet-grouting*, efetuando o levantamento do conhecimento sobre as características da sua execução, os seus domínios e condições de aplicação, as suas potencialidades para obras, em particular as realizadas no domínio dos túneis.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

Este trabalho está dividido em quatro capítulos principais:

Capítulo 1, apresenta o enquadramento do tema, em que se evidenciam os benefícios de se construir no espaço subterrâneo e se realça a importância das técnicas de tratamento e de reforço dos terrenos. Definem-se os objetivos do trabalho e apresenta-se um breve resumo da sua estrutura.

Capítulo 2, caracteriza-se o *jet-grouting* de um ponto de vista técnico, descrevendo-se o processo da sua execução, os tipos de sistemas de *jet-grouting*, como se realiza o

controlo de qualidade, quais os materiais e equipamentos necessários e as suas vantagens e desvantagens.

Capítulo 3, descrevem-se quais os domínios e condições de aplicabilidade desta técnica, descrevendo-se quais as suas principais aplicações em túneis.

Capítulo 4, resumem-se os pontos principais da elaboração deste trabalho.



## 2 Caracterização da técnica do *jet-grouting*

### 2.1 História

A utilização de jactos de água a elevada pressão teve a sua origem nos Estados Unidos da América com o objetivo de desagregar os terrenos das minas de carvão e data do início da década de 60. [1] Ainda nesta década, em 1962, uma empresa britânica desenvolveu um método, com o objetivo de formar uma cortina de estanqueidade em solos arenosos, que consistia na desagregação do terreno através de um sistema de jactos de água radiais e verticais, introduzidos no terreno através de uma vara. Assim que se atingia a profundidade pretendida os jactos de água radiais eram substituídos por jactos de calda fina e a vara hasteada, dando origem a colunas com um diâmetro 3 a 4 vezes superior ao diâmetro do furo e uma permeabilidade inferior em 100 a 10000 vezes a permeabilidade do solo original. [2]

Em meados da década de 60, técnicos japoneses, aplicaram os mesmos princípios na tentativa de desenvolver as técnicas de melhoria de terrenos por injeção, tendo sido desenvolvidos na década de 70 os primeiros sistemas de *jet-grouting* (Figura 2.1). [2]

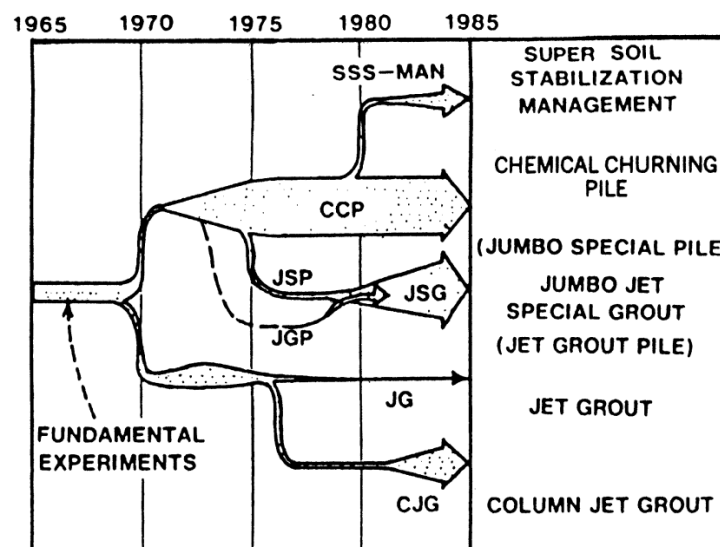


Figura 2.1 – Desenvolvimento da técnica de *jet-grouting* no Japão [3]

Em 1970 Nakanishi desenvolveu um sistema denominado *Chemical Churning Pile* (CCP) que utilizava caldas químicas como material aglutinante, prejudiciais ao ambiente. A substituição destas caldas por caldas de cimento foi da responsabilidade de uma empresa Italiana, alterando-se assim o seu nome para *Cement Churning Pile*, e

atualmente para sistema de jacto simples. A calda era injetada no terreno a alta pressão, através de um bico injetor localizado na vara de furação. [2] [4]

Em 1975 Yahiro desenvolveu um sistema, denominado *Column Jet Grout* ou método de *Kajima*. Este evolui a partir do sistema *Jet Grout* através da imposição do movimento de rotação da vara e da utilização de um jacto de ar a envolver o de água. O jacto constituído por ar e água tinha como objetivo desagregar o terreno, enquanto o jacto de calda, localizado 10 a 15 cm abaixo, tinha como objetivo misturar o terreno desagregado com a calda. [5] Este sistema é atualmente denominado por sistema de jacto triplo.

O *Jumbo Jet Special Grout* foi desenvolvido por Nakanishi no fim da década de 70, através da fusão de dois outros sistemas, o *Jumbo Special Pile* e o *Jet Grout Pile*. Este sistema utilizava ar comprimido em volta do jacto de calda com o objetivo de conseguir maiores diâmetros. [3] Denomina-se atualmente de sistema de jacto duplo.

O sistema *Super Soil Stabilization Management* (SSS-MAN) surgiu em 1980 com uma metodologia de execução diferente das dos outros sistemas. Neste caso é executado primeiramente um furo piloto que posteriormente é aumentado através de um jacto de ar a altíssima pressão. Por fim é injetada a calda no furo aberto.

A técnica de *jet-grouting* expandiu-se para outros países após o início do seu desenvolvimento no Japão.

**Tabela 2.1 – Expansão da técnica de *jet-grouting* [2] [4]**

1974	• Itália e Reino Unido
1980	• Brasil, Estados Unidos da América, Argentina, Uruguai e Venezuela
Meados dos anos 80	• Alemanha e França
1993	• Portugal - Utilizada no reforço da fundação de uma fachada de um edifício em Setúbal

Desde 1993 até à presente data a técnica de *jet-grouting*, em Portugal, tem vindo a ser cada vez mais requisitada, destacando-se a sua aplicação em obras subterrâneas, nos trabalhos de amplificação da rede do Metropolitano de Lisboa. [4]

A Figura 2.2 ilustra algumas das situações onde a técnica de *jet-grouting* é mais utilizada.

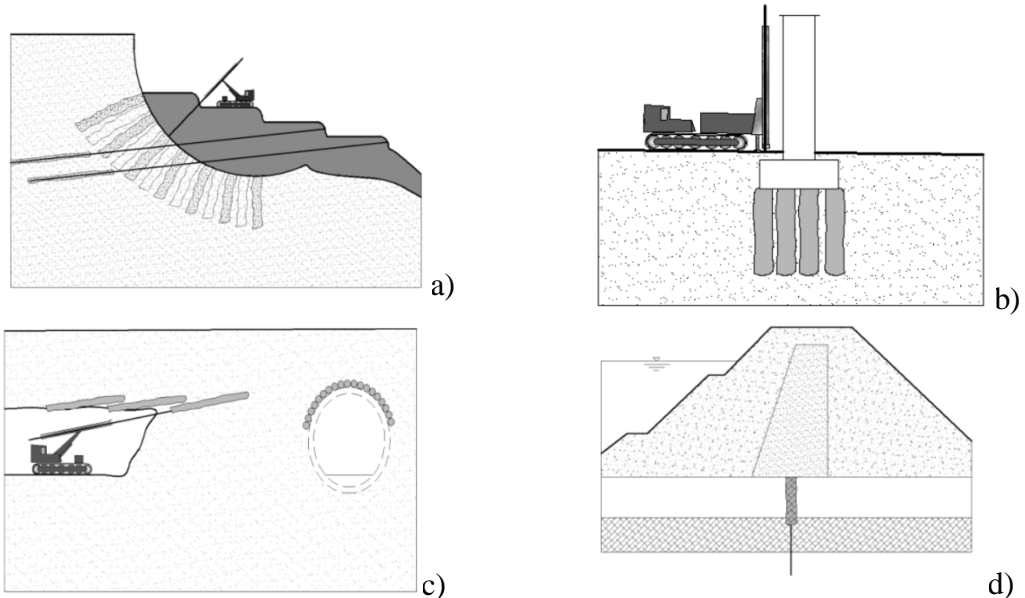


Figura 2.2 – Utilização da técnica de *jet-grouting*. a) Estabilização de taludes, b) Reforço de fundações, c) *jet-grouting* sub-horizontal no reforço de escavações de túneis, d) Cortina de estanqueidade em fundações de barragens [6]

## 2.2 Definição

A técnica *jet-grouting* no tratamento de solos, tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do solo, ou seja, aumentar os parâmetros de resistência, diminuir a deformabilidade e a sua permeabilidade.

Consiste na injeção de calda de cimento nos terrenos, aplicada a elevada pressão, através de jactos horizontais, que provocando a desagregação da sua estrutura permite que as partículas que o compõem se misturem com a calda de cimento formando um material com melhores características mecânicas e hidráulicas que as do terreno original.

A técnica *jet-grouting* pode ser aplicada em diversos tipos de terrenos, tornando-a assim numa técnica com grande versatilidade. Pode ser aplicada em solos incoerentes/soltos como as areias e o seixo, até aos solos coesivos como a argila (Figura 2.3).

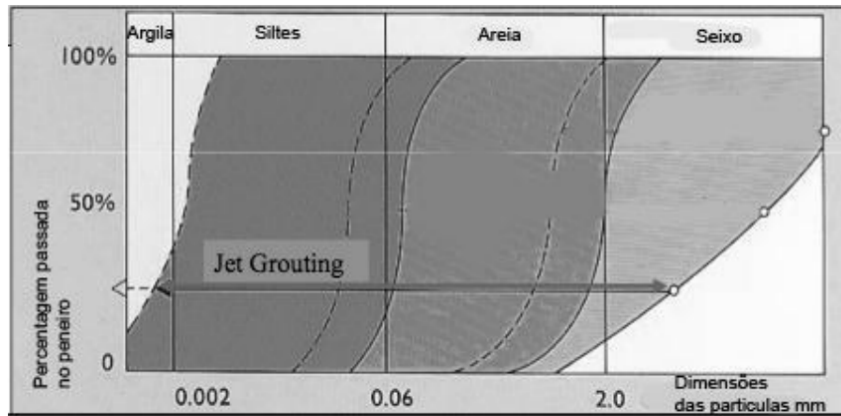


Figura 2.3 – Campo de aplicação da técnica de *jet-grouting* [4]

De entre as diversas técnicas de injeção de caldas podemos verificar que o *jet-grouting* é uma técnica específica que permite obter melhores resultados no tratamento dos terrenos quando comparado com as técnicas clássicas de injeção, uma vez que a sua aplicação sendo localizada é melhor controlada (Figura 2.4).

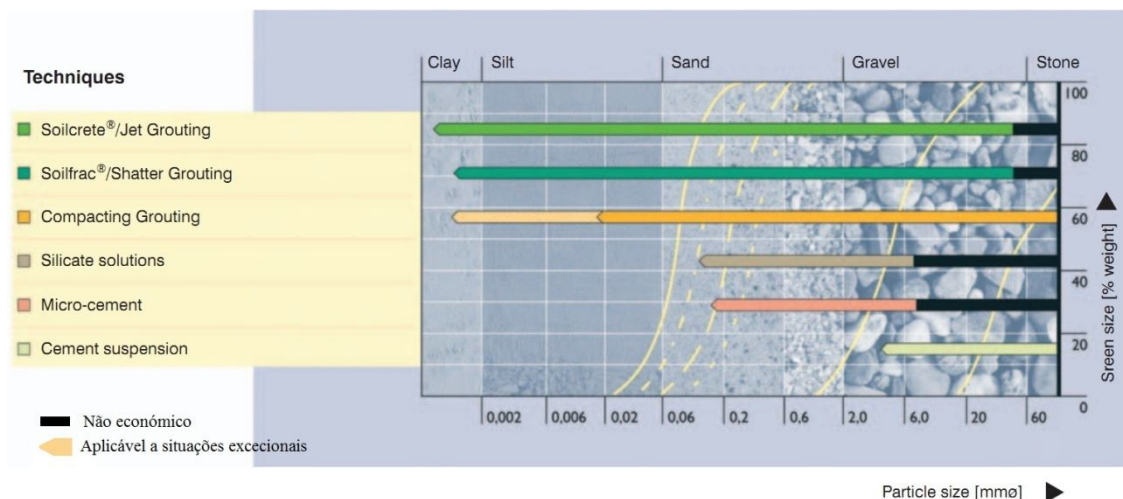


Figura 2.4 - Aplicabilidade do *jet-grouting* vs. outros tipos de injeção de calda. Adaptada de [7]

Para além da sua aplicação ser extensiva a diferentes tipos de solos o *jet-grouting* é uma técnica pouco invasiva, no sentido em que, não necessita de pré-escavação, pode ser executada em qualquer direção, numa zona específica, em superfície e/ou no interior de espaço limitados.

A sua aplicação abrange um vasto leque de obras tais como a estabilização de frentes de escavação em túneis, cortinas de impermeabilização, estabilização de taludes, reforço e melhoramento de fundações, melhoramentos de terrenos e aterros.

### 2.3 Importância

O aumento do número e da complexidade das estruturas construídas em terrenos de má qualidade tem exigido o recurso crescente à técnica de *jet-grouting* como meio para realizar a adequação dos terrenos aos objetivos das obras.

Por esta razão, em terrenos geotecnicamente difíceis, tem assumido um papel importante no reforço dos terrenos, em que a sua aplicação em obras subterrâneas tem tido um desenvolvimento crescente. Esta aplicação é realizada na estabilização das frentes de escavação dos túneis, no recalce e consolidação das fundações dos edifícios e no controlo dos assentamentos, indo assim de encontro às necessidades de se realizar uma obra dentro dos parâmetros de segurança e diminuição dos riscos de danos nas infraestruturas envolventes. Por este motivo, tem sido constante a sua aplicação na construção de túneis de infraestruturas de transportes subterrâneos nos grandes meios urbanos.

### 2.4 Técnica de execução

De modo genérico, o método de injeção por *jet-grouting* inicia-se com a cravação de uma vara metálica oca no terreno, com movimento rotativo e injeção de água a alta pressão, até à profundidade pretendida, coincidindo a vara com o eixo da futura coluna de terreno tratado.

Seguidamente inicia-se o processo de injeção da calda de cimento, para a formação da coluna de terreno melhorado, em que esta se forma através da subida da haste a velocidade ascensional e rotacional constante, com a injeção simultânea da calda a alta pressão (Figura 2.5).

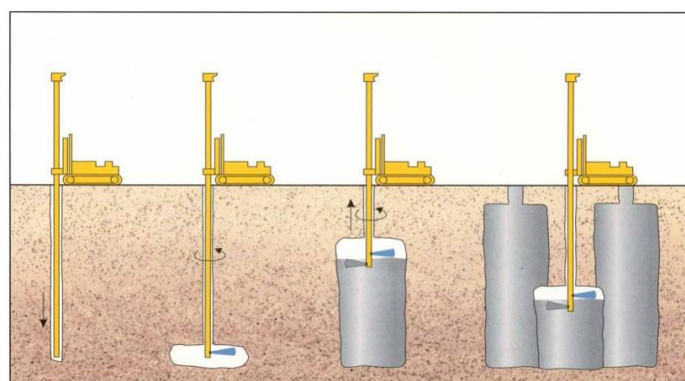


Figura 2.5 – Fases de execução do *jet-grouting* [6]

De um modo sumário, o melhoramento das características mecânicas do solo por esta técnica, segue três fases principais:

1. Corte: desagregação da estrutura natural do solo e dispersão dos fragmentos formados através da ação de jactos horizontais.
2. Mistura e Substituição parcial: com a injeção da calda de cimento parte das partículas são substituídas enquanto outras se misturam com a calda.
3. Cimentação: os fragmentos resultantes do corte unem-se devido à ação endurecedora da calda, ganhando assim a resistência necessária.

## **2.5 Sistemas de jet**

A evolução da técnica de *jet-grouting* levou ao desenvolvimento de três sistemas base que diferem, essencialmente, nos elementos e parâmetros utilizados para a desagregação do solo e mistura deste com a calda de cimento. A escolha do sistema mais adequado depende das condições do terreno a ser tratado, da forma geométrica das colunas a obter e das propriedades que estas devem vir a exhibir. [8]

Assim podemos distinguir os seguintes três sistemas base:

- Sistema de jacto simples (JET1);
- Sistema de jacto duplo (JET2);
- Sistema de jacto triplo (JET3).

Existem diversas variações destes três sistemas, tais como o SuperJet ou o *X-jet-grouting*, sendo que na maioria dos casos estas representam apenas uma melhoria do processo pois o princípio de execução mantem-se o mesmo. [9]

### Sistema de jacto simples (JET1)

Este sistema é caracterizado pela ação de um ou mais injetores horizontais, pelos quais a calda de cimento é bombeada a grande velocidade (200m/s), com o objetivo de desagregar e misturar o solo com a calda (Figura 2.6). A sua utilização é, geralmente, limitada a solos coesivos com  $N_{SPT}$  inferior a 5 a 10, e a solos incoerentes com  $N_{SPT}$  inferior a 20. Estas restrições devem-se à resistência oferecida, pelos solos mais densos

ou de maior consistência, à ação do jacto tornando este sistema limitado no que diz respeito ao diâmetro das colunas. [2]

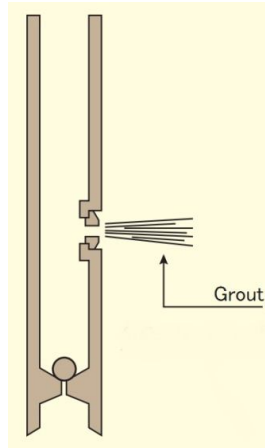


Figura 2.6 – Sistema de jacto simples [10]

#### Sistema de jacto duplo (JET2)

O sistema de jacto duplo difere do sistema de jacto simples pela utilização de ar comprimido ou água juntamente com a calda de cimento, tornando possível a execução de colunas com maiores dimensões, devido ao maior poder de erosão e maior alcance do jacto. São utilizadas duas varas coaxiais por onde circulam separadamente o ar comprimido ou a água e a calda de cimento, dando-se a mistura dos dois elementos no bico comum de saída (Figura 2.7). [2] [8]

Este sistema pode ser utilizado em todo o tipo de solos, desde as argilas, areias, até aos cascalhos ( $N_{spt} < 50$ ), sendo a sua utilização em solos coesivos restringida a valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 10. [2]

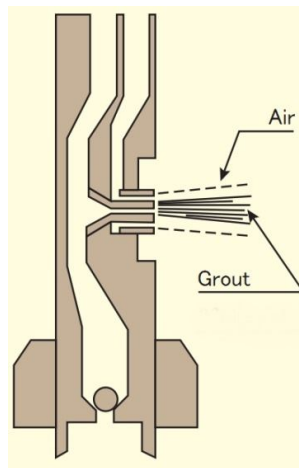


Figura 2.7 – Sistema de jacto duplo [10]

### Sistema de jacto triplo (JET3)

Este sistema é o mais complexo dos três, separando o processo de erosão do terreno do processo de preenchimento e mistura da calda com o solo desagregado. [8]

São utilizadas três varas coaxiais diferentes por onde circulam separadamente a água, o ar e a calda e dois bicos de injeção a níveis diferentes. O que se encontra na posição superior tem por função erodir o terreno recorrendo à utilização de um jacto de água, para destruir a estrutura do terreno, envolto por um jacto de ar, que evita a dispersão e potencia a ação do jacto de água. O bico inferior é o que injeta a calda no terreno após este ter sido erodido, dando origem ao corpo da coluna (Figura 2.8). [11]

Este sistema pode ser aplicado a qualquer tipo de solo, sendo a sua aplicação em solos coesivos limitada a valores  $N_{SPT}$  inferiores a 15. [2]

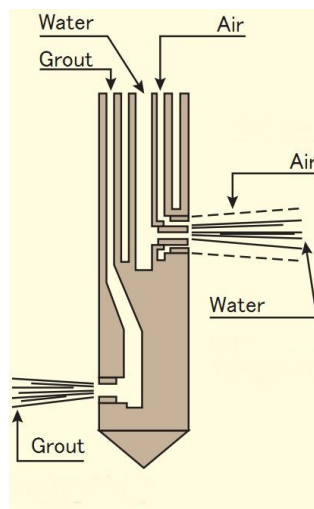


Figura 2.8 – Sistema de jacto triplo [10]

### SuperJet

Este sistema deriva do sistema de jacto duplo e tem capacidade para produzir colunas de maior diâmetro e de boa qualidade executiva. É constituído por dois bicos injetores opostos que injetam no terreno a calda envolta por água ou ar. O sucesso deste sistema deve-se à evolução dos equipamentos e ao aumento da energia de injeção que produzem as colunas de *jet-grouting* de maior diâmetro. Foi concebido para que os bicos injetores concentrem o fluxo de injeção e minimizem a sua dispersão obtendo maior eficácia na desagregação do terreno. Tudo isto, combinado com uma lenta rotação e elevação da vara torna possível obter colunas da ordem dos 5 m de diâmetro (Figura 2.9). [12]

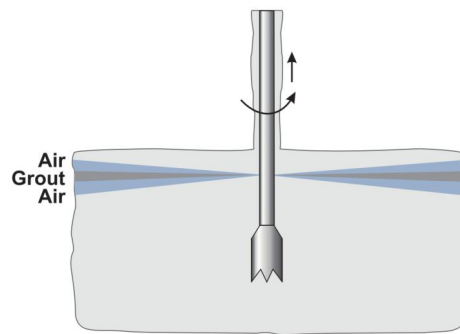


Figura 2.9 – Sistema SuperJet [8]

### X-jet-grouting

Este sistema deriva do sistema de jacto triplo e é utilizado para a construção de colunas com um diâmetro que varia entre os 2 e 2.5 m. É caracterizado pela existência de dois jactos de água-ar que se intersectam a cerca de 1 metro de distância do ponto de injeção com o objetivo de erodir o terreno, e por um terceiro jacto que se localiza abaixo destes para a injeção da calda (Figura 2.10). [13]

No ponto de colisão dos dois jactos de água-ar, a energia de erosão é dispersada, reduzindo-se gradualmente a energia de corte. É importante definir corretamente a velocidade de rotação e elevação da vara, tal como a calibração dos bicos de injeção, para garantir a erosão do solo, a colisão dos dois jactos e a dispersão da energia. Este sistema tem a vantagem de se definir com precisão a geometria das colunas resultantes, tal como o material necessário à sua execução, para solos muito moles, solos cuja resistência varia em profundidade ou para solos muito estratificados. [13]



Figura 2.10 – Sistema X-jet-grouting [13]

### 2.5.1 Domínios de aplicação

A diferença existente entre os diversos sistemas de *jet-grouting* torna-os mais adequados a determinadas situações (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Aplicações dos sistemas de *jet-grouting*

Sistemas de Jet Grouting	Aplicações
Sistema de jacto simples (JET1)	Utilizado na consolidação da abóboda de túneis, na impermeabilização de solos, através da construção de cortinas impermeabilizantes ou pontos de selagem. [8] É adequado para trabalhos realizados em profundidade e para aplicações horizontais de <i>jet-grouting</i> . [10]
Sistema de jacto duplo (JET2)	Utilizado na estabilização de solos, em alguns trabalhos de reforço de fundações e painéis impermeabilizantes. [8]
Sistema de jacto triplo (JET3)	Utilizado no reforço de fundações e escavações, em trabalhos de impermeabilização dos solos, na estabilização de solos de grãos finos e em trabalhos com corpos horizontais. [8]
SuperJet	É considerado o sistema mais eficaz para a estabilização de grandes massas de solo. Geralmente é utilizado como suporte de estruturas através da interligação de diversas colunas, na estabilização de estratos propícios a sofrer liquefação e de solos moles, na construção de painéis impermeabilizantes. [8] [12]

De uma forma geral, durante a execução das colunas de *jet-grouting* é importante que o espaço anelar em volta da vara se mantenha desimpedido e que este tenha a largura necessária para que o excesso de matéria, calda e solo, possa retornar à superfície. Isto permite-nos controlar as tensões que se desenvolvem “in situ”. Uma obstrução neste espaço poderia levar à hidrofracturação do solo e à perda de controlo, que por sua vez levaria a grandes inconsistências na qualidade e geometria da coluna. [9]

É o sistema de jet1 que apresenta maior risco de obstrução do espaço anelar devido à maior densidade do material expulso, constituído apenas por solo e calda. Por sua vez, o sistema de jet3 é o sistema que menos problemas causará neste campo, visto que a mistura água/ar/solo tem menor densidade, tornando mais fácil a sua chegada à superfície. [3]

As características do terreno que mais influenciam a escolha do sistema de *jet-grouting* a utilizar são o tipo de solo e a sua estratigrafia. Quando nos referimos ao tipo de solo temos de pensar na facilidade com que este poderá ser erodido. Como se pode ver na Figura 2.11 os solos sem coesão são os mais fáceis de erodir. Por outro lado à medida que a plasticidade e rigidez do solo aumentam a facilidade de erosão do solo diminui até um ponto em que o *jet-grouting* deixará de ser eficaz. [9]



Figura 2.11 – Escala de erodibilidade dos solos [8]

Quando o solo é estratificado, os parâmetros de execução do *jet-grouting* podem ter de ser alterados em função da profundidade para se obter uma coluna geometricamente uniforme. [9]

Apesar de o cascalho e as pedras serem considerados solos sem coesão, estes podem tornar-se bastante difíceis de erodir dependendo da sua densidade “in situ” e da matriz do solo. Por exemplo, uma pedra ou um bloco poderá bloquear o fluxo do jacto deixando uma zona não tratada por detrás dela (zona de sombra). [9]

Também os parâmetros inerentes a cada sistema têm influência nos resultados obtidos e variam entre si. A Tabela 2.3 e Tabela 2.4 representam os parâmetros a definir para cada sistema de *jet-grouting* e os seus valores característicos.

**Tabela 2.3 – Principais parâmetros do *jet-grouting* [14]**

Parâmetros	Jet 1	Jet 2	Jet 3
Pressão e caudal do cimento	✓	✓	✓
Número e diâmetro dos bicos de injeção	✓	✓	✓
Relação A/C	✓	✓	✓
Velocidade de subida e rotação da vara	✓	✓	✓
Pressão e caudal do ar comprimido	-	✓	✓
Número e diâmetro dos bicos de injeção de água	-	-	✓

**Tabela 2.4 – Valores característicos dos vários parâmetros dos diferentes sistemas de *jet-grouting* [4]**

		Sistema simples		Sistema duplo		Sistema triplo	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Pressão de injeção da calda (MPa)		20	60	30	60	3	7
Fluxo de calda (l/min)		40	120	70	150	70	150
Pressão de injeção de ar (MPa)		-	-	0.6	1.2	0.6	1.2
Fluxo de ar (l/min)		-	-	2000	6000	2000	6000
Pressão de injeção de água (MPa)		-	-	-	-	20	50
Fluxo de água (l/min)		-	-	-	-	70	150
Diâmetro do bocal	Injeção de calda (mm)	1.5	3	1.5	3	4	8
	Injeção de água (mm)	-	-	1	2	1	2
	Injeção de ar (mm)	-	-	-	-	1.5	3
Velocidade de rotação (rpm)		10	25	5	10	5	10
Velocidade de subida (rpm)		10	50	7	30	5	30

### Efeito da pressão

A utilização do jacto de água a alta pressão aumenta consideravelmente a distância de erosão assim que a energia do jacto de água excede a resistência ao corte do solo,  $\sigma$  (Figura 2.12). Observa-se que a relação entre a pressão do jacto e a distância de erosão, para as areias apresenta uma relação linear, enquanto para as argilas tende a ser parabólico. [1]

É possível obter as mesmas distâncias de erosão para diferentes pressões, através do controlo do tempo de erosão do solo, contudo a utilização de altas pressões poupam tempo na maioria dos casos práticos. [1]

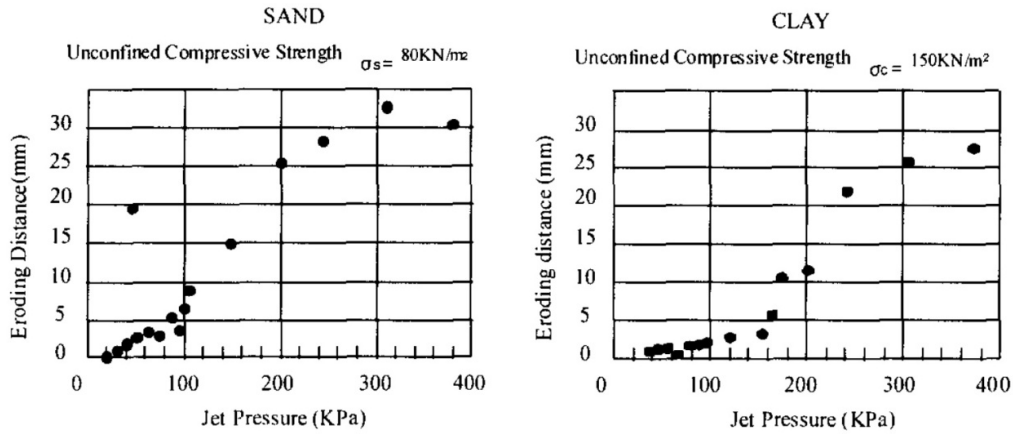


Figura 2.12 - Relação entre a pressão do jet e a distância de erosão [15]

### Efeito do ar

A utilização de ar comprimido é indispensável para maximizar o poder de erosão do jacto, tal como para ajudar no transporte do material que retorna à superfície (refluxo). Comparativamente aos jactos de água, este assume particular importância quando se se tratam de solos abaixo do nível freático, pois mostra-se mais eficaz para o efeito. [1]

Através da Figura 2.13 pode observar-se que há diminuição da energia do jacto com o aumento da distância ao bico de injeção e que esta é aproximadamente exponencial. Torna-se assim visível o efeito restritivo e dominante da água mas também o efeito positivo que a envolvente de ar tem no alcance de maiores diâmetros. [3]

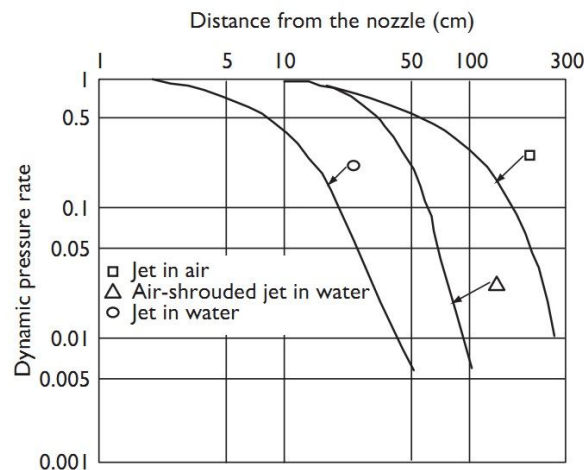


Figura 2.13 – Relação entre a pressão dinâmica e a distância ao bico de injeção em diferentes meios [1]

Também a velocidade do jacto de ar influencia a distância de erosão, em que o aumento da sua velocidade de saída alcança maior distância de erosão e, também, um aumento do diâmetro das colunas como se pode observar na Figura 2.14. [15]

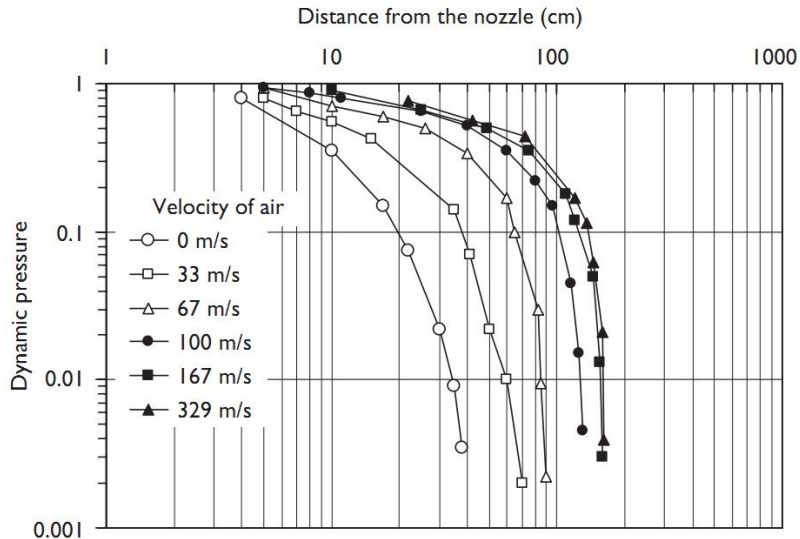


Figura 2.14 – Relação da pressão dinâmica da água e do fluxo de ar com a distância [1]

Para além dos parâmetros referidos anteriormente, o bom estado dos bicos de injeção deve ser verificado, pois estes podem ser facilmente danificados devido a impurezas contidas no jacto ou por partículas do solo, diminuindo a performance do jacto. [1]

O sistema de jet 1 quando utilizado abaixo do nível freático perde eficácia devido à diminuição da distância de erosão. A utilização de uma jacto de ar a envolver o jacto de calda, sistema de jet 2, aumenta o seu poder de erosão, tornando-se mais eficaz abaixo do nível freático. Porém a utilização do jacto de ar envolvendo o jacto de calda acarreta a desvantagem de maior perda de calda por refluxo.

Por sua vez o sistema jet 3 tem a capacidade de otimizar a utilização da calda, verificando-se uma diminuição do seu desperdício, uma vez que o sistema de erosão do solo e de injeção da calda são independentes. [1] O consumo de cimento por volume de solo é menor no sistema de jet3, comparativamente aos sistemas e jet1 e jet2. [2]

O sistema de jet 1 é o mais utilizado em trabalhos de *jet-grouting* horizontais. Apesar da utilização de jactos de ar ajudarem na evacuação dos detritos, a sua eficiência diminui quando este passa da horizontal para a vertical. [2]

Relativamente à resistência do material tratado, o sistema de jet 1 é o que apresenta melhores resultados em solos incoerentes. [2] Pelo contrário o sistema de jet 2 é o que apresenta menores valores de resistência devido à maior quantidade de ar presente no material tratado. [3] O procedimento inerente ao sistema jet 3 dá origem a uma maior substituição do solo e conseqüentemente obtêm-se colunas mais uniformes e resistentes, exceto em solos incoerentes. [2]

As maiores desvantagens do sistema jet 3 são a menor rapidez de execução das colunas e a maior complexidade do sistema. Pelo contrário é o melhor sistema para o tratamento de solos coesivos e a capacidade de realizar colunas de grande diâmetro permite reduzir o número de furos relativamente aos sistemas de jet 1 e jet2. [2]

A Tabela 2.5 mostra os diâmetros expectáveis utilizando os diferentes sistemas de jet em diferentes tipos de solo. É de notar que existe quase sempre uma sobreposição do intervalo de diâmetros do sistema de jacto duplo e triplo. Isto acontece porque o sistema de jacto duplo é muito mais dependente dos parâmetros usados e da erodibilidade do solo dando origem a colunas com diâmetros maiores. [9]

**Tabela 2.5 – Diâmetros das colunas de *jet-grouting* [9]**

Sistema	Argilas moles	Silte	Areia
Simples	0.4- 0.9 m	0.6- 1.1 m	0.8- 1.2 m
Duplo	0.9- 1.8 m	0.9- 1.8 m	1.2- 2.1 m
Triplo	0.9- 1.2 m	0.9- 1.4 m	0.9- 2.5 m
SuperJet	3- 4.3 m	3.3- 4.6 m	3.5- 5 m
X-Jet	2.3 m	2.3 m	2.3 m

A escolha do melhor sistema a utilizar para determinada situação não é simples de fazer. Dependendo da experiência adquirida, dos parâmetros e procedimentos a utilizar podemos chegar aos mesmos resultados através de diferentes sistemas. Para se alcançar o melhor resultado é necessário elaborar um programa de ensaios que incluam os métodos de verificação e de monitorização das colunas de ensaio. [9]

A Tabela 2.6 resume algumas vantagens e desvantagens de cada sistema.

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de *jet-grouting* [2] [9]

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Simple	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema e equipamentos mais simples</li> <li>-Bons resultados em solos sem coesão</li> <li>-Menor nível de ruído e de vibração na sua aplicação</li> <li>-Sistema mais adequado para trabalhos sub-horizontais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Geometrias mais pequenas</li> <li>-Maior dificuldade em controlar a qualidade em solos coesivos</li> <li>-Maior probabilidade de ocorrerem obstruções na saída do material desagregado</li> <li>-Consumo de cimento por volume de solo tratado superior ao do jet2 e jet3</li> </ul>
Duplo	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema mais utilizado</li> <li>-Grande disponibilidade de equipamento e ferramentas</li> <li>-Alcance de boas geometrias</li> <li>-Muita experiência</li> <li>-Muitas vezes é o mais económico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pouco usado no reforço de fundações</li> <li>-Consumo de cimento por volume de solo tratado superior ao do jet3</li> <li>-Decréscimo da eficiência do jacto de ar quando este passa da horizontal para a vertical</li> <li>-Material tratado tem menores resistências seja qual for o tipo de solo</li> </ul>
Triplo	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema mais controlável</li> <li>-Material do refluxo menos denso, logo mais fácil de controlar</li> <li>-Sistema mais eficaz para o tratamento de solos coesivos relativamente ao jet1 e jet2</li> <li>-Melhor sistema para o reforço de fundações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema e equipamentos mais complexos e sofisticados</li> <li>-Requer muita experiência para a sua execução</li> <li>-Menor rapidez de execução das colunas</li> <li>- Decréscimo da eficiência do jacto de ar quando este passa da horizontal para a vertical</li> </ul>
SuperJet	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menor custo por volume de terreno tratado</li> <li>-Melhor mistura terreno-calda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requer equipamento e ferramentas especiais</li> <li>-Requer suporte para trabalhar perto da superfície</li> <li>-Maior dificuldade em controlar o hasteamento em solos coesivos</li> <li>-Maiores problemas logísticos</li> </ul>
X-Jet	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Melhor sistema para solos moles com coesão</li> <li>-Confiança na geometria</li> <li>-Controlo do custo dos materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requer equipamento muito específico com a necessidade de ser calibrado regularmente</li> <li>-Pouca experiência</li> </ul>

## 2.6 Características do material tratado

A técnica de *jet-grouting* tem sido utilizada em diversos trabalhos de geotecnia devido à sua grande versatilidade, abrangendo uma grande gama de solos e podendo ser aplicada com diversas geometrias. No entanto, existe ainda uma grande dificuldade na previsão das características do material tratado devido à inexistência de métodos fiáveis para o efeito. [16]

Este problema surge devido ao facto de a substituição do solo ser parcial, ou seja, as características finais das colunas vão depender das características iniciais do solo, da percentagem de substituição ocorrida e da uniformidade da coluna. [2]

Apesar de todas as incertezas, a experiência obtida até hoje permite estabelecer, para cada tipo de solo, intervalos de valores relativos às características dos solos tratados, características como, os diâmetros, as resistências à compressão e de corte, a deformabilidade e redução da permeabilidade. Para além disto é indispensável um controlo rigoroso durante a fase de obra para que os valores estabelecidos na fase de projeto sejam confirmados. [2]

Para além dos fatores referidos acima, as características do material tratado também dependem dos parâmetros de execução, tais como, a velocidade de subida e rotação da vara, o volume de calda injetado, o diâmetro dos bicos de injeção e a pressão e caudal do fluido a injetar. [17] Estes parâmetros são definidos consoante os objetivos a atingir e devem ser validados antes de se iniciar um projeto, através de colunas de teste. [18]

### 2.6.1 Geometria

A técnica de *jet-grouting* permite criar diversas geometrias (painéis ou colunas) aplicadas a diferentes situações através da implementação, ou não, do movimento de rotação à vara (Figura 2.15).

As colunas circulares têm vindo a ser preferidas aos painéis. Isto porque permitem formar qualquer tipo de geometria (Figura 2.16a). É possível através da construção de colunas secantes (Figura 2.16b) criar cortinas com a espessura desejada, através da execução de uma ou mais fiadas de colunas. [2]

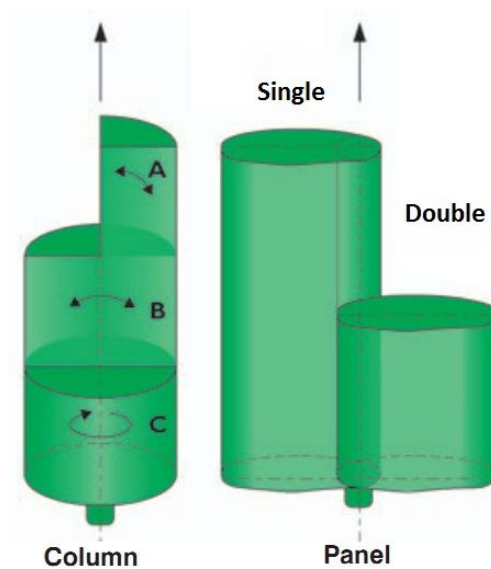


Figura 2.15 – Diferentes geometrias das colunas de *jet-grouting* [7]

O diâmetro das colunas é um dos parâmetros mais importantes, pois define o grau de eficiência da obra em quase todos os seus campos de aplicação. Por exemplo, na construção de cortinas impermeabilizantes, através de colunas secantes, é importante garantir a sobreposição das colunas em diversos pontos de modo a garantir a qualidade do trabalho de impermeabilização.

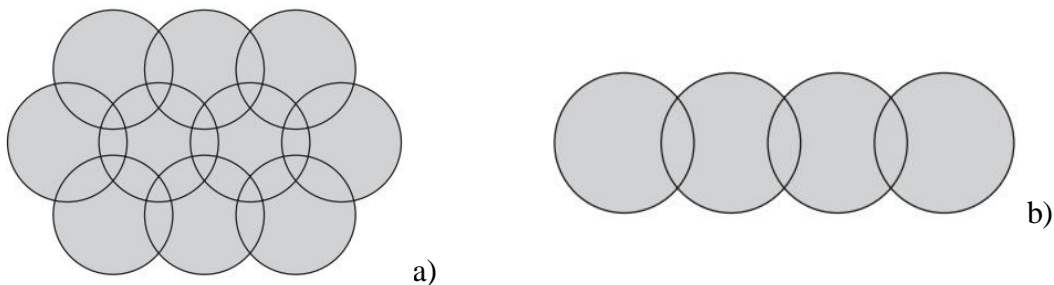


Figura 2.16 – a) Geometria hexagonal conseguida através da intersecção de diversas colunas de *jet-grouting*;  
b) Esquema de colunas secantes [19]

O alcance do diâmetro pretendido depende de fatores como, o tipo de solo, a velocidade de rotação e subida da vara, do volume de calda injetado, do diâmetro dos bicos de injeção, sendo que, os dois mais importantes são o tempo de tratamento do terreno e a pressão de injeção do fluido, que podem variar consoante o tipo de solo. [17]

Se não for dado tempo suficiente para a erosão do solo, podemos ter como resultado uma coluna com forma espiral (Figura 2.17). Pelo contrário, se o tempo de erosão for excessivo dará origem a grandes consumos de cimento, o que deixaria de ser razoável em termos económicos. [17]



Figura 2.17 – Colunas de *jet-grouting* realizadas com diferentes parâmetros de execução [20]

### 2.6.1.1 Sistemas e parâmetros de execução do *jet-grouting*

Como já foi referido no capítulo 2.5 as diferenças entre os diversos sistemas de *jet-grouting* devem-se ao tipo e função dos jactos utilizados.

O sistema de jet 1 utiliza um ou mais jactos de calda com o objetivo de desagregar o terreno e aglutinar o material erodido.

Por sua vez, o sistema jet 2 difere do sistema jet1 pela existência de um jacto de ar comprimido ou água que envolve o jacto de calda, aumentando o seu raio de ação.

O sistema jet 3 difere dos anteriores porque separa a ação de corte do terreno da ação de substituição do solo e da mistura deste com a calda, permitindo alcançar maiores distâncias de erosão relativamente ao jet1 e jet2.

De uma forma geral, os diâmetros atingidos pelos diferentes sistemas de *jet-grouting* variam dentro dos seguintes intervalos:

JET 1            0.40 a 1.20 m

JET2            0.90 a 2.10 m

JET3            0.90 a 2.50 m

Por sua vez, os parâmetros de execução do *jet-grouting* têm sido alvo de vários estudos com o objetivo de conhecer a forma como estes se relacionam com as características finais das colunas.

Um estudo experimental realizado na Rússia, por Alexey Malinin et al. [17], permitiu retirar algumas conclusões sobre como o tempo de erosão do solo, a pressão de injeção e a velocidade de rotação da vara se relacionam com o diâmetro das colunas.

Foram construídas colunas de testes, através do sistema de jacto simples, em três locais diferentes, com diferentes tipos de solos: [17]

1. Solo coesivo, heterogéneo, constituído por diferentes camadas de argila e algumas camadas de calcário,  $c = 47 \text{ kPa}$ ;
2. Solo com pouca coesão, solo homogéneo, constituído por areia fina compacta,  $c = 7 \text{ kPa}$ ;
3. Solo sem coesão, homogéneo, constituído por areia fina de média consistência,  $c = 1 \text{ kPa}$ ;

A Figura 2.18 expressa o modo como o diâmetro das colunas se altera em função do tempo de elevação da vara, mantendo-se constantes os restantes parâmetros.

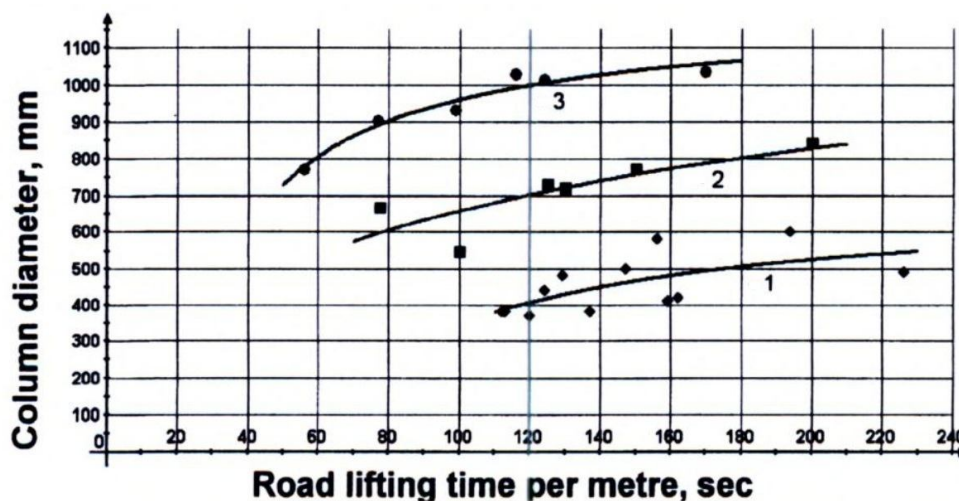


Figura 2.18 – Diâmetro das colunas em função do tempo de erosão do solo

1- Solo coesivo; 2- Solo com pouca coesão; 3- Solo sem coesão [17]

Verifica-se que o tipo de solo influencia o valor do diâmetro das colunas, podendo para o mesmo tempo de elevação da vara por metro, o diâmetro da coluna em solos sem coesão ser mais do dobro do diâmetro obtido em solos com coesão (aumento de mais de 50%). Para o mesmo tipo de solo verifica-se que o diâmetro das colunas aumenta com o aumento do tempo de erosão do solo. A heterogeneidade do solo também tem influência na previsão do diâmetro das colunas, podendo observar-se uma maior dispersão nos

dados obtidos (caso 1). Nos solos sem coesão observa-se que o aumento do tempo de tratamento do solo tem maior influência no aumento do diâmetro das colunas na fase inicial. O mesmo não acontece nos solos com coesão em que o aumento do tempo de tratamento tem aproximadamente a mesma influência no aumento do diâmetro em todas as fases. [17] Observa-se também que o incremento do diâmetro das colunas com o aumento do tempo de tratamento do terreno é maior no solo coesivo e menor no solo sem coesão (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Incremento do valor do diâmetro das colunas

Tipo de solo	Incremento do valor do diâmetro das colunas
1- Solo coesivo	38%
2- Solo com pouca coesão	30%
3- Solo sem coesão	25%

A relação entre o diâmetro da coluna e a pressão de injeção do fluido foi estudada fazendo-se variar a pressão de injeção entre os 10 e 50 MPa e está representada na Figura 2.19. Observa-se que o diâmetro das colunas aumentou com o aumento da pressão de injeção da calda. [17] Este estudo foi realizado apenas em solos homogêneos porque nos solos heterogêneos conduziria a resultados enganosos.

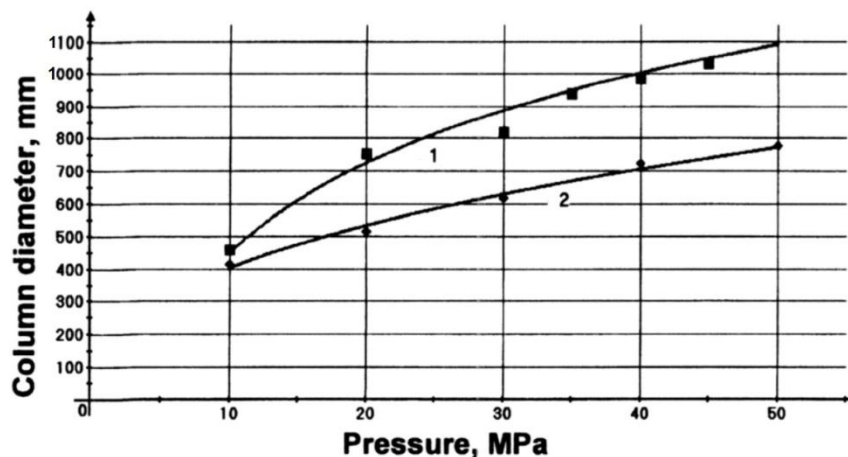


Figura 2.19 – Relação entre o diâmetro das colunas e a pressão de injeção do fluido  
1- Solo sem coesão; 2- Solo com pouca coesão [17]

A avaliação da influência da velocidade de rotação da vara no diâmetro está representada na Figura 2.20, e para tal fez-se variar a velocidade de rotação da vara entre 11 e 35 rpm

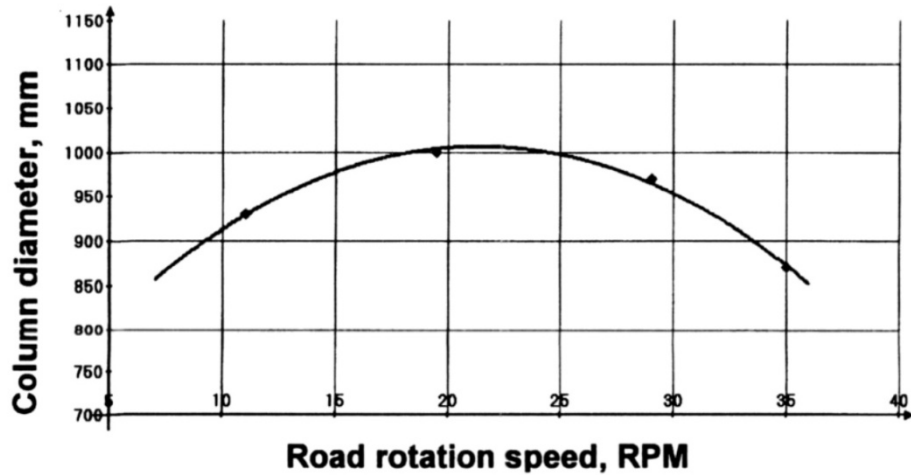


Figura 2.20 – Relação entre o diâmetro das colunas e a velocidade de rotação da vara [17]

Observa-se que existe um valor ótimo para a velocidade de rotação da vara, para o qual corresponde o maior diâmetro obtido. [17]

Um outro estudo experimental, utilizando o sistema de jacto simples, foi realizado em 1982 em São Paulo (Brasil) pela Novatecna com o objetivo de examinar como os diferentes parâmetros de execução do *jet-grouting* se relacionam com os vários tipos de solos na obtenção de determinados diâmetros de colunas. [3]

Foram selecionados três tipos de solos, areia, argila siltosa e argila orgânica, nos quais foram construídas um total de 60 colunas, 20 em cada tipo de solo. Todas elas foram construídas utilizando a mesma pressão de injeção 30 MPa, velocidade de rotação 18 rpm, 2 bicos de injeção com diâmetro de 2,2 mm, relação água-cimento de 1/1 e caudal de 91 l/min. A única variável foi a velocidade de subida da vara, tendo sido definida uma velocidade de 2,9 min/m para 10 das colunas de cada tipo de solo, enquanto nas outras 10 a velocidade foi de 5,8 min/m.

Os resultados obtidos foram os seguintes: [3]

**Tabela 2.8 – Resultados dos testes realizados em São Paulo, Brasil [3]**

Tipo de solo	Velocidade de subida da vara (min/m)	Diâmetro das colunas (cm)	Valores médios da resistência à compressão simples (MPa)
Argila orgânica	2.9	55 – 60	2
Argila orgânica	5.8	65 – 70	4
Argila siltosa	2.9	65 – 70	5
Argila Siltosa	5.8	75 – 80	7
Areia	2.9	75 – 80	8
Areia	5.8	85 - 90	12

Concluiu-se que duplicar o tempo de impacto do jacto não teve grande influência no aumento do diâmetro das colunas, verificando-se incrementos na ordem dos 15 a 25%. Assim observa-se que a maior parte da ação de corte do jacto é despendida nas primeiras duas rotações da vara. [3]

Em Osaka, Japão, também foram realizados diferentes estudos experimentais utilizando o sistema de jacto triplo e reportados por Yahiro (1982) e Shibazaki (1982). Estes estudos foram realizados em dois tipos de solos, arenosos e siltosos, sem informação referente à existência, ou não, de nível freático. [3]

Os testes realizados por Shibazaki mantiveram constantes os valores da pressão do jacto de água e o seu caudal com o objetivo de estudar a influência da pressão de injeção e caudal de calda, da velocidade de subida e rotação da vara nos resultados finais das colunas. [3]

Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 2.9.

**Tabela 2.9 – Resultados obtidos por Shibazaki (sistema de jacto triplo) [3]**

Coluna nº	Água		Calda		Pressão do ar comprimido kPa	Velocidade de subida da vara mm/s	Velocidade de rotação rpm	Diâmetro cm		Resistência à compressão simples MPa	Peso específico kg/cm <sup>3</sup>
	Pressão MPa	Caudal l/min	Pressão MPa	Caudal l/s				Máximo	Médio		
Areia $N_{SPT} = 5$											
1	40	70	0	1.2	700	0.8	5	340	280	3.55	1.665
2				1.2	700	0.8	5	293	262	2.52	1.654
3				2.5	700	0.8	5	293	256	4.60	1.164
4				2.5	700	0.8	10	255	223	6.78	1.650
Argilas $N_{SPT} = 3$											
5	40	70	0	3.3	700	0.8	5	234	210	1.73	1.242
6			30	3.3	700	1.25	5	214	179	1.99	1.125
7			30	3.3	700	1.7	5	178	161	3.51	1.074
8			30	3.3	700	0.8	5	324	302	2.05	1.206
9			30	3.3	0	0.8	5	134	116	6.58	1.229

Verificou-se que os maiores diâmetros obtidos, tanto para as areias como para as argilas, correspondem às menores velocidades de rotação e subida da vara.

Duplicar a velocidade de subida da vara (colunas 7 e 8) resultou numa redução de cerca de 50 % do diâmetro das colunas construídas em argila. Nas areias, o aumento da velocidade de rotação da vara, de 5 para 10 rpm, levou a um decréscimo de 15 % no diâmetro das colunas. [3]

O aumento da pressão de injeção da calda em 30 MPa (coluna 5 e 8) aumentou em 30 % o diâmetro das colunas na argila. Por outro lado, duplicar o valor do caudal da calda não teve grande impacto no tamanho das colunas em areia. [3]

Pode observar-se que nas argilas a inexistência do jacto de ar resultou numa grande redução, mais de 50%, do diâmetro das colunas.

Yahiro para além de examinar os mesmos fatores que Shibazaki, estudou a influência da pressão de injeção do fluido de corte, fazendo-o variar entre 20 a 40 MPa. Foram realizadas 9 colunas em solo arenoso ( $N_{SPT} = 10$ ) e 13 em solo argiloso. A realização deste ensaio permitiu retirar as conclusões que se indicam em seguida. [3]

- O aumento da pressão do fluido de corte resultou num aumento de cerca de 160% do diâmetro das colunas em solo arenoso e de cerca de 50% do diâmetro das colunas em solo argiloso.
- Duplicar a velocidade de subida da vara resultou num decréscimo de cerca de 10 a 30% do diâmetro das colunas em solo arenoso.
- Aumentar a pressão de injeção da calda, 0 a 3 MPa, resultou num aumento de 30% do diâmetro das colunas em solo arenoso.
- Aumentar o caudal da calda (200 a 300 l/min) resultou num aumento de 20% do tamanho das colunas em solo argiloso.

### **2.6.1.2 Características iniciais do solo**

O alcance da geometria pretendida depende também das características iniciais do solo, tais como, o teor em água, a granulometria, a resistência ao corte do solo, a consistência dos solos coesivos e compactidade dos solos incoerentes, para que se possa adotar da melhor forma a técnica ao terreno. [2] [4]

Relativamente à existência do nível freático, constata-se que este não influencia significativamente o diâmetro das colunas. [2]

Por outro lado a granulometria pode influenciar a geometria da coluna, caso existam partículas de grandes dimensões. O fluxo do jacto ao ser bloqueado por uma partícula de grandes dimensões (blocos) leva à redução local do diâmetro da coluna, criando zonas de sombra, o que dá origem a geometrias não uniformes. Contudo à exceção dos solos muito grosseiros, a variação dos diâmetros das colunas raramente excede os 10%. [2]

Tal como a granulometria, a resistência ao corte do solo cria uma barreira que a energia atuante do jacto tem de vencer para desagregar o terreno. Em solos coesivos verifica-se que grande parte da energia do jacto é despendida na destruição da estrutura do solo, dando origem a colunas com diâmetros reduzidos. [2]

O estudo experimental realizado em São Paulo (Brasil), em 1982, descrito em 2.6.1.1, permitiu concluir que com o aumento da quantidade de argila no solo, o diâmetro das colunas vai decrescendo como pode ser observado na Tabela 2.8. [3]

Outros estudos foram feitos para relacionar as dimensões das colunas com a consistência dos solos coesivos e a compacidade dos solos incoerentes, através do ensaio SPT. Em 1985, Miki na tentativa de relacionar a variação do diâmetro das colunas com o número de pancadas do ensaio SPT, propôs os seguintes gráficos (Figura 2.21 e Figura 2.22). [2]

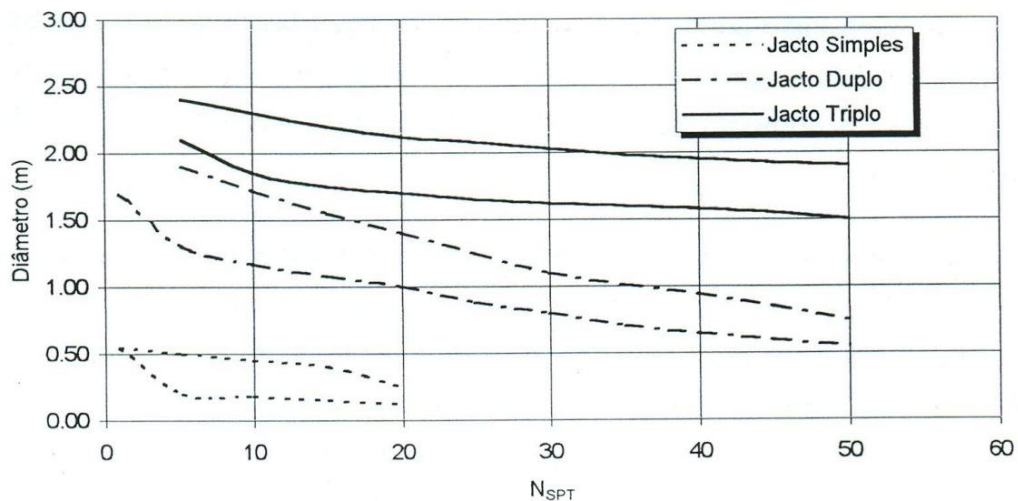


Figura 2.21 – Solos incoerentes, relação entre a compacidade do solo e o diâmetro das colunas [2]

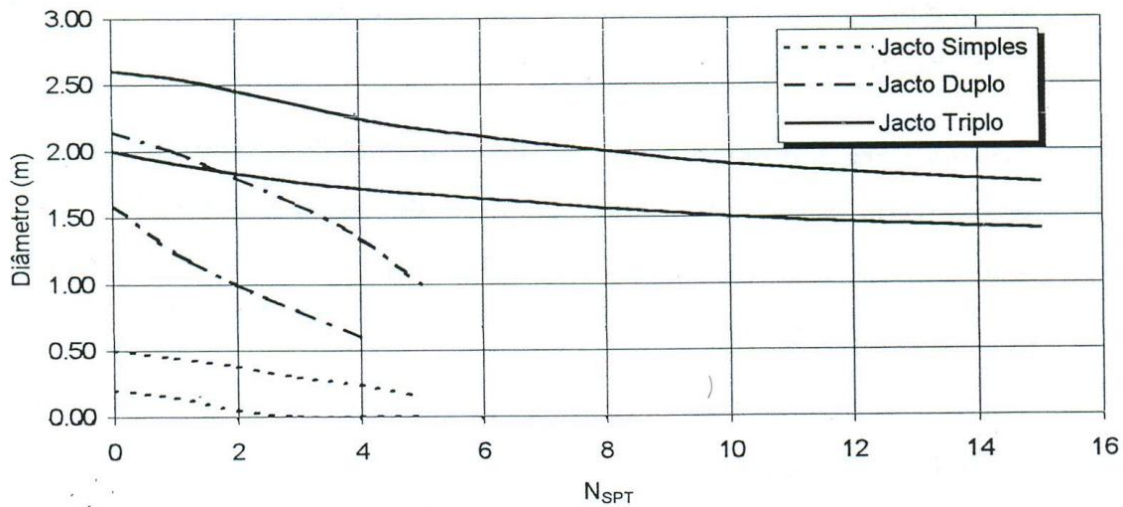


Figura 2.22 – Solos coesivos, relação entre a coesão do solo e o diâmetro das colunas [2]

Através da análise da Figura 2.21 e da Figura 2.22 constata-se o seguinte: [2]

- Independentemente do tipo de solo, o sistema de jacto triplo conduz sempre a colunas com maiores dimensões que o sistema de jacto simples e duplo;
- Verifica-se que o diâmetro das colunas diminui sempre com o aumento da resistência do solo à penetração obtida do ensaio SPT (aumento do  $N_{SPT}$ );
- Para os mesmos valores de  $N_{SPT}$  os diâmetros das colunas obtidos em solos incoerentes são superiores aos obtidos em solos coesivos;
- A eficiência do sistema de jacto duplo decresce significativamente com o aumento da compactidade dos solos incoerentes e da coesão dos solos coesivos. A redução do diâmetro é bastante superior quando comparada com a redução do diâmetro das colunas feitas através do sistema de jacto simples;
- Através do sistema de jacto duplo, verifica-se que nos solos incoerentes ocorre uma redução de cerca de 60% do diâmetro de uma coluna realizada em solo solto comparativamente a uma outra realizada em solo denso;
- Nos sistemas de jacto simples e jacto duplo verifica-se que para solos coesivos ocorre uma diminuição de diâmetro de cerca de 50% com o aumento do  $N_{SPT}$  entre 0 e 5.

Em 1989, Tornaghi realizou um estudo idêntico ao de Miki na tentativa de relacionar a variação do diâmetro das colunas com os valores resultantes do ensaio SPT para solos arenosos (Figura 2.23) e os valores da resistência ao corte não drenada em solos coesivos (Figura 2.24). Foram então propostos os seguintes gráficos: [2]

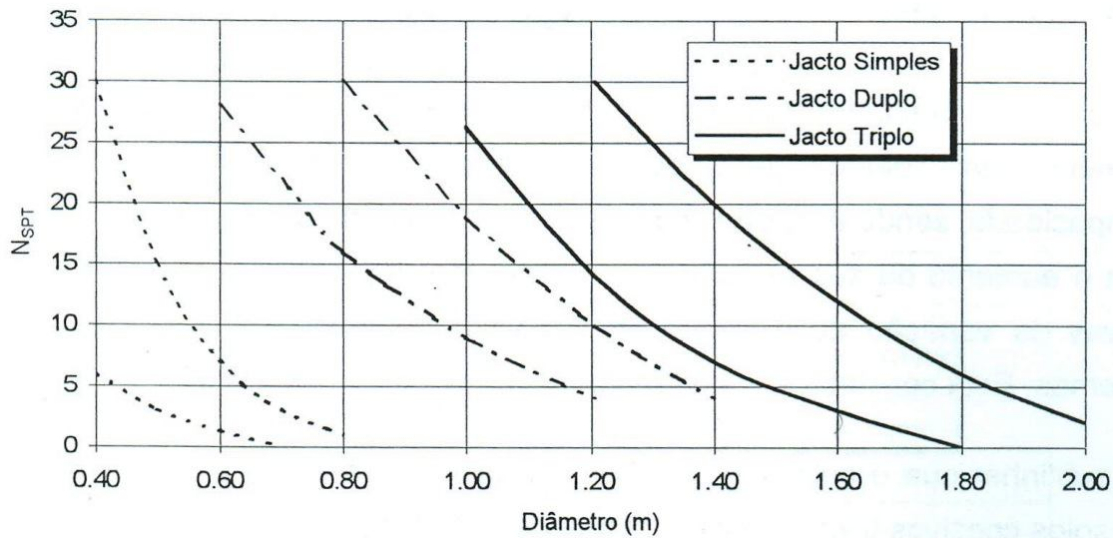


Figura 2.23 – Solos incoerentes, relação entre a compacidade do solo e o diâmetro das colunas [2]

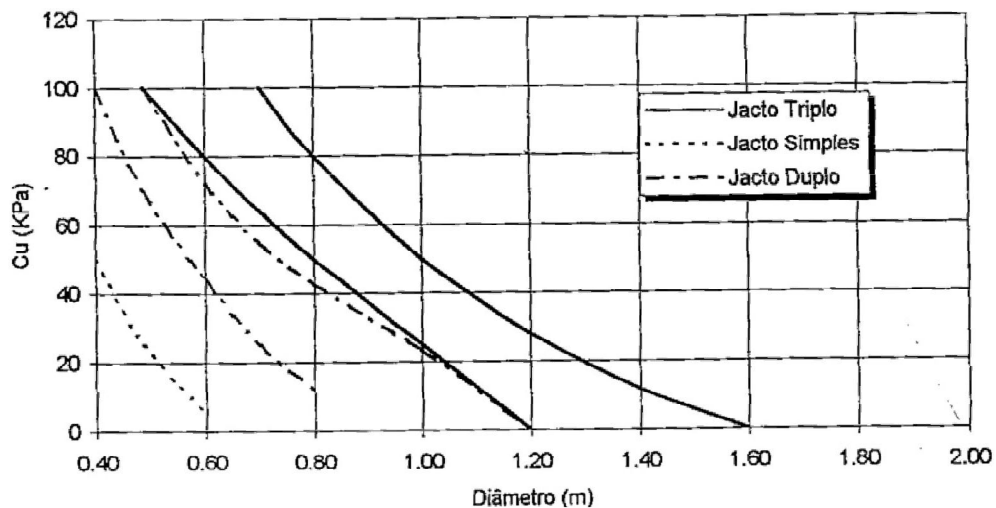


Figura 2.24 – Solos coesivos, relação entre a resistência ao corte não drenada e o diâmetro das colunas [2]

Tornaghi tal como Miki, verificou que o diâmetro das colunas diminui com o aumento da compacidade em solos incoerente e com o aumento da resistência ao corte não drenada em solos coesivos. Relativamente à evolução das curvas de variação do diâmetro com os valores do ensaio SPT, Tornaghi verificou que para solos incoerentes estas eram idênticas para todos os sistemas, o que contraria as conclusões de Miki. É também de referir que não foi estabelecida uma curva com os valores dos diâmetros mínimos para o sistema de jacto simples para solos coesivos. [2]

A Tabela 2.10 resume os resultados obtidos em solos incoerentes por diversos autores.

**Tabela 2.10 – Diâmetros de colunas realizadas em solos incoerentes segundo diversos autores [2]**

Autor	Sistema	Diâmetro (m)				
		Solto	Pouco compacto	Mediamente compacto	Compacto	
		0	5	10	30	50
Miki e Nakanishi (1984)	Simples	0.5 – 1.0	0.3 – 0.6	0.25 – 0.5	-	-
	Triplo	2.25–2.75	1.95 – 2.5	1.85 - 2.35	1.6 – 2.0	1.5 – 1.8
Miki (1985)	Simples	0.55	0.2 – 0.5	0.18 – 0.45	-	-
	Duplo	1.70	1.3 – 1.9	1.2 – 1.75	0.8 – 1.1	0.55 – 0.75
	Triplo	-	2.1 – 2.4	1.8 – 2.3	1.6 – 2.0	1.5 – 1.9
Tornaghi (1989)	Simples	0.6 – 0.8	0.4 – 0.6	0 – 0.55	-	-
	Duplo	-	1.2 – 1.4	1.0 – 1.2	0.6 – 0.8	-
	Triplo	1.8 – 2.0	1.5 – 1.8	1.3 – 1.7	1.0 – 1.2	-
Miki, Botto e Nisio (1988)	Simples	0.65 – 0.8	0.45 – 0.65	0.35 – 0.55	0.2 – 0.4	-
	Duplo	1.5	1.15 – 1.35	0.95 – 1.2	0.55 – 0.8	-
	Triplo	2.0	1.5 – 1.8	1.3 – 1.7	0.95 – 1.25	0.75 – 1.0
Experiência Brasileira (1996)	Simples	-	0.9	0.8	0.7	0.4
	Duplo	-	2.0	1.7	1.4	1.0
JJGA (1995)	Duplo	-	2.0	2.0	1.6	1.0
	Triplo	-	2.0	2.0	2.0	2.0

Relativamente ao sistema de jacto simples a maioria dos autores considera que este é aplicável a solos com valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 20 (média compacidade). Pelo contrário, a experiência brasileira torna-se na exceção à regra ao ter tratado solos com valores de  $N_{SPT}$  iguais a 50 (elevada compacidade). Também diferem dos restantes autores ao terem obtido os maiores valores de diâmetro para o sistema de jacto simples. [2]

Por sua vez, o sistema de jacto duplo obtém os maiores valores de diâmetro através da experiência Brasileira e da Japan Jet Grouting Association (JJGA). [2]

Segundo a JJGA o diâmetro das colunas realizadas através do sistema de jacto triplo não depende da compacidade do terreno visto que se mantêm constante com o aumento dos valores do ensaio SPT. Contrariamente os restantes autores consideram que existe

uma redução de cerca de 1 m no diâmetro das colunas construídas nos solos compactos relativamente aos solos soltos. [2]

Mais uma vez se constata que os menores diâmetros correspondem ao sistema de jacto simples e os maiores ao sistema de jacto triplo, correspondendo os valores intermédios ao sistema de jacto duplo. [2]

Relativamente aos solos coesivos, apresenta-se a Tabela 2.11 com o resumo da experiência de diversos autores.

**Tabela 2.11 - Diâmetros de colunas realizadas em solos coesivos segundo diversos autores [2]**

Autor	Sistema $N_{SPT}$	Diâmetro (m)				
		Muito mole	Mole	Médio	Rijo	
		0	2	5	8	15
Miki e Nakanishi (1984)	Simple	0.6	0.4	0.3	-	-
	Triplo	1.9 – 2.7	1.8 – 2.5	1.75 – 2.2	1.6 – 2.0	1.3 – 1.7
Miki (1985)	Simple	0.2 – 0.5	0.05 – 0.35	0 – 0.15	-	-
	Duplo	1.6 – 2.2	1.0 – 1.8	0 – 1.0	-	-
	Triplo	2.0 – 2.6	1.8 – 2.5	1.6 – 2.2	1.45 – 1.8	1.4 – 1.75
Miki, Botto e Nisio (1988)	Simple	0.4 – 0.6	0.3 – 0.5	0.3 – 0.4	0.25 – 0.35	-
	Duplo	0.8 – 1.2	0.7 – 0.95	0.6 – 0.8	0.45 – 0.65	-
	Triplo	1.2 – 1.55	0.9 – 1.2	0.7 – 1.0	0.45 – 0.7	-
Experiência Brasileira (1996)	Simple	-	-	0.7	0.65	0.6
	Duplo	-	-	1.6	1.45	1.3
JJGA (1995)	Duplo	-	1.6	1.1	-	-
	Triplo	-	2.0	1.8	1.5	-

A generalidade dos autores utiliza o sistema de jacto simples em solos coesivos com valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 5 a 10 pancadas. Novamente se constata que a experiência brasileira apresenta resultados diferentes, tendo utilizado o sistema de jacto simples em solos coesivos com valores de  $N_{SPT}$  iguais a 15 pancadas, em que se observam colunas duplas dos outros autores (Tabela 2.11). [2]

Relativamente ao sistema de jacto duplo constata-se que a experiência brasileira obteve os maiores diâmetros das colunas e utilizou o sistema em solos com maiores valores de  $N_{SPT}$ . [2]

Os resultados referentes ao sistema de jacto triplo são caracterizados por uma elevada dispersão. Para valores de  $N_{SPT} = 2$ , Miki e Nakanishi, em 1984, apresentam um diâmetro máximo de 2.5 m, enquanto Miki, Botto e Nisio, em 1988, apresentam um diâmetro máximo de 1.2 m. [2]

O sistema de jacto triplo mantém-se como o sistema que dá origem aos maiores diâmetros, seguindo-se o sistema de jacto duplo e por fim o sistema de jacto simples. [2]

Verifica-se uma grande dispersão de dados tanto para os solos incoerentes como para os solos coesivos, salientando-se que estes dados refletem a experiência de cada autor e que muitos dos relatos não referem condições em que foram realizadas as colunas de ensaio, citando-se, somente, o tipo de terreno e não referindo outros dados, como os níveis freáticos e as granulometrias. [2]

## **2.6.2 Resistência mecânica**

A resistência mecânica do material tratado traduz a capacidade que o corpo tem para suportar solicitações externas sem que ocorra a rotura deste, com níveis de deformações toleráveis.

São parâmetros essenciais para o dimensionamento dos corpos de *jet-grouting* e no entanto é um dos mais difíceis de prever, dependendo de numerosas condições, tais como: [2]

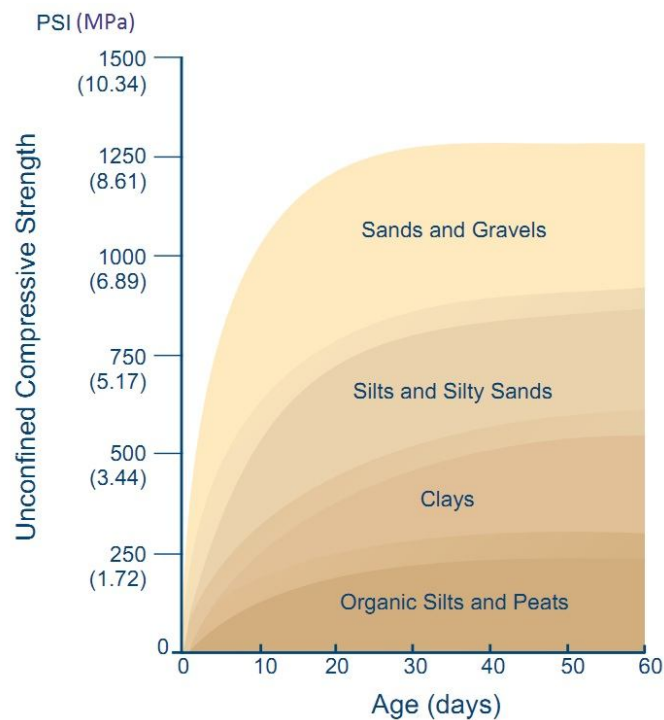
- Natureza do terreno;
- O sistema de jacto utilizado;
- Tempo de impacto do jacto, quantidade de cimento injetado e o tempo de cura;
- As propriedades químicas da água do subsolo;
- Dimensões das colunas.

### **2.6.2.1 Natureza do terreno**

Como já foi referido anteriormente, a técnica de tratamento de solos *jet-grouting*, conduz a uma substituição parcial do solo por calda de cimento. Assim o tipo de solo existente “in situ” apresenta-se como um dos principais fatores que condicionam a resistência mecânica do material tratado. [2]

Em São Paulo, Brasil, procedeu-se à realização de várias colunas em diferentes tipos de solos (argila orgânica, argila siltosa e areia) através do sistema de jacto simples. As argilas conduziram aos menores valores de resistência à compressão, seguidas das argilas siltosas e das areias, às quais correspondem os maiores valores de resistência. Assim pode-se concluir que com o aumento da percentagem de argila no solo a resistência da coluna diminui. Ainda em São Paulo, foi conduzido outro teste mas desta vez com o recurso ao sistema de jacto duplo. Tal como para o primeiro caso, obtiveram-se maiores valores de resistência nos solos arenosos e os menores valores nos solos argilosos. [3]

A Figura 2.25 representa uma estimativa dos valores da resistência à compressão uniaxial expectáveis para cada tipo de solo.



**Figura 2.25 – Relação entre resistência à compressão com o tempo de cura para cada tipo de solo [8]**

A existência de água no subsolo com uma velocidade de percolação superior a 6 cm/s poderá provocar o arraste das partículas de cimento antes do seu endurecimento, provocando a diminuição da resistência do material em determinadas zonas. [2] Para evitar este problema pode juntar-se à calda, antes da sua injeção, aditivos com propriedades químicas específicas para a situação como seja o acelerador de presa. [3]

Em Casalmaiocco, Itália, foram conduzidos testes em solos arenosos com um grande teor em água, e verificou-se que em geral a resistência do material tratado varia inversamente com o teor de água no solo (Figura 2.26) aliás, como nos betões, em que a resistência varia com a relação água/cimento. [3]

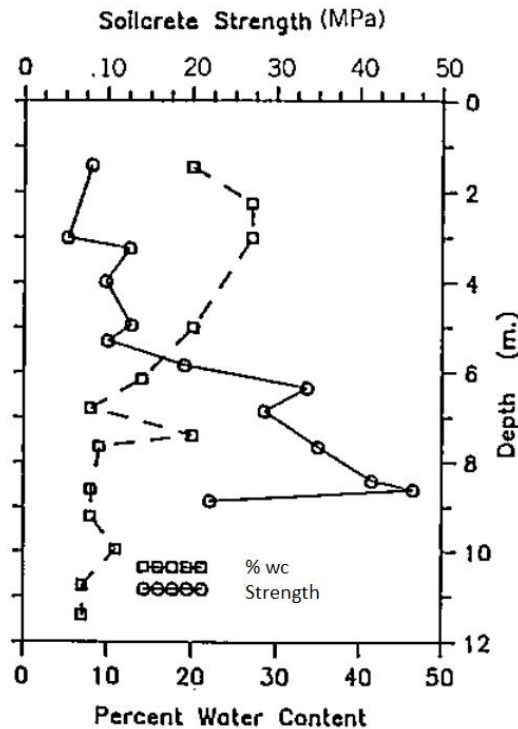


Figura 2.26 – Relação entre a quantidade de água e a resistência do material tratado através do sistema jet1, Casalmaiocco (Itália) [3]

Os autores verificaram também que a quantidade de água no solo e o seu tipo estavam interrelacionados, constatando que a quantidade de água era maior quando a percentagem de finos aumentava. Nos primeiros 4 m, onde a quantidade de água variava entre os 20 e 30 %, a percentagem de finos variava entre os 20 e 75 %. Abaixo dos 6 m, onde a percentagem de finos rondava os 25% e se encontrava algum cascalho, a percentagem de água encontrava-se abaixo dos 10. Assim concluíram que para um baixo teor em água combinado com uma pequena quantidade de finos obtêm-se maiores valores de resistência. [3]

### 2.6.2.2 O sistema de jet utilizado

O sistema de jet utilizado também influencia a resistência do material tratado. Os diferentes parâmetros a determinar para os três principais sistemas de jet traduzem-se,

na fase final de tratamento do terreno, na percentagem de solo substituído e na mistura deste com a calda, o que influencia diretamente a resistência do material tratado.

Para solos arenosos, constata-se que o sistema jet1 é o que apresenta melhores resultados de resistência, seguindo-se o sistema de jet 3 e por fim o sistema de jet2, devido à maior quantidade de ar existente no material tratado. O estudo realizado em Casalmiocco, Itália, confirma este facto. Foram realizadas colunas em solos arenosos através dos três principais sistemas de jet e obtiveram-se os seguintes resultados (Figura 2.27). [3]

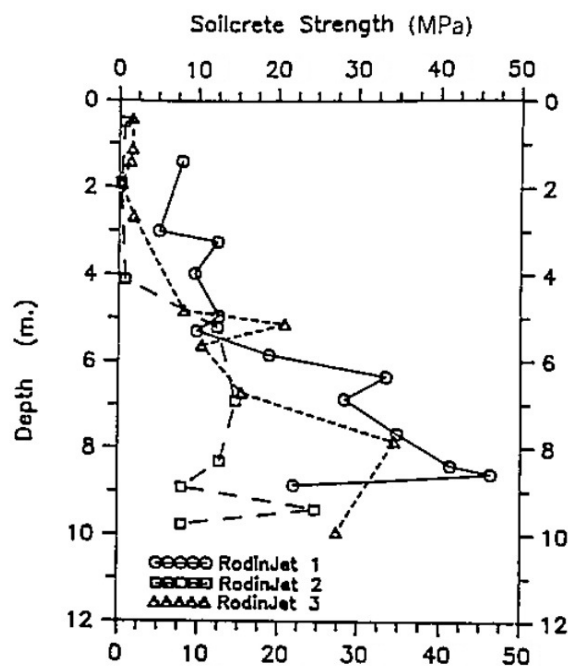


Figura 2.27 – Resistência do material tratado através dos diferentes sistemas de jet em função da profundidade [3]

Verificou-se que apesar do sistema de jet 1 dar origem aos maiores valores de resistência, originou colunas com menores valores de diâmetro (inferior a 50 % do das colunas originadas pelo sistema de jet2 e jet3). [3]

De um modo geral, é o jet 3 que dá origem às colunas com maior resistência, devido ao facto de este ser o sistema que produz uma maior substituição do solo, decorrente de uma maior uniformidade. [2]

### 2.6.2.3 Tempo de impacto do jacto, quantidade de cimento injetada e o tempo de cura

O tempo de impacto do jacto traduz a unidade de tempo por passo (distância percorrida em elevação), sendo a quantidade de cimento injetada diretamente proporcional a este, dependendo também do caudal da calda e da relação água/cimento. [2]

O estudo realizado em São Paulo, Brasil, já referido mostrou que o duplicar do tempo de impacto do jacto, permitiu duplicar a quantidade de cimento injetada levando ao aumento da resistência do solo tratado. Este aumento foi significativo em todos os tipos de solo, como se pode observar na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Relação entre o tempo de impacto do jacto e a resistência do material tratado [3]

Tipo de solo	Velocidade de subida da vara (min/m)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)
Argila orgânica	2.9	200	2
Argila orgânica	5.8	400	4
Argila siltosa	2.9	200	5
Argila siltosa	5.8	400	7
Areia	2.9	200	8
Areia	5.8	400	12

Um outro estudo experimental realizado em Perm, Rússia, em solo homogéneo constituído por areia fina densa ( $\gamma = 17.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 7\text{kPa}$  e  $\phi = 27^\circ$ ), com o objetivo de estudar a relação entre a resistência do material tratado e os parâmetros de execução do *jet-grouting* obteve os seguintes resultados (Figura 2.28). [18]

Constatou-se que a resistência à compressão aumentou de modo assintótico com o consumo de cimento. A partir dos  $700 \text{ kg/m}^3$  deixou de existir um aumento significativo do valor da resistência à compressão. [18]

Relativamente ao tempo de cura da calda constatou-se que este influencia a resistência do material tratado.

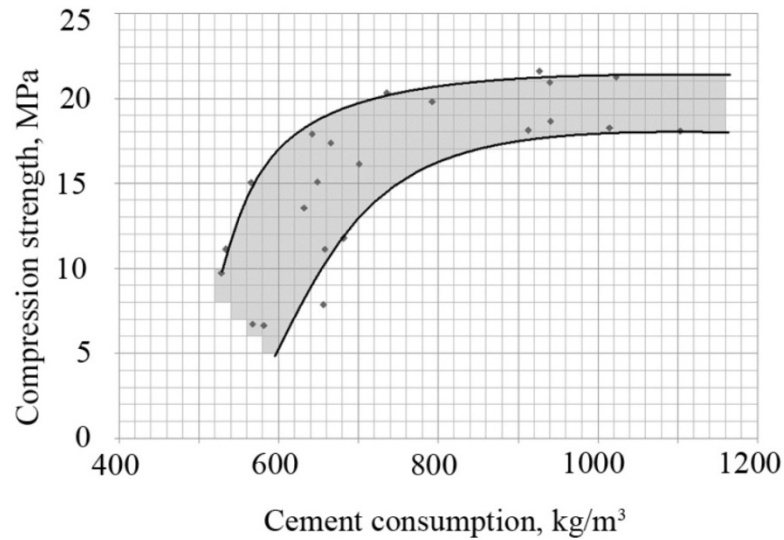


Figura 2.28 – Relação entre a resistência à compressão do material tratado e o consumo de cimento [18]

Um estudo laboratorial foi realizado no Canadá com o objetivo de estudar a evolução da resistência do material tratado com o tempo de cura, a curto prazo (< 24h). Os testes foram realizados numa sala com temperatura controlada a 8 °C, de modo a simular a temperatura encontrada no subsolo. A relação Água/Cimento foi de 1/1 e o solo constituído por areias siltosas, sendo a percentagem de solo nos provetes de 50%. Obteve-se então o gráfico da Figura 2.29. [21]

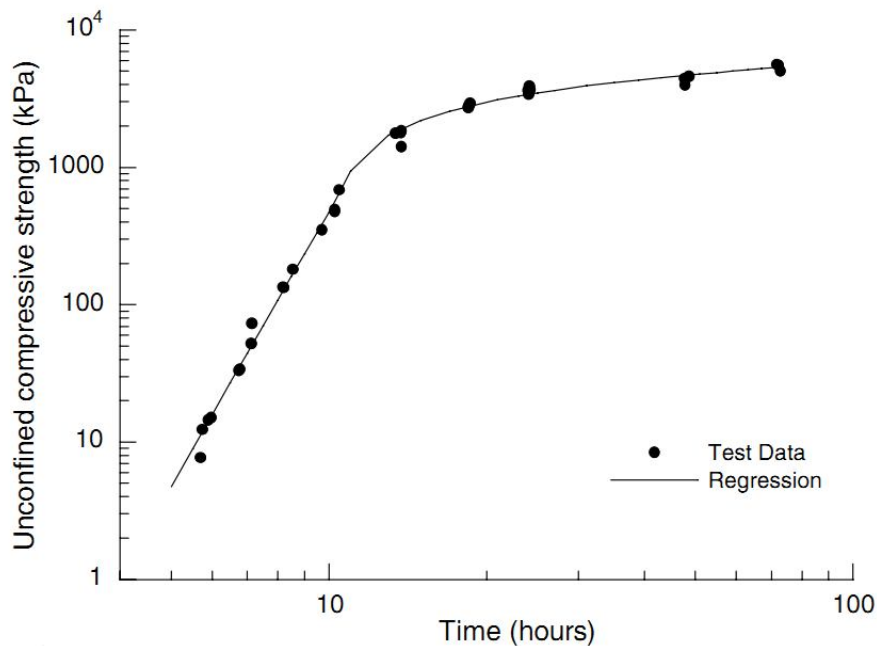


Figura 2.29 – Relação entre a resistência à compressão e o tempo de cura [21]

Os resultados dos testes mostraram que passadas 6 h, o corpo já apresentava resistência suficiente para ser retirado do molde sem sofrer danos significativos, carecendo ainda de um manuseamento cuidado. A partir das primeiras 6 h o endurecimento da amostra foi rápido, obtendo-se bons valores da resistência à compressão nas primeiras 24h.

#### **2.6.2.4 As propriedades químicas da água do subsolo**

A agressividade química do terreno pode alterar as características da calda de cimento alterando conseqüentemente as características finais do material tratado, nomeadamente a resistência. Assim devem ser selecionados tipos e dosagens de cimentos apropriados para cada situação.

#### **2.6.2.5 Dimensões das colunas**

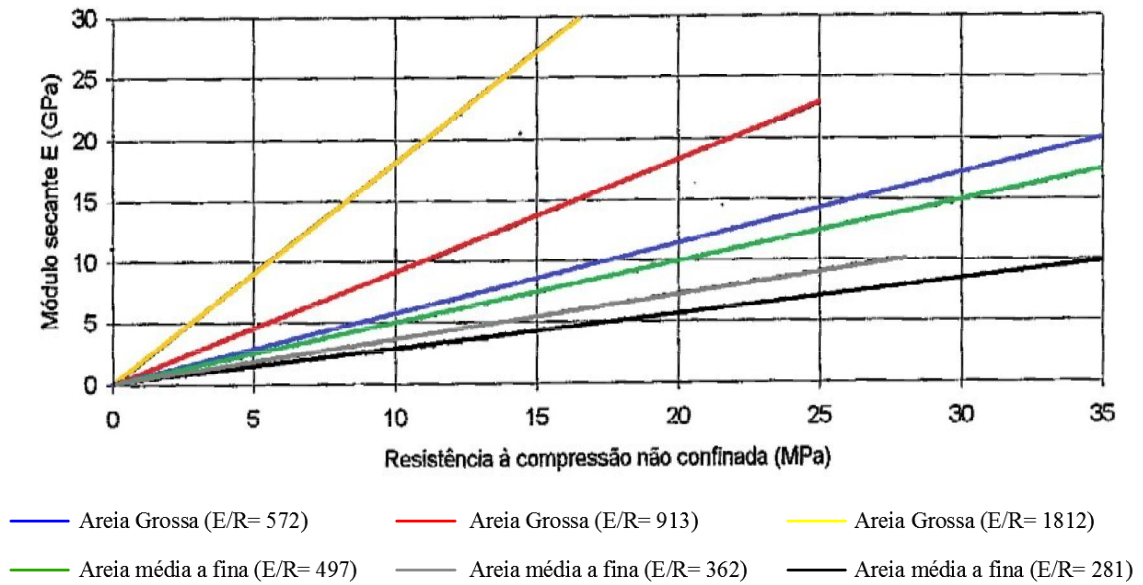
Constatou-se que a resistência do material tratado depende das dimensões das colunas, visto que para o mesmo consumo de cimento por unidade de comprimento da coluna, quanto maior for o seu diâmetro, menor é a resistência obtida. [2]

#### **2.6.3 Deformabilidade**

Alguns ensaios evidenciam que a deformabilidade do material tratado apresenta uma grande dispersão de resultados, superior à verificada pela resistência à compressão simples. [4]

De um modo geral a relação entre o valor do módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples é linear e aumenta com o valor da resistência, como se pode ver na Figura 2.30, elaborada por Gallavresi (1992) com base nos resultados experimentais obtidos na obra do metro de Milão. [2]

Através da análise do gráfico constata-se que existe influência da natureza do solo na relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão simples. Os maiores valores correspondem aos solos formados por areia grossa e cascalho onde a existência de elementos de maiores dimensões diminuem a deformabilidade do material tratado. [2]



**Figura 2.30– Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples. Adaptado de [2]**  
**E/R – módulo de deformabilidade/ Resistência à compressão simples**

O estudo da deformabilidade do material tratado foi alvo de vários estudos de diferentes autores. Apresenta-se em seguida alguns dos resultados.

Welsh e Burke (1991) obtiveram os seguintes resultados através do sistema de jacto triplo: [3]

- Solos granulares, E= 500 MPa
- Solos coesivos, E= 100 MPa

A Tabela 2.13 indica os intervalos de valores obtidos pela Ródio.

**Tabela 2.13 - Valor do módulo de deformabilidade para cada tipo de solo [11]**

Tipo de solo	Areias	Siltos	Argilas
Módulo de deformabilidade (GPa)	6 a 10	4.5 a 7	2.5 a 4

Também Trevi (1990) estudou a relação entre a deformabilidade e a resistência à compressão simples, em solos siltosos e arenosos, obtendo valores bastante dispersos (Figura 2.31). [3]

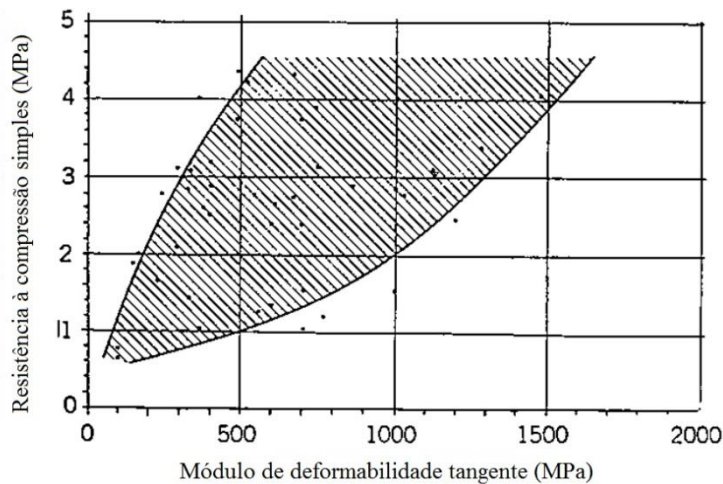


Figura 2.31 – Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples, em solos siltosos e arenosos [3]

Pode observar-se que para o mesmo valor da resistência à compressão simples podemos ter módulos de deformabilidade com o dobro ou até o triplo do valor mais baixo.

O estudo realizado em Perm, Rússia, já descrito em 2.6.2.3 verificou que o módulo de deformabilidade do material tratado aumenta de forma linear com o aumento do consumo de cimento, tendo obtido valores que variam entre os 1000 e 4000 MPa, como se pode ver na Figura 2.32. [18]

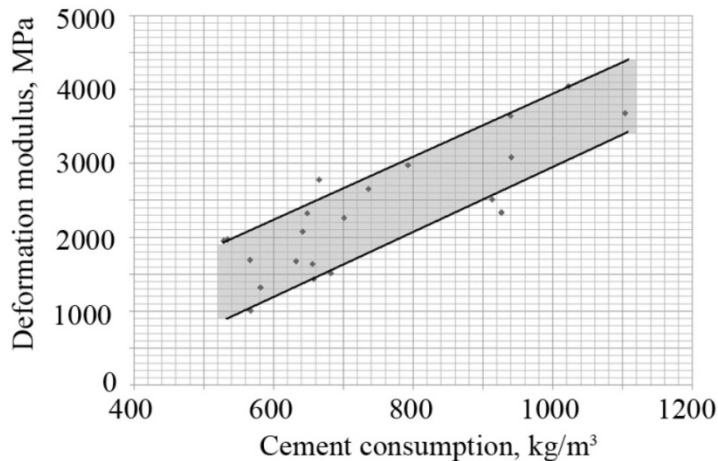


Figura 2.32 – Relação entre o módulo de deformabilidade do material tratado e o consumo de cimento [18]

O estudo laboratorial realizado no Canadá, referido em 2.6.2.3 constatou que o módulo de Young aumenta com o aumento tensão de compressão uniaxial como se pode verificar na Figura 2.33, tendo sido calculado para um módulo de deformabilidade tangente correspondente a 50% da tensão de pico.

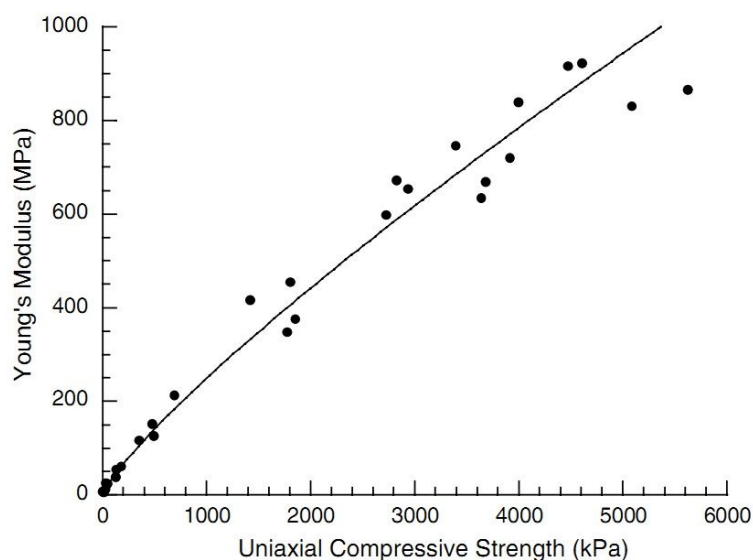


Figura 2.33 – Relação entre a tensão de compressão uniaxial e o módulo de Young [21]

Assim confirma-se a grande dispersão que existe nos resultados obtidos por diversos autores e diversos estudos na tentativa de determinar o módulo de deformabilidade do material tratado, sendo insuficientes para se puderem retirar conclusões fiáveis.

#### 2.6.4 Impermeabilização

A impermeabilização dos terrenos pode ser feita com o recurso à construção de cortinas impermeabilizantes em colunas de *jet-grouting*, onde a continuidade entre as colunas e painéis é um fator determinante no sucesso da intervenção.

Coomber (1985) observou que o coeficiente de permeabilidade do material tratado pode variar entre  $10^{-6}$  e  $10^{-9}$  cm/s se for utilizada bentonite misturada, em determinadas percentagens, com o cimento. Por outro lado Langbehn (1986) lembrou que a permeabilidade global de uma parede de *jet-grouting* é inteiramente condicionada pela continuidade entre as colunas ou painéis adjacentes. [3]

A inadequada sobreposição de colunas é resultado de um desvio durante a fase de perfuração, e para além de este desvio aumentar com a profundidade existe também a possibilidade de a coluna se introduzir numa coluna vizinha que já esteja construída (Figura 2.34). [1]

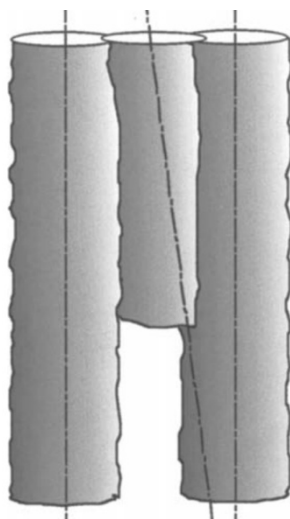


Figura 2.34 – Efeito do desvio durante a execução de uma coluna [1]

Welsh e Burke (1991), através do sistema de jacto triplo, chegaram aos mesmos intervalos de valores ( $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s) referentes à permeabilidade do material tratado em solos granulares e solos coesivos. [3]

Um estudo realizado em Toronto, Canadá, obteve um coeficiente de permeabilidade “in situ” inferior a  $10^{-5}$  cm/s em solos sem coesão e com existência de nível freático, tendo sido reportada uma permeabilidade inicial de  $10^{-3}$  cm/s. Este estudo teve como objetivo a estabilização do solo, o controlo do fluxo da água existente no subsolo e a garantia de segurança na entrada e saída da tuneladora nos poços de ataque. [22]

Os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade variam entre os  $10^{-8}$  e  $10^{-11}$  e segundo Brandi (1989), são praticamente independentes do tipo de solo. Yahiro e Yoshida referem ainda que o coeficiente de permeabilidade do material tratado se reduz em cerca de 100 a 10000 do valor inicial. [2]

## 2.7 Controlo de qualidade

A garantia e o controlo da qualidade são componentes essenciais para obter sucesso num programa de *jet-grouting*. É importante assegurar que as condições no subsolo são consistentes com as assumidas no projeto e que os parâmetros utilizados no projeto são atingidos ou ultrapassados durante a execução do mesmo. [8]

O número de variáveis a definir para a construção de um corpo através da técnica de *jet-grouting* é enorme, exigindo equipamento adequado para o controlo e, também, a

experiência dos técnicos afetos a estes trabalhos, para que consiga características finais aproximadas às exigidas. [23]

Todas as incertezas associadas à qualidade do produto final criam uma lacuna que deve ser preenchida com a normalização de procedimentos e o estabelecimento de regras a seguir, para garantir a qualidade do produto final. [2]

Assim o controlo de qualidade pode ser feito em 4 etapas distintas: [2]

1. Trabalhos de prospeção geotécnica;
2. Realização de colunas de ensaio;
3. Controlo da execução;
4. Controlo e aferição das características do material tratado.

#### Trabalhos de prospeção geotécnica

O estudo geológico-geotécnico é composto por um conjunto de atividades que visam identificar as características do terreno. A sua elevada importância deve-se ao facto de o terreno influenciar diretamente as decisões, o planeamento, o projeto, a construção, o custo, os prazos, a tecnologia de execução e a análise de risco.

Na utilização da técnica de *jet-grouting*, o tipo de terreno pode influenciar o sistema de jacto utilizado, tal como os parâmetros a adotar para a execução dos corpos e o equipamento a utilizar. [2]

Os resultados de uma má campanha de prospeção, inadequada ou incompleta, poderão levar a um aumento dos custos da obra, devido ao facto de o equipamento e os parâmetros de execução não serem os adequados. Isto obrigará a uma alteração nos programas definidos e nos parâmetros de execução do *jet-grouting*. Caso estas alterações não sejam executadas podem obter-se corpos com dimensões e resistência mecânica inferiores às desejadas. [2]

O programa de prospeção geológica-geotécnica deverá estar planeado de forma a esclarecer os seguintes aspetos: [2]

- Resistência mecânica do solo “in situ”. Para solos incoerentes os dados mais relevantes serão o ângulo de atrito interno e a sua densidade (peso volúmico).

Para os solos coesivos importa definir-se a sua consistência, coesão não-drenada e o índice de vazios;

- O teor em água natural do solo. A importância deste parâmetro deve-se à influência do mesmo na resistência do solo, em especial na dos solos coesivos;
- A granulometria do solo. A quantidade de materiais finos e grosseiros existentes no solo condiciona tanto a resistência do material tratado como a escolha do sistema de jacto a utilizar.
- A variação das características do solo em planta como em profundidade. O conhecimento do perfil geológico e geotécnico do terreno permite adaptar os parâmetros de execução do *jet-grouting*. Sem esta informação obter-se-iam corpos com características heterogéneas.
- As condições hidrogeológicas. A execução de colunas a cotas inferiores ao nível freático pode resultar na obtenção de colunas com menores diâmetros. Estudos realizados sobre o assunto mostram que os jactos atingem maiores distâncias quando emitidos em ar comparativamente a meios aquosos (Figura 2.13). Outro fator importante a conhecer é a velocidade de percolação da água, que se for superior a 6 cm/s, poderá arrastar as partículas de cimento antes do seu endurecimento.

Para se conhecerem os aspetos mencionados anteriormente é necessário juntar à campanha geológica e geotécnica a realização de ensaios “in situ” e de laboratório.

Os ensaios “in situ” compreendem a realização de: [2]

- “Ensaio SPT ou CPT, PDL;
- Ensaio de molinete para a determinação da resistência ao corte não drenada em solos argilosos;
- Ensaio Lefranc para a determinação da permeabilidade do solo;
- Ensaio geofísicos.”

Por sua vez os ensaios de laboratório permitem a determinação: [2]

- Da granulometria do terreno através de ensaios de peneiração;
- Do peso específico húmido e seco;
- Do teor em água natural e dos limites de consistência dos solos coesivos;

- Da resistência ao corte através do ensaio de compressão triaxial.

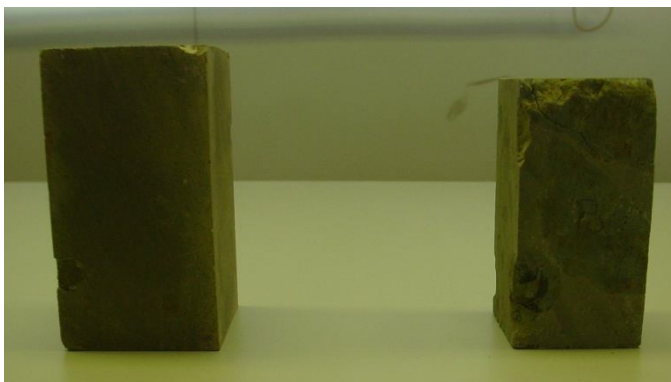
Durante esta fase devem ser identificadas todas as estruturas possíveis de causar conflitos com a atividade a desenvolver, como por exemplo a existência de estruturas vizinhas e enterradas, a existência de pontos de conflito aéreos ou subterrâneos, e as condições existentes no estaleiro.

#### Realização de colunas de ensaio

Como referido anteriormente sabe-se que a execução de colunas de *jet-grouting* depende de determinados parâmetros de execução, tais como, a pressão de injeção, o caudal, a velocidade de rotação e subida da vara. É a interação destes parâmetros com as características do solo que definem o sucesso, ou não, dos resultados finais.

Assim, no sentido de otimizar a solução pretendida e os gastos financeiros, recorre-se à construção de um grupo de colunas, designadas por colunas de teste, com o objetivo de posteriormente se fazerem observações visuais (Figura 2.35b), para verificar a geometria, e se retirarem amostras para ensaios de laboratório (Figura 2.35a) e verificar das suas características.

Os ensaios realizados deverão ainda ser direcionados para a determinação dos parâmetros mais importantes a cada tipo de obra. [2]



a)



b)

**Figura 2.35 – a) Amostras para ensaios de laboratório; b) Coluna de ensaio (Inspeção visual) [24]**

Nas situações em que não é possível a escavação em volta da coluna para a inspecionar visualmente, realizam-se sondagens a várias distâncias do eixo da mesma para que se possa confirmar o valor do diâmetro. No caso de se terem colunas secantes deve-se realizar uma sondagem na intersecção teórica da mesma com o objetivo de verificar a sua continuidade.

Em todas as situações caso não se obtenham as resistências e geometrias esperadas, devem-se realizar novas colunas de teste alterando-se no entanto os valores dos parâmetros de execução. [2]

### Controlo da execução

O controlo de execução da técnica de *jet-grouting* deve ser vista sob duas vertentes diferente. Sob a execução propriamente dita, dos corpos de *jet-grouting*, e sob o controlo dos efeitos da atividade em estruturas existentes.

Relativamente à execução dos corpos de *jet-grouting* existem 3 pontos que devem ser mencionados, o controlo da qualidade do material aglutinante, o controlo dos parâmetros de execução e o controlo do material rejeitado à superfície (refluxo).

A qualidade do material aglutinante desempenha um papel fundamental na formação das colunas de *jet-grouting* e como tal deverá ser sujeito a ensaios de forma a verificar se, se adequa às características exigidas pelo material tratado. Em 2.8.1 descrevem-se as características exigidas às caldas utilizadas para a injeção em terrenos.

O controlo dos parâmetros de execução é feito através de sistemas de aquisição de dados, que monitorizam em tempo real e registam de forma continua os parâmetros de execução do *jet-grouting*, nomeadamente na fase de furação e injeção (Figura 2.36).

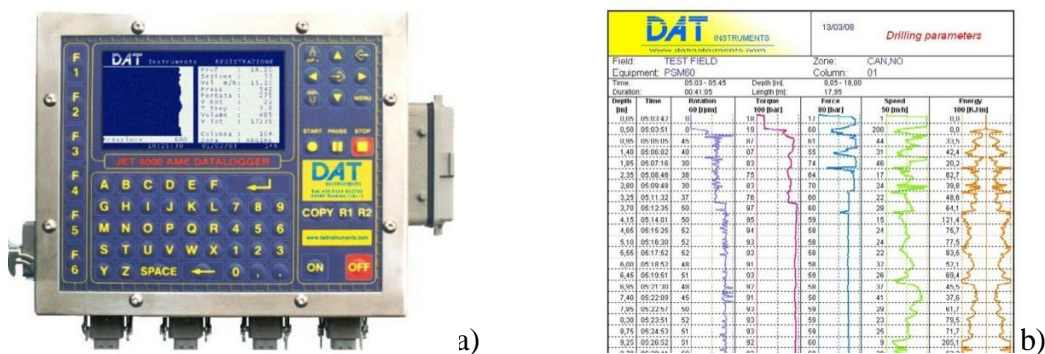


Figura 2.36 – a) Unidade de aquisição de dados; b) Registo dos parâmetros de execução [25]

Durante a fase de perfuração os parâmetros a medir/controlar são o momento torsor e a força que produz um deslocamento unitário na vertical, a velocidade de rotação, a profundidade da vara e a respetiva inclinação.

Na fase de injeção registam-se os valores da pressão da água, ar e calda, do caudal, as velocidades de rotação e subida da vara. [2]

Para além da vantagem de se guardarem os registos efetuados, a monitorização do processo permite detetar a ocorrência de avarias mecânicas, como a obstrução dos bicos de injeção, e a caracterização qualitativa dos terrenos atravessados. Segundo Carreto [2], “...*é possível detetar alternâncias entre solos mais finos e mais grosseiros em terrenos aluvionares, determinar a que profundidade se encontra o maciço rochoso, identificar fenómenos de carsificação do terreno e ainda localizar blocos ou outro tipo de obstruções...*”.

O material rejeitado e afluído à superfície (Figura 2.37), constituído por água, cimento e partículas do solo, é um dos mais importantes indicadores no controlo de qualidade durante a execução das colunas de *jet-grouting*. A observação visual do refluxo e das suas características deve ser mantida durante toda a fase de execução com o objetivo de detetar possíveis anomalias.



**Figura 2.37 – Material rejeitado à superfície [26]**

O controlo do fluxo do material rejeitado permite:

- Identificar a existência de uma obstrução no espaço anelar por onde ascende o material e atuar de forma a evitar o aumento da pressão no interior do terreno e consequentemente o levantamento do mesmo, o fenómeno de fracturação hidráulica.
- Retirar informações sobre eventuais alterações do terreno que está a ser tratado. A alteração deste pode ser identificada através da alteração da cor do material expelido.
- Observar a densidade do material rejeitado com o objetivo de avaliar a eficiência da ação erosiva do jacto. Assim, o material com maior densidade indica que o jacto está a realizar o corte efetivo do terreno, enquanto a inexistência de solo indica que o tratamento não está a ser eficaz.

Relativamente à obstrução do espaço anelar, as medidas a tomar são o aumento da relação água/cimento e/ou a realização de um pré-furo de maior diâmetro o que aumenta o espaço anelar. No entanto, para o primeiro caso, o aumento da relação água/cimento implica uma diminuição da resistência do material.

O controlo do material rejeitado permite também ajustar os parâmetros de execução do *jet-grouting*.

A técnica de *jet-grouting* pode provocar assentamentos ou levantamentos no terreno envolvente à zona que está a ser tratada. O levantamento do terreno deve-se à obstrução do espaço anelar que provoca um aumento da pressão no interior do terreno e leva à sua fracturação hidráulica. Por outro lado, os assentamentos devem-se à formação de material pouco resistente devido à utilização de um volume elevado de material fluidificado, e geralmente ocorre nos primeiros dias após a injeção. [2] Assim torna-se importante monitorizar a zona envolvente à obra para evitar possíveis danos nas estruturas existentes.

Esta monitorização pode ser feita com recurso a dispositivos de observação como por exemplo:

- Extensómetros instalados em estruturas com o objetivo de medir as deformações (extensões) ocorridas;
- Inclínómetros instalados no interior do terreno têm como objetivo medir os deslocamentos horizontais internos;
- Clinómetros instalados nas estruturas com o objetivo de medir rotações causadas por assentamentos diferenciais;
- Piezómetros instalados no terreno com o objetivo de avaliar a presença e a variação dos níveis da água;
- Marcas topográficas instaladas na superfície do terreno com o objetivo de medir os deslocamentos ocorridos devido ao movimento global do solo;
- Alvos topográficos instalados nas estruturas com o objetivo de observar cotas e coordenadas.

#### Controlo e aferição das características do material tratado

A aferição das características do material tratado deve ser feita com recurso aos ensaios de laboratório e “in situ” mencionados anteriormente.

A elaboração de um bom plano para o controlo da qualidade do tratamento pode também diminuir os custos associados à obra. Caso as características do material tratado não sejam as pretendidas terá de se repetir o processo de tratamento.

O *jet-grouting* é um dos principais métodos de tratamento de terreno, apesar das incertezas inerentes à aplicação do método, por isso a experiência e a gestão feita pelos construtores são a chave para prevenir o insucesso dos projetos de engenharia. [27]

## **2.8 Materiais e equipamentos**

### **2.8.1 Materiais**

O sucesso da aplicação da técnica de *jet-grouting* está também dependente das características do material aglutinante. As caldas de cimento têm como principais vantagens a sua durabilidade, estabilidade, facilidade de preparação e utilização, baixo

custo e a grande disponibilidade no mercado dos materiais necessários à sua constituição. [28]

Para que as caldas desempenhem as suas funções é necessário que se estudem determinadas características, tais como: [29]

- Fluidez que influencia a injeção da calda e a trabalhabilidade no sentido de facilitar a sua colocação em obra.
- Exsudação que deve ser suficientemente baixa para evitar a segregação e sedimentação dos materiais. Este problema pode surgir ainda antes da injeção das caldas, por isso é importante que se reduza o tempo entre as etapas de preparação e injeção e se mantenha a calda em constante agitação.
- Teor em ar que influencia negativamente a resistência das caldas, visto que cria vazios quando o material atinge o estado endurecido.
- Durabilidade que é inevitavelmente influenciada pela agressividade química do meio, mas também pela razão A/C, o tipo de cimento e a porosidade da mistura. Caso seja afetada poderá não cumprir as exigências funcionais para as quais foi destinada.
- Resistência mecânica para que não fiquem comprometidas as funcionalidades e exigências pretendidas para a obra em causa. A calda de cimento deverá ter capacidade para acompanhar as deformações impostas, com uma adequada resistência mecânica.

Relativamente à sua composição é importante ter em conta seguintes componentes:

- A relação Água/Cimento que é um dos principais fatores que influenciam a resistência da calda [29], e o seu valor está, normalmente, dentro do intervalo 0.6 a 1.2. [3]
- O Cimento que deve garantir o cumprimento das funções a que se destina a calda de cimento. [29] O CEM I 42.5R<sup>1</sup> é o aconselhável para a aplicação da técnica de *jet-grouting*, sendo o ideal o CEM II/A-L 42.5R<sup>2</sup>. [30]

---

<sup>1</sup> Cimento Portland

<sup>2</sup> Cimento Portland de calcário

- A água que reage quimicamente com o cimento, dando origem a compostos químicos hidratados que conferem resistência mecânica à calda. [29] Deve ser utilizada água potável ou água com uma origem aprovada para o efeito de forma a não existirem efeitos adversos. [31]
- Os aditivos que têm como objetivo melhorarem algumas das características da calda, tornando-a mais adequada a certas exigências.

## 2.8.2 Equipamento

Os equipamentos a utilizar durante os trabalhos de realização das colunas de *jet-grouting* dependem do sistema de Jet escolhido. [4] A Figura 2.38 ilustra um estaleiro de *jet-grouting* em que se observa o silo de cimento, a central misturadora, a bomba de injeção, o compressor (jet2 e jet3), o tanque de água, o gerador e a máquina de furação e injeção.

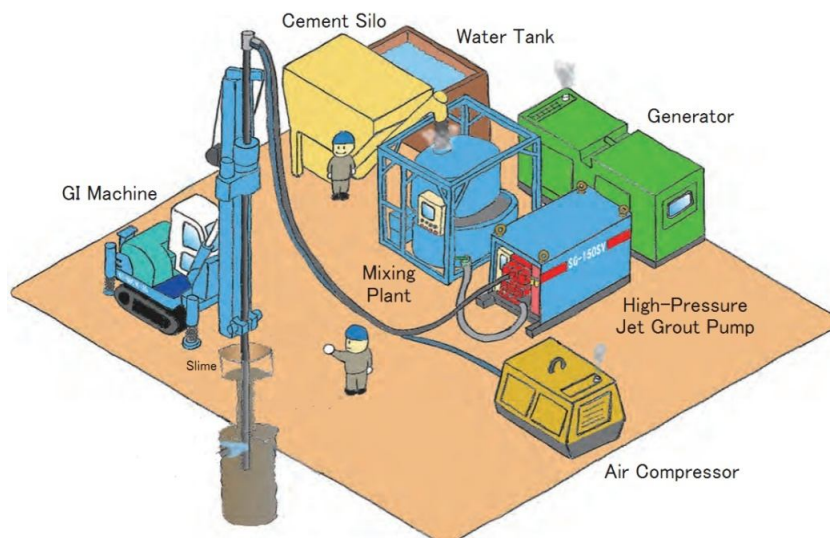


Figura 2.38 – Estaleiro necessário à realização da técnica de *jet-grouting* [10]

É importante que os equipamentos sejam adequados e tenham potência suficiente para atingir os valores dos parâmetros de execução requeridos pela obra (e o solo) em causa. [6] O estaleiro necessário à aplicação da técnica de *jet-grouting* deve ser instalado o mais próximo possível da zona a tratar para que se evitem os custos adicionais relativos ao transporte de materiais e da calda de cimento. [4]

O processo de mistura da calda inicia-se na central misturadora. É inserida água e em seguida o cimento vindo do silo, e por último os possíveis aditivos. Assim que estiver

pronta a calda é bombeada, a alta pressão, para a máquina de injeção. A produção da calda é constante, de forma a não ser necessário parar o processo de injeção. [4]

A máquina de injeção e furação dever ter capacidade para atingir a profundidade pretendida e poderá, ou não, apresentar um monitor computadorizado que regista todos os dados durante a fase de execução. [4]

Prevendo a realização de trabalhos em espaços exíguos, a máquina de injeção e furação deverá possuir vertentes que lhe permitam se adaptar a esses espaços. [4]

## **2.9 Vantagens e desvantagens**

A evolução da técnica de *jet-grouting* e a experiência adquirida ao longo dos anos permitiram identificar diversas vantagens e desvantagens associadas à técnica.

Vantagens associadas à técnica de *jet-grouting*:

- Grande versatilidade. É possível aplicar a técnica a um vasto conjunto de tipos de terrenos. [4]
- Grande aplicabilidade, uma vez que pode ser aplicado em locais de reduzido espaço e de difícil acesso, como túneis, caves de edifícios. As máquinas de *jet-grouting* podem ser pequenas e relativamente leves, o que facilita o seu transporte. [4]
- O ruído e as vibrações emitidos pela execução da técnica são reduzidos. Esta característica é bastante importante na construção em meios urbanos. [4]
- A existência de nível freático não é fator condicionante para a aplicação da técnica, no entanto é necessário ter em conta a velocidade de percolação da água para que as partículas da calda de cimento não sejam arrastadas. [4]
- Permite o tratamento do terreno a grandes profundidade e em sítios específicos. [8]
- A resistência e permeabilidade dos materiais tratados são previsíveis. [8]
- São utilizados materiais inertes. [8]
- É possível obter uma grande variedade de geometrias. [8]
- Execução mais rápida relativamente a outros métodos alternativos. [8]
- Não é necessária escavação para a realização da técnica. [32]

- O material tratado não necessita de grandes intervenções exceto em casos em que esteve exposto a fenómenos de grande erosão. [32]
- O *jet-grouting* tem a capacidade de atravessar obstruções, como pedregulhos, estruturas enterradas, e inclui-las no material da coluna tratada. [33]

Desvantagens associadas à técnica de *jet-grouting*:

- Reduzida capacidade de resistência à tração. [4]
- É necessário um controlo de qualidade rigoroso para que as características das colunas sejam as requeridas pelo projeto. [4]
- O custo da técnica aumenta com o aumento da profundidade. [4]
- O *jet-grouting* pode ser considerado dispendioso relativamente a outros métodos, mas a sua aptidão para determinadas situações torna-o uma opção viável. [34]
- Existe dificuldade em encontrar equipas com o equipamento especializado e adequado, o que leva ao aumento do prazo de execução dos trabalhos. [32]

As condições dos terrenos e as características requeridas para o material tratado são quem determina qual o sistema mais adequado tecnicamente e o mais económico. A Tabela 2.14 mostra esta relação.

**Tabela 2.14 – Sistemas de *jet-grouting* – Capacidade técnica vs. Preferência económica [35]**

Tipo de solo	Capacidade técnica	Preferência económica
Cascalho	Jet 1, jet 2 e jet 3	Jet 1
Areias limpas	Jet 1, jet 2 e jet 3	Jet 2
Areias siltosas	Jet 1, jet 2 e jet 3	Jet 2 e jet 3
Silte	Jet 3	Jet 3
Argila	Jet 3	Jet 3



## 3 *Jet-grouting* em túneis

### 3.1 A problemática dos túneis

A execução de trabalhos subterrâneos, comparativamente às construções na superfície envolve a resolução de inúmeros e mais complexos problemas de engenharia civil, decorrentes do desconhecimento do comportamento efetivo dos terrenos. Destes, é mais difícil conhecer, antecipadamente, alguns dos dados mais importantes necessários ao projeto, que por vezes, só serão conhecidos no decorrer das obras de construção.

Nas construções à superfície, os materiais utilizados na sua conceção, normalmente aço e betão, as propriedades resistentes e de deformação são bem conhecidas. Contudo, estes tipos de obras exigem apoios nos terrenos, as fundações, pelo que a caracterização das suas propriedades mecânicas se torna uma atividade importante e focalizada nos locais onde a estrutura apoia. Aqui, o grau de conhecimento é limitado aos pontos de apoio/fundação, sendo que as soluções desenvolvidas e uma vez executadas serão pouco ou nada afetadas pelo comportamento futuro dos terrenos, ocorrendo o equilíbrio na sua configuração final.

A abordagem das construções subterrâneas é realizada de modo diferente, uma vez que a sua execução implica a atuação num meio que se encontra naturalmente em equilíbrio, o terreno, no qual a escavação de uma abertura induz a perturbação daquele estado de equilíbrio, originando movimentos dirigidos para o interior da escavação. Aqui, a obra é a própria escavação/abertura, sendo necessário um grau elevado de conhecimento das propriedades do terreno onde esta se executa.

Sendo que a obra subterrânea não é uma estrutura singular e pontual, antes ocupando um determinado volume do espaço subterrâneo/terreno, o grau de conhecimento não se limita ao espaço que ocupa, mas a um dado volume de terreno que a envolve, devido às heterogeneidades geológicas que são reconhecidas nos meios naturais. Acresce a esta situação que a própria escavação da obra, ao induzir movimentos dos terrenos que a envolve, afeta as suas propriedades mecânicas por modificar o campo de tensões-extensões pré-existentes (Figura 3.1) e, também, pelo próprio processo construtivo sequencial em que o estado de equilíbrio final só se verificará decorrido algum tempo após a escavação.

Portanto, na execução de obras ocorrem dificuldades de prever o seu comportamento em condições que não são inteiramente conhecidas. [36]

A análise do comportamento de aberturas realizadas em meios elásticos sujeitos a campo de tensões verticais, evidencia que ocorre a modificação da trajetória das tensões principais com concentração de tensões de compressão junto aos hasteados/parede da abertura e de tração na abóbada da cavidade, gerando-se um campo complexo de tensões de corte na envolvente do túnel.

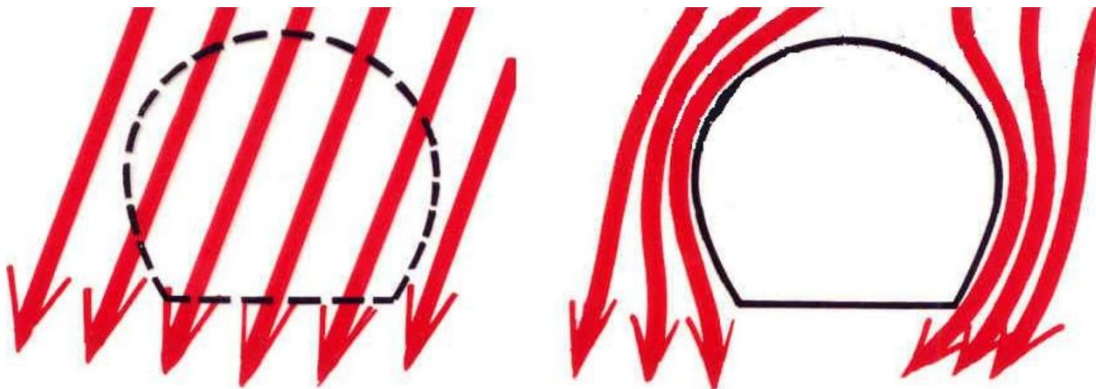


Figura 3.1 – Modificação da trajetória das tensões produzida pela escavação [37]

Observando o comportamento de obras subterrâneas sob a analogia de comportamento de meios elásticos verifica-se que sob certas condições se poderá formar um *efeito de arco* na abóbada (e por simetria na soleira) que devidamente equacionado será um elemento determinante na construção e segurança das obras subterrâneas.

A formação do citado *efeito de arco* depende do valor das tensões em causa e das características mecânicas do terreno que, segundo Lunardi [36], poderá ocorrer de diferentes modos (Figura 3.2):

1. Próximo da secção de escavação;
2. Longe da secção de escavação;
3. Não ocorrer de forma alguma (inexistente).

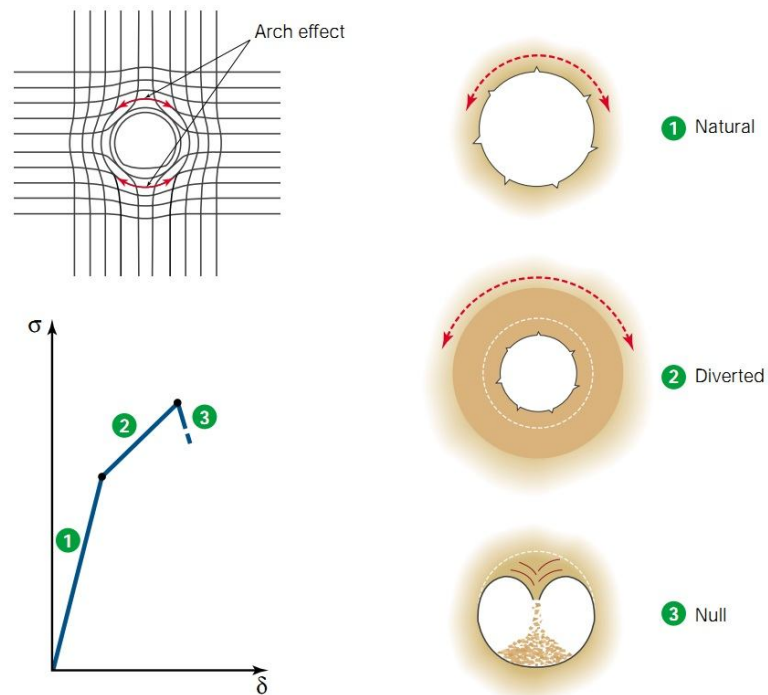


Figura 3.2 – Formação do *efeito de arco* [36]

No primeiro caso o *efeito de arco* ocorre quando o terreno envolvente à cavidade exibe capacidades mecânicas para responder elasticamente à perturbação e permitir, na abobada (e simetricamente na soleira) da abertura, o desvio do fluxo de tensões. Neste caso o *efeito de arco* ocorre naturalmente [36].

O segundo caso ocorre quando o terreno envolvente à cavidade não exibe capacidades mecânicas suficientes para resistir às tensões geradas e responde plasticamente, pelo que o desvio do fluxo de tensões se realiza mais para o interior do terreno, onde este permanece em estado elástico. Esta profundidade correspondente ao volume de terreno plastificado. Nesta situação o *efeito de arco* forma-se longe das paredes de escavação. Para que este ocorra é necessário “ajudar” o terreno através de ações de melhoria das suas propriedades, com recurso a meios de intervenção adequados [36].

No terceiro caso o *efeito de arco* é inexistente, ou seja, o terreno em volta da abertura não tem capacidade para resistir às tensões geradas e responde com o colapso da cavidade, não produzindo o desvio do fluxo de tensões. Neste caso o *efeito de arco* tem de ser induzido artificialmente antes de o terreno ser escavado [36].

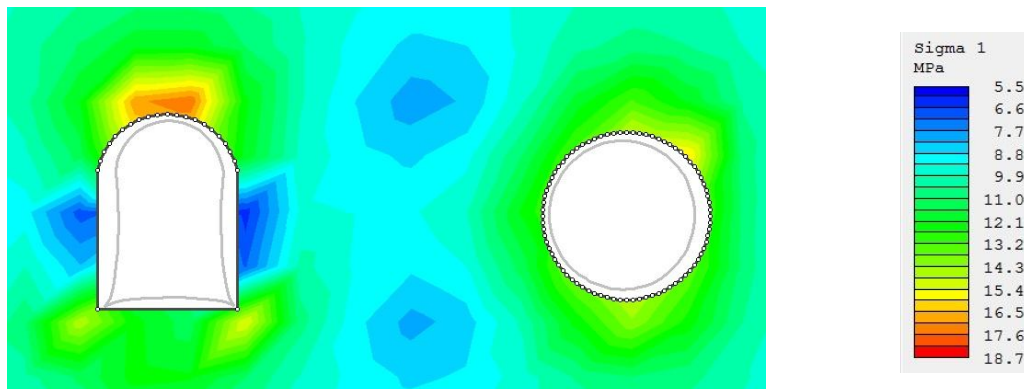
A primeira e mais importante tarefa na construção de um túnel é saber “se” e “como” pode ser conseguido o *efeito de arco* quando este é escavado. Depois disto como se

garante a sua formação através do planeamento da escavação do túnel e através da realização de operações de estabilização em função das condições pré-existentes de tensão e deformação. [36]

Para o sucesso nesta tarefa, que acarreta incertezas, é importante obter o máximo de conhecimento sobre diferentes aspetos:

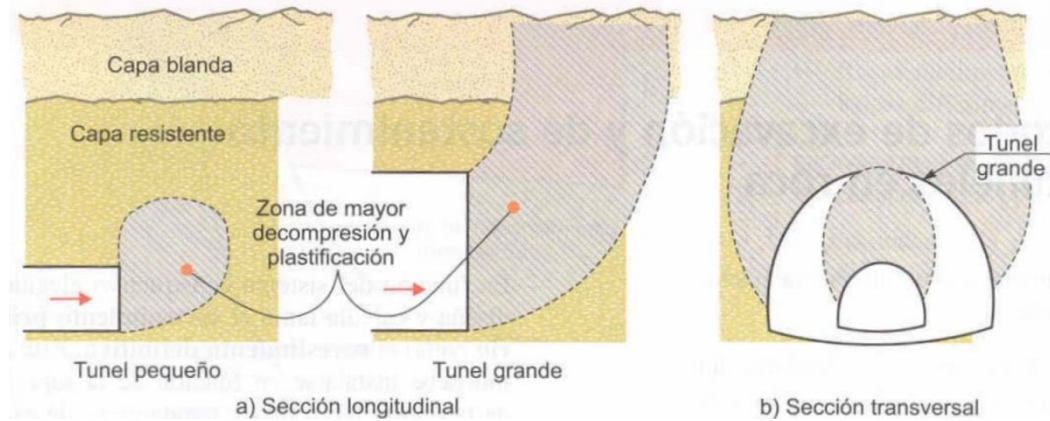
- O meio onde será construído o túnel. O terreno será o principal material de construção e as suas características podem alterar-se de forma inesperada.
- A ação de escavar. A alteração do estado de tensão do terreno causa distúrbios no meio envolvente. O volume de terreno afetado depende das tensões a que estão sujeitas as paredes das cavidades e das suas propriedades geomecânicas.
- A resposta que o terreno terá à ação da escavação em termos de deformações. O avanço da escavação e o acréscimo do aumento de tensões e instabilidade das paredes do túnel.

Para além do descrito anteriormente a forma e tamanho da secção do túnel e a presença de água também influenciam a sua estabilidade. A forma da secção influencia a distribuição das tensões em volta do túnel. As secções podem variar desde a forma retangular até à circular, ou serem um misto de ambas. As secções quadrangulares apresentam uma concentração de tensões nos cantos que causam grandes momentos fletores nos revestimentos instalados nos túneis e são as zonas por onde geralmente se dão as roturas. Por sua vez as secções circulares apresentam melhores comportamentos e a distribuição das tensões de modo mais homogéneo. [38] [39] A Figura 3.3 ilustra a forma como as tensões se distribuem em diferentes tipos de secções e as deformações induzidas.



**Figura 3.3 – Distribuição das tensões verticais em duas cavidades diferentes**

Por sua vez, o tamanho da secção de um túnel influencia a capacidade resistente exigida aos suportes tanto a curto como a longo prazo (Figura 3.4).



**Figura 3.4 – Influência do tamanho do túnel na estabilidade do maciço [40]**

A presença de água no solo é um dos parâmetros que deve ser estudado com grande pormenor, visto que modifica as características do solo, o seu comportamento, tornando as condições de trabalho muito mais complicadas. [38]

Um dos principais desafios na construção de um túnel, em condições geotécnicas difíceis, passa por controlar as deformações das paredes e frente de escavação. Sem meios de suporte ou reforço adequados o solo plastifica e tende a mover-se para dentro da cavidade podendo causar a queda de terreno da parte superior do túnel, deslocamento das paredes do túnel, da frente de escavação, e conseqüentemente, as estruturas existente na superfície, até à sua rotura. [41] A manifestação dos fenómenos de instabilidade dos túneis está ilustrada na Figura 3.5.

Na tentativa de conhecer os fenómenos associados à escavação de túneis com o objetivos de atuar da forma mais correta na sua estabilização foram realizados estudos ao longo das últimas décadas permitiram distinguir três tipos de deformações: [36]

1. Extrusão, deformação que ocorre na frente da escavação na direção do eixo longitudinal do túnel. Depende das propriedades de resistência e deformação do terreno no núcleo (volume de terreno que está à frente da face do túnel). Teoricamente tem uma forma cilíndrica com um comprimento aproximadamente igual ao diâmetro do túnel.

2. Pré-Convergência, deformação teórica do núcleo. Depende da relação entre as propriedades de resistência e de deformação do núcleo e o seu estado de tensão inicial.
3. Convergência, deformação da cavidade já escavada, de orientação radial dirigida para o interior do túnel (centro).

A Figura 3.5 ilustra o referido anteriormente.

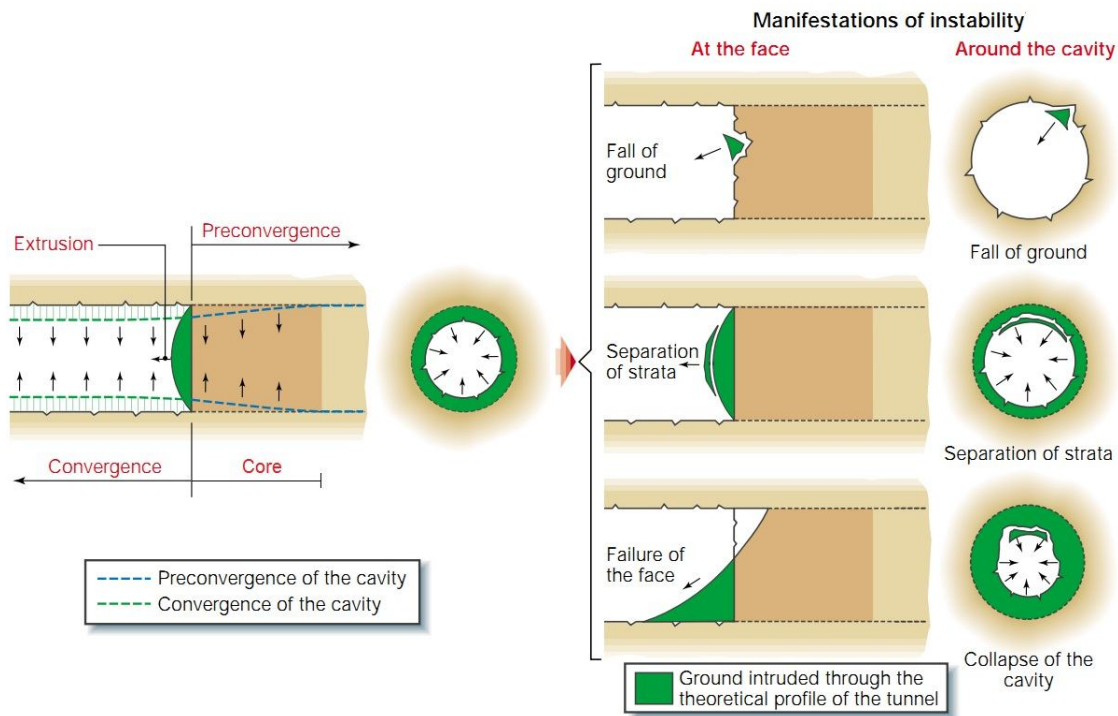


Figura 3.5 – Tipos de deformações e instabilidade dos túneis [36]

No seguimento de estudos de deformações ocorridas nos túneis verificou-se que o núcleo pode ser tratado como uma ferramenta de estabilização da cavidade, a curto e a longo prazo. Assim, deve direcionar-se a atenção para as características do núcleo, ou seja para a sua estabilidade, tendo sido definidos três tipos de comportamento (Figura 3.6).

- A. Frente de escavação estável
- B. Frente de escavação estável a curto prazo
- C. Frente de escavação instável

Na situação A, quando a frente de escavação tem um comportamento estável, a estabilidade global do túnel é praticamente garantida mesmo na ausência de qualquer intervenção para o efeito.

Nas situações B e C, prevendo-se a instabilidade da frente de escavação, portanto da cavidade, são necessárias medidas de estabilização através de confinamento. [36]

Esta situação ocorre em terrenos de diferentes qualidades geotécnicas, pelo que um processo de melhoria dessas propriedades, permite restabelecer condições de estabilidade do núcleo. Assim, a melhoria do terreno nas frentes de escavação pode ser obtida por injeções com recurso à técnica de *jet-grouting*.

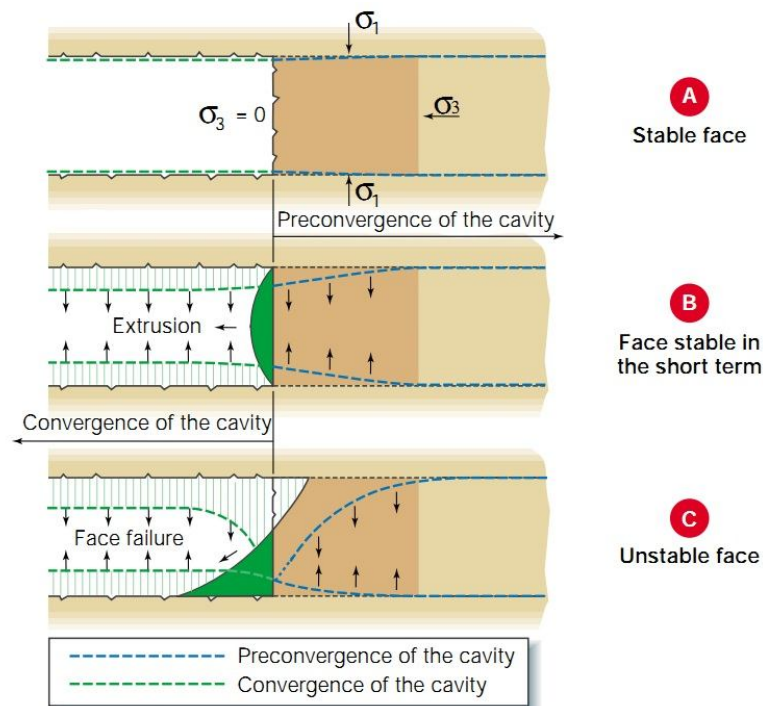


Figura 3.6 – Definição das categorias de comportamento vendo o núcleo como instrumento estabilizados [36]

Como técnica de estabilização das frentes (núcleos) de túneis em solos, tem sido recorrente o *jet-grouting*. Além destas situações, recorre-se ao *jet-grouting* para:

- Consolidação da frente de escavação e da abóbada do túnel, com o objetivo de melhorar as propriedades de resistência e deformação do maciço.
- Tratamento de camadas muito permeáveis, melhorando as propriedades de resistência e deformação do terreno, como minorando os efeitos hidrogeológicos. [36]

- Construção de túneis em áreas urbanas, densamente construídas, produz inúmeros conflitos, decorrentes dos assentamentos à superfície e também, danos em infraestruturas enterradas.

### **3.2 Principais aplicações**

A tecnologia associada ao *jet-grouting* tem vindo a sofrer um enorme progresso durante as últimas décadas. Estes avanços estão relacionados com a evolução do equipamento, das técnicas operacionais, com o estudo dos materiais utilizados e com as particularidades de cada projeto. [42]

A técnica de *jet-grouting*, inicialmente utilizada em trabalhos relacionados com as fundações e contenção de terras, rapidamente foi aplicada a outros campos da engenharia civil devido à sua capacidade de adaptação às várias situações operacionais. [42]

A técnica de *jet-grouting* é vista como uma ferramenta excepcionalmente versátil quando se considera o melhoramento do terreno como parte de um projeto. Existem assim diversas situações às quais a técnica se adequa, e que se podem agrupar da seguinte modo: [1]

- Controlo das águas subterrâneas: prevenir a entrada de água pelas paredes ou base de uma escavação, controlar as águas subterrâneas durante a construção de túneis, prevenir ou reduzir as infiltrações em estruturas com o objetivo de reter água, como nas barragens.
- Controlo de movimentos: prevenir o movimento do terreno ou de estruturas durante as atividades de escavação, suportar a frente de escavação e as paredes dos túneis durante a sua construção ou, a longo prazo, aumentar o fator de segurança durante a construção de taludes, fornecer suporte a pilares ou paredes para prevenir ou reduzir movimentos laterais.
- Suporte: reforçar as fundações de edifícios durante as escavações, melhorar as características do solo para evitar a rotura devido às cargas aplicadas neste, transferir as cargas das fundações através de materiais pouco resistentes até a estratos que tenham a resistência adequada.

- Ambiental: Prevenir ou reduzir a contaminação de sistemas de água através do encapsulamento do solo contaminado, criar barreiras verticais ou horizontais a fluxos contaminantes, introduzir material radioativo no solo para tratar contaminantes específicos através da criação de barreiras permeáveis reativas.

As situações descritas acima mostram que o *jet-grouting* tem uma amplitude de utilidades, mas no âmbito deste trabalho serão detalhadas aquelas relacionadas com os túneis.

### 3.2.1 Consolidação da abóbada e da frente de escavação de túneis

O recurso à consolidação do terreno na abóbada e na frente de escavação de túneis em terrenos de má qualidade é uma prática corrente nos dias de hoje, permitindo a realização da escavação com maior segurança a ritmo elevado e com menores deformações. [43]

A consolidação do terreno na abóbada dos túneis pode ser feita com recurso à execução de colunas sub-horizontais ou sub-verticais de *jet-grouting* (Figura 3.7) que são realizadas no terreno em volta da abóbada do túnel, quer transversalmente quer longitudinalmente.

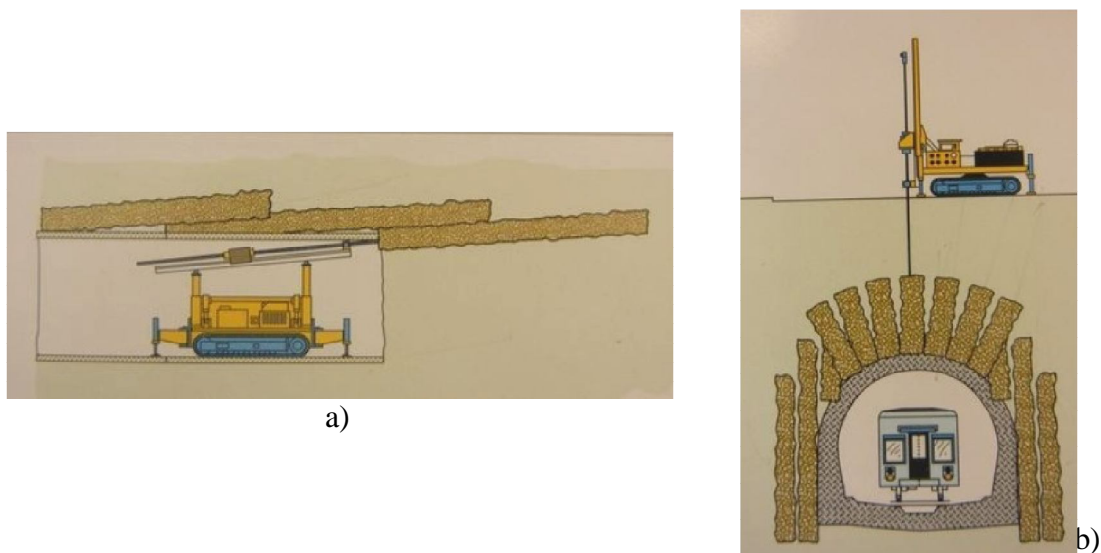


Figura 3.7 – Reforço da abóbada do túnel: a) Colunas sub-horizontais; b) Colunas sub-verticais [44]

Este é um método designado de pré-suporte pois as colunas são realizadas antes da escavação da secção permitindo que, durante a escavação já se encontrem solicitadas isto é, reforçando o terreno às perturbações induzidas pela própria escavação. Esta

técnica tem evidenciado um contributo elevado para a segurança, dando provas da sua eficácia quando utilizada a grandes ou pequenas profundidades.

A tradicional disposição das colunas sub-horizontais, ou enfilagens de *jet-grouting*, dá origem a um arco de terreno reforçado/melhorado ao qual se dá o nome de “guarda-chuva”. Esta disposição permite que se crie uma coroa de terreno reforçado, excêntrico com o túnel, estabilizando-se assim a abóbada e a frente de escavação nas direções transversal e longitudinal.



Figura 3.8 – Enfilagens de *jet-grouting* “Guarda-chuva” [24]

A diversidade das condições locais, como a qualidade do terreno, a área da secção transversal do túnel, a forma da secção, o comprimento do avanço da escavação, o maior ou menor recobrimento e a proximidade de outras estruturas, torna o tipo e extensão do tratamento bastante variados. Poderemos ter “Guarda-chuvas” simples (Figura 3.9a) ou duplos (Figura 3.9b), tratamentos de parte ou totalidade do perímetro da secção, diferentes diâmetros e afastamentos de colunas variáveis ou ainda colunas armadas ou não.

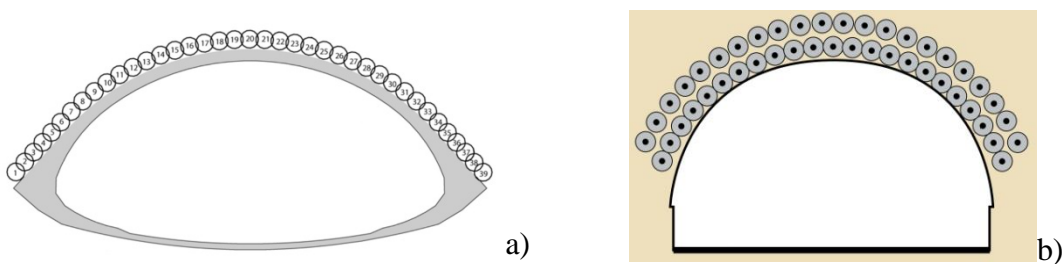


Figura 3.9 – a) “Guarda-chuvas” simples; b) “Guarda-chuvas” duplo [45] [21]

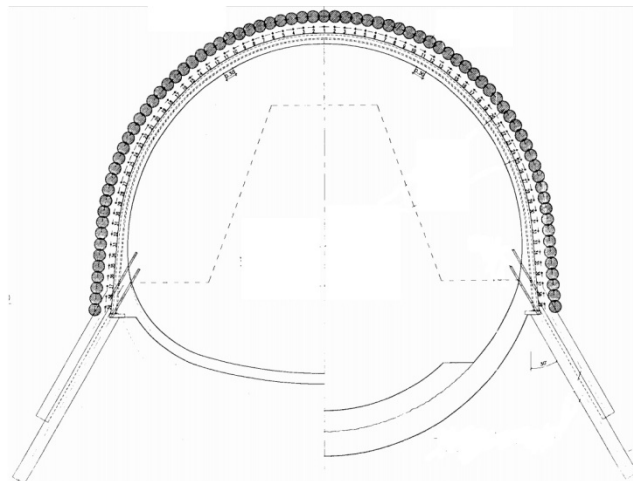
Normalmente não são requeridos diâmetros superiores a 0.5 m o que leva à escolha do sistema de jacto simples para a execução das colunas sub-horizontais. [43]

Relativamente ao afastamento das colunas, estas poderão ser secantes ou espaçadas. As colunas secantes são geralmente utilizadas em solos moles ou solos que se encontrem abaixo do nível freático.

Em solos capazes de mobilizar o *efeito de arco*, e em algumas situações, as colunas de *jet-grouting* podem ser convenientemente espaçadas e ter menor diâmetro que as normais e serem armadas com um tubo metálico, varões de fibra de vidro e/ou de aço. Neste último caso recebem a designação de “*bulbo contínuo*”. [46]

A utilização de armadura dentro da coluna tem como objetivo conferir resistência à tração e/ou flexão, atenuar o efeito das heterogeneidades do terreno e garantir a continuidade das enfilagens. No entanto a sua colocação pode tornar-se difícil devido ao atrito gerado pela mistura solo-cimento. Acresce ao anterior o problema do esvaziamento das colunas, onde a sua inclinação ascendente e a necessidade de inclusão da armadura tornam difícil o controlo da manutenção da mistura cimento-solo no interior da coluna. Assim deve garantir-se o preenchimento da coluna, com calda de cimento, depois da colocação da armadura, através da utilização de tubos adequados a realizar o preenchimento. [43]

Por vezes utilizam-se colunas verticais ou sub-verticais com a função de apoiar a abóbada reforçada ou como forma de proteger o arco invertido durante a sua escavação (Figura 3.10) [46].



**Figura 3.10 – *Jet-grouting* em “Guarda-chuva” duplo de enfilagens e reforço de fundação dos hastecais [43]**

O *jet-grouting* é também especificado muitas vezes para a estabilização sistemática, ou apenas localizada, do núcleo da frente, através de colunas horizontais ou sub-horizontais, simples ou reforçadas com fibra de vidro, distribuídas adequadamente pela secção (Figura 3.11). [46]

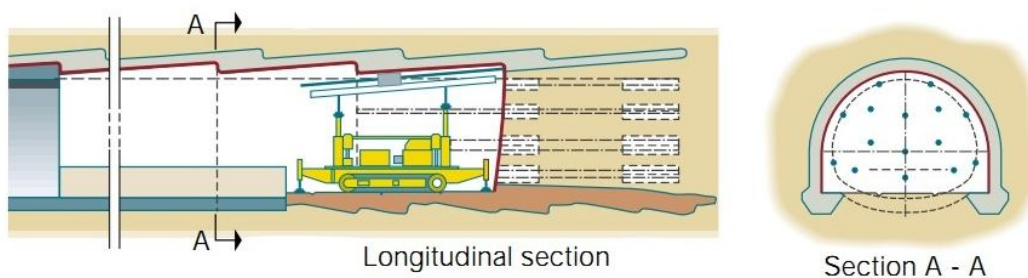


Figura 3.11 – Aplicação de colunas sub-horizontais de *jet-grouting* na abóbada e núcleo de um túnel [36]

A fibra de vidro tornou-se bastante vantajosa e utilizada devido à relação custo-eficácia. Esta apresenta uma elevada resistência axial e fraca resistência ao corte, o que a torna ideal, pois durante a escavação é quebrada facilmente. [47]

Qualquer que seja o esquema de tratamento do terreno é importante garantir o correto posicionamento das colunas de *jet-grouting* para que os objetivos da sua aplicação sejam atingidos com eficácia. Para tal, existem técnicas como a marcação topográfica, a garantia do gabarito atrás da máquina de perfuração e a utilização do laser. Caso não se verifique o correto posicionamento das colunas surgirão problemas como a sobreescavação da secção devido ao facto de as colunas estarem demasiado altas, o corte das mesmas caso estas entrem dentro da secção do túnel ou ainda a existência de espaçamentos elevados entre elas, sendo que estas últimas duas situações aumentam o risco de roturas localizadas e a redução do seu efeito e diminuem o rendimento. [43]

### 3.2.1.1 Construção de túneis em zonas urbanas

A construção de túneis em meios urbanos apresenta mais constrangimentos relativamente a zonas montanhosas ou desocupadas populacionalmente. Estas restrições estão geralmente ligadas à proximidade de outras infraestruturas, e a fatores ambientais e socioeconómicos, como a necessidade de manter em funcionamento estruturas rodoviárias e redes de serviços públicos, ou a existência de limites para os níveis de ruído ou vibrações.

Para além do referido anteriormente está também condicionada a escolha do traçado do túnel, como a sua profundidade, o método de escavação, os prazos de execução da obra e a localização de estações do metro, poços de ventilação ou poço de ataque.

Um dos riscos implícitos à construção de túneis em meios urbanos está relacionado com os assentamentos do terreno, ou levantamento em casos mais raros, que poderão danificar as estruturas já existentes. Contudo o maior risco advém da possibilidade de colapso da cavidade do túnel. Neste caso, os seus efeitos propagar-se-iam até à superfície formando uma cratera, que levaria a assentamentos excessivos, com possível colapso das estruturas existentes e possível perda de vidas humanas. [48]

O reforço do terreno em volta do túnel com recurso à técnica de *jet-grouting* tem por objetivo evitar tais situações, permitindo a escavação do túnel em segurança e atenuar os efeitos da escavação em estruturas existente.

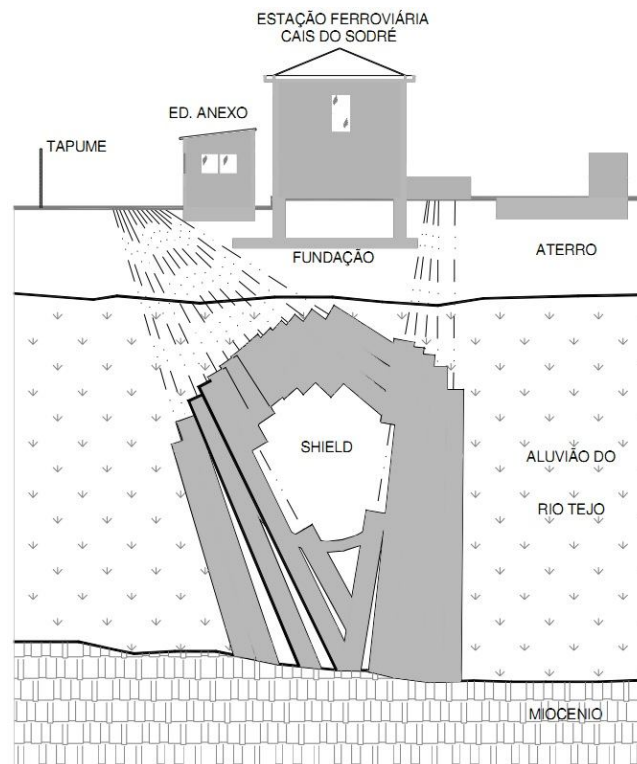
Contudo a sua aplicação, mal executada e não controlada, também poderá levar à ocorrência de danos, devido ao risco de assentamento ou levantamento do terreno gerado pelas grandes pressões a que esta técnica é executada.

Em seguida descrevem-se três casos em que se recorreu à aplicação de *jet-grouting* para a construção de um túnel numa zona urbana (Lisboa).

### Caso 1

Para tornar possível a passagem de uma tuneladora sob a estação ferroviária do Cais do Sodré, Lisboa, foi necessário recorrer ao reforço do solo ao nível do túnel, constituído por argilas e areias moles e muito saturadas (aluvião do Tejo). Esta solução permitiu também evitar o assentamento da estação ferroviária. [49]

Foram executadas colunas através do sistema de jacto simples com um ângulo de 30° com a horizontal de forma a criar uma massa consolidada (Figura 3.12) de terreno reforçado, envolvente à cavidade a executar pela tuneladora, reduzindo os efeitos de descompressão produzidos pela escavação e, conseqüentemente os movimentos do terreno e os citados assentamentos.



**Figura 3.12 – Reforço da envolvente do túnel [49]**

## Caso 2

No decorrer do prolongamento da linha amarela do ML entre a estação Campo Grande e o Poço de Ataque (Calçada de Carriche) houve a necessidade de tratar o terreno com o objetivo de reduzir o grau de risco de assentamentos que afetassem construções existentes nas proximidades do túnel. [50] Neste sentido como medida preventiva adotou-se uma solução de tratamento do terreno através da técnica de *jet-grouting* na execução de um “pórtico” de terreno tratado que contivesse os deslocamentos produzidos pela descompressão da escavação.

Assim através da construção de colunas de *jet-grouting* realizadas através da superfície, com cerca de 1.2 m de diâmetro, criou-se uma zona reforçada na envolvente do túnel (Figura 3.13), tendo permitido a passagem da tuneladora e limitado as perdas de terreno pela frente de escavação e as deformações por assentamento.

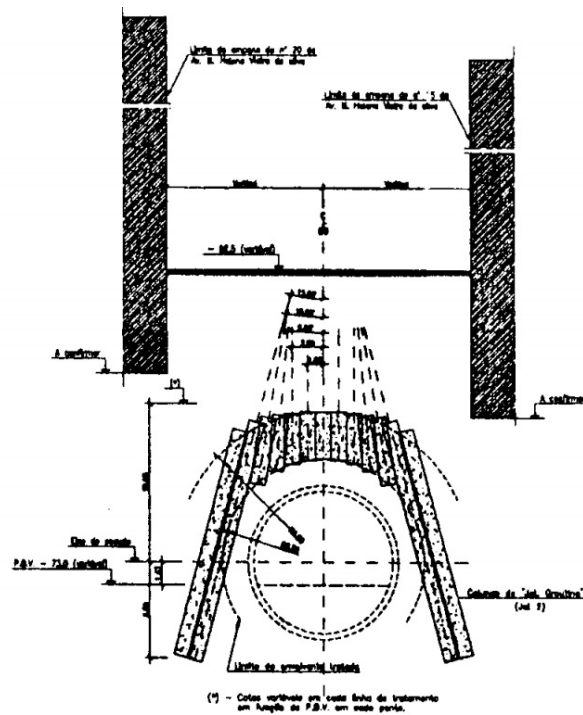


Figura 3.13 – Corte transversal da zona tratada com *jet-grouting* [50]

### Caso 3

#### Ecrãs de estabilidade dos terrenos – Ed. Millennium Moscavide

O reforço do terreno sob as fundações de um edifício de 10 pisos elevados e 2 caves teve como objetivo reduzir os movimentos dos terrenos produzidos pela escavação do túnel. Assim foi possível reduzir o grau de risco de danos na edificação e realizar o túnel com a segurança necessária.

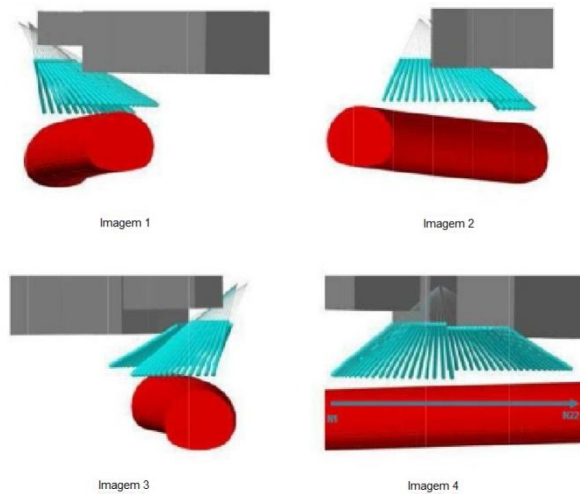


Figura 3.14 – Esquema do ecrã de estabilidade



Figura 3.15 – Local e execução das colunas de *jet-grouting* na construção dos ecrãs de estabilidade [51]

### 3.2.1.2 Tratamento de camadas muito permeáveis

A presença de água durante a escavação de um túnel afeta a estabilidade e aumenta as deformações devido à diminuição das tensões efetivas (tensões transmitidas entre as partículas sólidas), com conseqüente redução da resistência ao corte do terreno, devido às forças que se geram em volta da cavidade para o interior desta e pelo arrasto das partículas finas do terreno. [52]

Em seguida descrevem-se dois casos em que se recorreu à aplicação de *jet-grouting* para o tratamento de camadas permeáveis.

#### Caso 1

No desenvolvimento de um projeto de construção de um túnel para a passagem de cabos elétricos, em São Paulo, Brasil, foi necessário atravessar dois rios. O rio Tietê, onde se recorreu à consolidação da abóbada do túnel, através de um esquema, de colunas de *jet-grouting* sub-horizontais, convencional. Por outro lado, para a travessia do rio Tamanduateí recorreu-se a um esquema de tratamento não usual. O solo a atravessar pelo túnel é constituído por areias siltosas cinzentas claras, cuja granulometria varia de grosseira a fina, com um  $N_{SPT}$  que varia entre as 10 e 40 pancadas, sendo considerado um solo muito permeável ao nível da construção do túnel. Perante tais condições recorreu-se à construção de uma “câmara cônica de avanço da escavação”, ou seja, foram utilizadas colunas secantes de *jet-grouting* sub-horizontais na totalidade do perímetro da secção (360°). Como medida complementar no fim de cada câmara cônica foi feito um reforço completo da face da secção transversal, como ilustrado na Figura 3.16. [53]

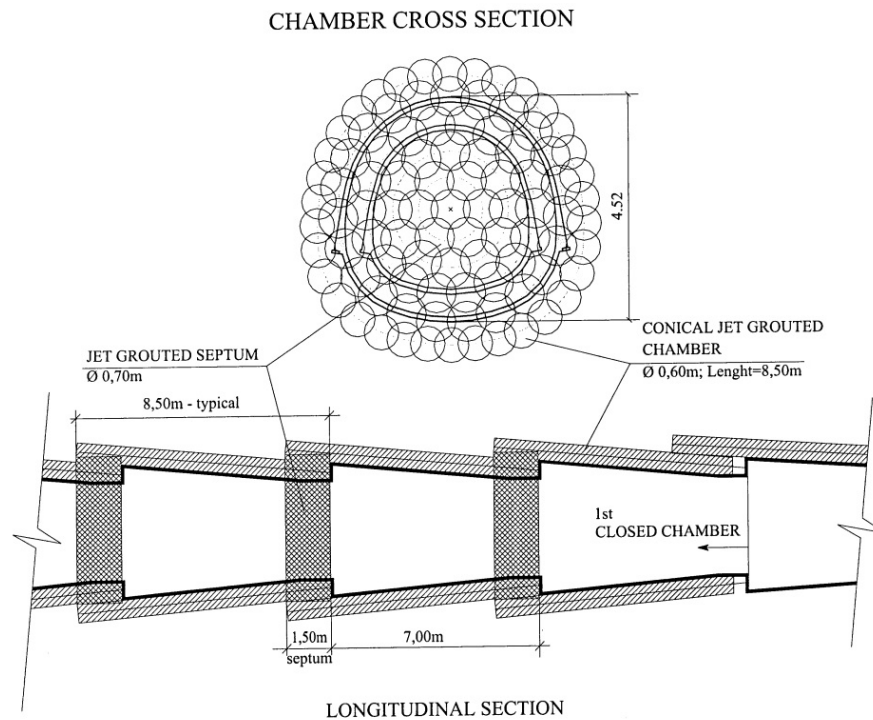


Figura 3.16 – Corte longitudinal e transversal da secção tratada nos seus 360° [53]

Durante a execução da primeira câmara cónica, foi relatado um volume anormal de material retornado à superfície. Considerando-se a pressão hidrostática a que se encontra o túnel qualquer abertura no maciço forçaria a expulsão dos materiais de granulometria fina a média. Este facto foi considerado altamente perigoso devido ao facto de os materiais que ficam fora das colunas de *jet-grouting* correrem o risco de tornarem instáveis e perderem a sua função de molde natural das colunas. Com o objetivo de ultrapassar este problema foi utilizada um tipo de válvula especial na boca do furo para o controlo do material expelido durante a execução das colunas, construídas na totalidade do perímetro da secção (360°).

A aplicação da técnica de *jet-grouting* pode ser realizada de diversas maneiras, consoante o seu objetivo, formando corpos que no seu conjunto dão origem a geometrias bastante distintas.

### Caso 2

Outra forma de utilização desta técnica para impermeabilização passa por construir, por exemplo, “lajes” de *jet-grouting* na base de escavações a céu aberto sob o nível freático. Este tipo de solução permite evitar a rotura hidráulica da base da escavação, equilibrando os impulsos hidrostáticos ascendentes (Figura 3.17).

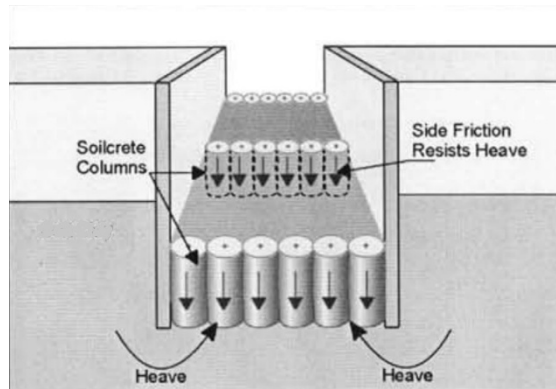


Figura 3.17 – “Laje” de *jet-grouting*. Adaptado de [54]

As “lajes” de *jet-grouting* podem ainda desempenhar a função de contraventamento numa escavação. No caso da estação do metro Terreiro do Paço, a “laje” de *jet-grouting* desempenhou ambas as funções descritas anteriormente.

O solo onde foi realizada a escavação é constituído por aluviões argilosos, encontrando-se o nível freático perto da superfície. A solução adotada consistiu na construção de paredes de estacas secantes que serão escoradas em diferentes níveis, encontrando-se a “laje” de *jet-grouting* realizada no fundo da escavação (Figura 3.18).

A presença da “laje” de *jet-grouting* reduz os deslocamentos das paredes de estacas secantes, conseqüentemente reduz também os assentamentos à superfície e a percolação de água através da fundação.

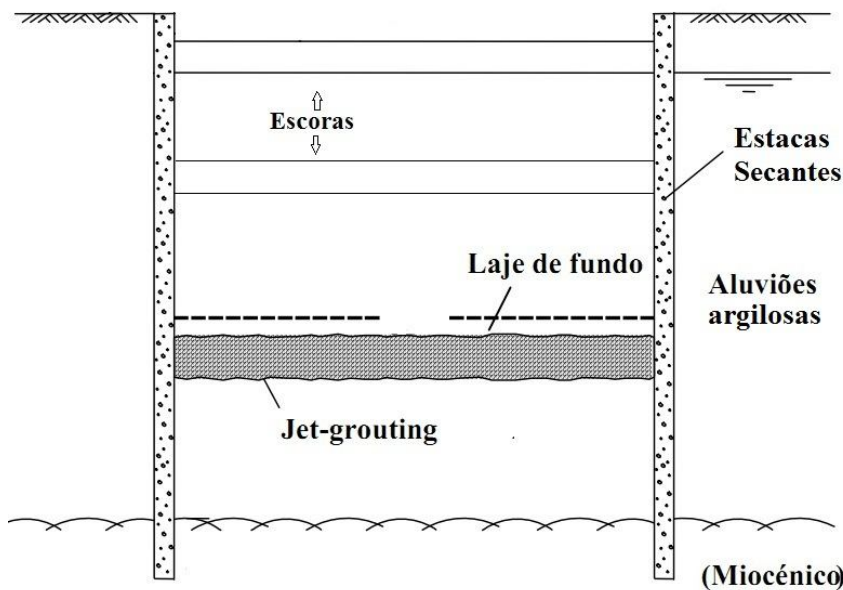


Figura 3.18 – Esquema representativo da solução adotada na estação do Terreiro do Paço. Adaptado de [55]



Figura 3.19 – Vista da obra da estação do metro Terreiro do Paço [56]



Figura 3.20 – Aspeto da contenção e do escoramento da escavação [56]



## 4 Conclusão

A técnica de *jet-grouting* tem vindo a ganhar grande importância nas últimas duas décadas quer devido à maior complexidade das estruturas, quer ao facto das mesmas serem realizadas em terrenos de fraca qualidade geotécnica.

É uma técnica com grande versatilidade e flexibilidade, pois pode ser aplicada a diversos tipos de trabalhos e de terrenos, permitindo aplicações localizadas, bem controladas e em locais exíguos. É pouco invasiva e, em regra, não necessita de pré-escavação para a sua execução, adaptando-se com grande facilidade a espaços de pequenas dimensões. Contudo, em meios urbanos, a existência de uma grande densidade de infraestruturas particularmente em níveis superficiais do subsolo leva à necessidade de se realizarem trabalhos de identificação das mesmas, com o objetivo de se evitarem danos e de modo a que o tratamento a realizar seja bem conseguido.

No entanto ainda existe alguma dificuldade em prever as características finais do material tratado, pelo que se elege a experiência como uma ferramenta fundamental, nomeadamente no recurso a colunas de ensaio e à necessidade de um controlo estreito da execução.

A aplicação da técnica de *jet-grouting* à construção dos túneis implica um conhecimento do modo como estes se comportam perante os distúrbios causados pela escavação. Apesar da realização de estudos para diminuir as incertezas associadas a este processo, as suas conclusões não se devem tomar como certas e imutáveis. Aumentam o nosso conhecimento e capacidade de atuar perante condições idênticas àquelas que foram estudadas, mas devemos sempre manter presente o espírito crítico de forma a não subestimar os riscos associadas a esta tarefa.

Torna-se muito importante obter, em quantidade e qualidade, informação de natureza geológica e geotécnica, dos locais de construção, em especial de túneis, onde a probabilidade de ocorrer uma mudança de cenário, de forma repentina, é maior, devido à continuidade e extensão deste tipo de estrutura. Também, é necessária uma grande partilha e troca de experiência entre os diversos intervenientes na obra.

A técnica de *jet-grouting* tem vindo a ganhar grande importância na construção de túneis, principalmente em meios urbanos, onde existe uma maior complexidade

estrutural e onde os terrenos apresentam menor qualidade geotécnica. Mostra-se eficaz na melhoria das propriedades mecânicas dos terrenos, controlando as deformações e evitando os assentamentos à superfície que causariam danos às estruturas.

## 5 Bibliografia

- [1] Moseley, M. e Kirsch, K., “Jet Grouting,” em *Ground Improvement*, Londres, Spon Press, 2004, pp. 160-196.
- [2] Carreto, J., Jet Grouting. A Problemática do Dimensionamento e Controlo de Qualidade, UNL-FCT: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos, 1999.
- [3] Xanthakos, P., Abramson, L. e Bruce, D., “Jet Grouting,” em *Ground Control and Improvement*, EUA, John Wiley & Sons, 1994, pp. 580-682.
- [4] Ribeiro, A., Técnica de tratamento de solos - Jet Grouting - Acompanhamento de um caso real de estudo - Cais de Santa Apolónia e Jardim do Tabaco, IST: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, 2010.
- [5] Novatecna, “Jet Grouting,” 27 Junho 2012. [Online]. Available: <http://www.novatecna.com.br/4000.htm>.
- [6] Rodrigues, D., Jet Grouting - Controlo de Qualidade em Terrenos do Miocénio de Lisboa, UNL-FCT: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, 2009.
- [7] KellerTerra, “Jet Grouting Process”.
- [8] Hayward Baker inc., “Jet Grouting,” Keller, 2004.
- [9] Burke, G., “Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages,” em *GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods and Specialty Foundation Systems*, EUA, ASCE, 2004, pp. 875-886.
- [10] L. YBM Co, “Jet Grouting Equipment,” Japan.
- [11] Kaidussis, R. e Gomez de Tejada, F., “O Jet Grouting como ferramenta versátil para o tratamento e melhoramento de solos,” em *VII Congresso Nacional de*

*Geotecnia*, Porto, 2000.

- [12] Burke, G. e Smith, M., “Superjet grouting and the quality of its products,” em *Advances in Grouting and Ground Modification*, EUA, ASCE, 2000, pp. 111-125.
- [13] Welsh, J. e Burke, G., “Advances in Grouting Technology,” em *GeoEng 2000, Australian Geomechanics Society*, 2000.
- [14] Pinto, A. e Falcão, J., “Consolidação e Reforço de Terrenos,” em *Túneis e Obras Subterrâneas em Meio Urbano*, Lisboa, 2010.
- [15] Shibazaki, M., “State of Practice of Jet Grouting,” em *Grouting and Ground Treatment*, EUA, ASCE, 2003, pp. 198-217.
- [16] Tinoco, J., Gomes Correia, A. e Cortez, P., “A Data Mining Approach for Predicting Jet Grouting Geomechanical Parameters,” em *Road Materials and New Innovations in Pavement Engineering*, China, ASCE, 2011, pp. 97-104.
- [17] Malinin, A. e Gladkov, I., “Experimental research of jet-grouting parameters in different soil conditions,” em *Deep and Underground Excavations*, China, ASCE, 2010, pp. 49-54.
- [18] Gladkov, I., “Strength and deformation characteristics of soil-concrete as a function of jet-grouting parameters,” em *Geotechnical engineering: New Horizons*, Rotterdam, IOS Press, 2011, pp. 75-77.
- [19] Menard, “Jet Grouting”.
- [20] “Earth Tech - Geotechnical Construction Services,” [Online]. Available: <http://www.earthtech.net/services-and-solutions/down-to-earth-solutions-to-technical-problems/jet-grouting/>. [Acedido em 11 Agosto 2012].
- [21] Coulter, S. e Martin, C., “Single fluid jet-grout strength and deformation properties,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 690-695, 2006.
- [22] Chuaqui, M., Hu, F., Gurbarsad, N. e Lees, D., “A case study: Two-fluid jet

- grouting for Tunneling Application - Soil stabilization and permeability reduction,” em *4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, USA, 2012.
- [23] Burke, G., “Quality Control in Jet Grouting,” *The Grout Line*, 2009.
- [24] Metropolitano de Lisboa, “Linha Vermelha Alameda-São Sebastião Poço de Ataque da Alameda,” em *Relatórios Internos*, 2004.
- [25] Maquesonda, “DAT Instruments”.
- [26] Batista, D., “Jet Grouting principes et applications,” em *Centre d'Études Techniques de l'Équipement Méditerranée*.
- [27] Han, J., Zheng, G. e Schaefer, V., “State of Jet Grouting in Shanghai,” em *Advances in Ground Improvement: Research to Practice in United States and China*, EUA, ASCE, 2009, pp. 179-188.
- [28] Dinis, J., Caracterização e modelação de caldas de cimento-argila no âmbito do melhoramento dos terrenos, UNL-FCT: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia, 2010.
- [29] Silva, D., Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em Geotecnia, ISEL: Relatório de estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Edificações, 2010.
- [30] Cimpor, Gama Cimpor-Como utilizar, Guião técnico: construlink.com, 2005.
- [31] Geo-Institute of ASCE Grouting Committee, Jet Grouting Guideline, ASCE, 2009.
- [32] US Army Corps of Engineers, “Flood Control - Santa Barbara County Drainage Area,” California, 2008.
- [33] “PGA Group of companies,” 12 05 2012. [Online]. Available: [www.pgatech.com.ph](http://www.pgatech.com.ph).
- [34] Richard, C., Review of the Jet Grouting Method, Bachelor of Engineering:

University of Southern Queensland, 2005.

- [35] Burke, G. e Koelling, M., “Special applications for jet grouting: underpinning, excavation support and groundwater control,” em *Proceedings of Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, 1995.
- [36] Lunardi, P., *The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils*, Milão: Rocksoil spa, 2000.
- [37] Peila, D. e Borio, L., “Principles of Conventional Tunnelling,” em *Training Session on Construction Methods for Tunnelling*, Buenos-Aires, 2010.
- [38] Pelizza, S., “General Aspects of Tunnel Construction,” em *ITA/ AITES - Training Course TUNNEL ENGINEERING*, Istanbul, 2005.
- [39] Rocscience, “rocscience” [Online]. Available: [http://www.rocscience.com/hoek/corner/10\\_In\\_situ\\_and\\_induced\\_stresses.pdf](http://www.rocscience.com/hoek/corner/10_In_situ_and_induced_stresses.pdf). [Acedido em 22 09 2012].
- [40] Gonzales de Vallejo, L., “Segadães Tavares & Associados,” 2002. [Online]. Available: <http://www.sta-eng.com/NOTICIAS.html>. [Acedido em 19 04 2012].
- [41] Peila, D. e Oggeri, C., “Various excavation and auxiliary methods in tunneling,” em *ITA/ AITES - Training Course TUNNEL ENGINEERING*, Seoul, 2006.
- [42] Lunardi, P., “Ground improvement by means of jet-grouting,” em *Ground Improvement*, Italy, 1997, pp. 65-85.
- [43] Falcão, J., Pinto, F., Barata, J., Machado do Vale, J. e Cebola, D., “Enfilagens em Jet Grouting,” em *IX Congresso Nacional de Geotecnia*, Aveiro, 2004.
- [44] Junior, L., “LAN - Especialistas em fundações pesadas e geotecnia,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/naresi1968/naresi/parede-diafragma>. [Acedido em 28 09 2012].

- [45] S. BACHY, Jet grouting - La Duchère Tunnel Lyons Northern Ring Road, França.
- [46] Postiglione, P., Abrantes, J., Pinto, F., Mosiici, P. e Altan, V., “Consolidamentos com Jet-Grouting na estação poente do complexo "Estação Baixa-Chiado" do metropolitano de Lisboa,” em *VI Congresso Nacional de Geotecnia - A Geotecnia nas Infraestruturas de Transportes, Energia e Ambiente*, Lisboa, 1997.
- [47] Delgado, A., Estabilização da Frente de Túneis com Inclusões Lineares, FEUP: Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 2009.
- [48] Anagnostou, A., “Basic aspects of underground projects in urban areas,” em *Geotechnical Engineering in Urban Environments*, Madrid, 2007.
- [49] Koshima, A. e Guatteri, G., “Experiences of Ground Improvement for Urban Tunnels in Difficult Conditions,” em *International Seminar on Tunnels and Underground Works*, Lisboa, 2006.
- [50] Melâneo, F., “Prolongamento da linha amarela do ML Campo Grande-Odivelas. Interferências à superfície. Avaliação de riscos e danos. Soluções propostas.,” em *VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, 2000.
- [51] Metropolitano de Lisboa, “Linha Vermelha Oriente-Aeroporto,” em *Relatórios internos*, 2008.
- [52] Anagnostou, G., “Tunnel stability and deformations in water-bearing ground,” em *Symposium on Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics*, Liège, Belgium, 2006.
- [53] Guatteri, G., Koshima, A., Lopes, J. e Pieroni, M., “O uso do Jet Grouting Sub-Horizontal em 360° em um túnel na cidade de São Paulo, Brasil,” em *VIII Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, 2002.
- [54] Wheeler, J. e Burke, G., “SuperJet grouting for tunneling applications,” em *North American Tunneling 2000*, Boston, 2000.

- [55] Pereira, C., Aplicação de Jet-Grouting em Escavações Profundas em Solos Moles, FEUP - Porto: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Geotecnia, 2008.
- [56] Metropolitano de Lisboa, “Linha Azul - Estação Terreiro do Paço,” 2003.
- [57] Coulter, S. e Derek Martin, C., “Ground Deformation Above a Large Shallow Tunnel Excavated Using Jet Grouting,” em *EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy*, Austria, 2004.