



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Técnicas de Injeção. Jet Grouting, Aplicações e
Regras de Dimensionamento***

Andrea Raquel David Rodrigues

Leiria, *Setembro* de 2018



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

***Técnicas de Injeção. Jet Grouting, Aplicações e
Regras de Dimensionamento***

Andrea Raquel David Rodrigues

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Veludo Vieira Pereira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Paulo Lopes Pinto, Professor do Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Leiria, *Setembro* de 2018

Aos meus pais, irmão e avó

Agradecimentos

Queria agradecer a todos que me apoiaram e contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível, o que representa o fim de mais uma etapa de muito estudo e dedicação no meu percurso académico.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Veludo, pela incansável disponibilidade, dedicação, apoio e paciência demonstrados no decorrer da realização da dissertação. Também agradecer ao coorientador, Professor Doutor Paulo Lopes Pinto, pela orientação e disponibilidade na realização do trabalho.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao Instituto Politécnico de Leiria pela oportunidade e acolhimento, e a todos os professores que me acompanharam, pela partilha de conhecimento e experiência ao longo dos anos de licenciatura e mestrado.

Aos meus amigos e colegas que me ajudaram, incentivaram e estiveram sempre comigo durante esta etapa nos momentos mais difíceis, Lamine, Dário, Marlene e Roberta.

Por último e não menos importante, à minha família, com especial ênfase aos meus pais, à minha avó e ao meu irmão, pelo amor, incentivo, compreensão, sacrifícios e apoio incondicional durante todo o tempo em que realizei o trabalho.

Resumo

As técnicas de injeção são frequentemente utilizadas no melhoramento das características físicas e mecânicas dos solos, que apresentam resistência insuficiente, grande deformabilidade ou permeabilidade excessiva. A presente dissertação tem como objetivo abordar uma das técnicas de injeção mais utilizada, o *jet grouting*, caracterizada pela sua grande versatilidade e flexibilidade de aplicação nas mais diversas obras geotécnicas.

Embora muito utilizada e com rápido crescimento, é notável um certo grau de incerteza na fase de projeto, quanto ao resultado do tratamento, na previsão da geometria das colunas (diâmetro) e das suas propriedades mecânicas. Atualmente o dimensionamento é baseado em regras empíricas, na experiência dos projetistas e em ensaios *in situ*.

A norma europeia EN 12716 (2001) define as especificações para a execução e controlo de qualidade da técnica de *jet grouting*, abordando o dimensionamento apenas a título informativo, não dispondo de prescrições para a verificação da segurança.

Tendo em conta o grande potencial da técnica, o presente estudo pretende entender o processo de *jet grouting*, as suas principais aplicações e sintetizar a metodologia de dimensionamento e as respetivas verificações de segurança de acordo com as publicações de trabalhos de referência e a normalização em vigor.

Palavras-chave: Técnicas de injeção, *jet grouting*, dimensionamento, verificações de segurança.

Abstract

Injection techniques are often used to improve the physical and mechanical characteristics of soils, which exhibit insufficient strength, high deformability or excessive permeability. The present dissertation aims to address one of the most used injection techniques, jet grouting, characterized by its great versatility and flexibility of application in the most diverse geotechnical works.

Although widely used and with rapid growth, a certain degree of uncertainty is noted in the design phase, as to the treatment outcome, in the prediction of the geometry of the columns (diameter) and their mechanical properties. Currently the sizing is based on empirical rules, the experience of designers and trial test.

The European standard EN 12716 (2001) defines the specifications for the execution and quality control of the jet grouting technique, being the design considerations strictly informative, without prescriptions for safety requirements.

Taking into account the great potential of the technique, the present study intends to understand the jet grouting process, its main applications and to synthesize the design methodology and the respective safety requirements according to the publications of reference works and the normalization in force.

Keywords: *Grouting techniques, jet grouting, design, safety requirements*

Lista de figuras

Figura 2.1 - Técnicas de Injeção [12]	2
Figura 2.2 – Permeação (Cortesia de Hayward Baker)	3
Figura 2.3 - Esquema típico do equipamento para execução da injeção (TAM) [11].....	4
Figura 2.4 – Fraturação Hidráulica (Cortesia de Hayward Baker Inc.).....	5
Figura 2.5 – Compactação (Cortesia de Hayward Baker Inc.).....	8
Figura 2.6 – Jet Grouting (Cortesia de Hayward Baker).....	10
Figura 2.7 - Aplicações comuns de jet grouting (Adaptado [22]).....	12
Figura 2.8 - Equipamentos para a realização da técnica de jet grouting [22].....	14
Figura 2.9 - Comparação da aplicabilidade das técnicas de injeção de melhoramento dos solos (Adaptado [26])	16
Figura 3.1 - Sistemas de jet grouting (Adaptado [31]).....	18
Figura 3.2 - Geometrias usualmente utilizadas nos elementos de jet grouting [36].....	25
Figura 3.3 - Exemplos de estruturas de jet grouting [5], [22]	26
Figura 3.4 – Sequências de tratamento de colunas sobrepostas [22].....	27
Figura 3.5 - Processo de execução da técnica de jet grouting: (a) furação, (b) início da injeção, (c) formação da coluna e (d) selagem e recomeço (Adaptado [26])	28
Figura 3.6 - Localização das colunas jet grouting no local dos ensaios [41]	33
Figura 3.7 – Esquema de ensaio adotado [41].....	34
Figura 3.8 – Ensaio de carga axial [42]	35
Figura 3.9 – Resultados dos ensaios de carga axial [42].....	36
Figura 3.10 – Ensaio de carga horizontal [42].....	37
Figura 3.11 – Diagrama carga/ deslocamento no topo das colunas [42].....	37
Figura 4.1 – Capacidade de desagregação dos solos (Adaptado [10])......	42
Figura 4.2 - Aplicabilidade dos sistemas de jet grouting	44

Figura 4.3 - Relação entre o diâmetro das colunas e o valor de NSPT para os diferentes sistemas de jet grouting [30].....	44
Figura 4.4 - Limites máximos e mínimos do diâmetro de colunas realizadas em solos incoerentes [3].	45
Figura 4.5 - Limites máximos e mínimos do diâmetro de colunas realizadas em solos coesivos [3].....	45
Figura 4.6 – Resistência à compressão em função da dosagem de cimento [44].....	48
Figura 4.7 – Colunas de teste de jet grouting [45].....	50
Figura 4.8 - Exposição das colunas de teste de jet grouting [46]	51
Figura 4.9 - Medição do diâmetro da coluna de teste de jet grouting [35].....	51
Figura 4.10 - Valores do atrito lateral, q_{si} , para vários tipos de terreno, de acordo com Bustamante (Adaptado [47])	55
Figura 4.11 – Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples [44].	64

Lista de quadros

Quadro 3.1 – Análise comparativa entre os sistemas de jet grouting (Adaptado [3], [25], [29])	20
Quadro 3.2 - Principais aspetos dos sistemas X-Jet, Super Jet e Super Jet-Midi (Adaptado [29])	22
Quadro 3.3 – Parâmetros de jet grouting adotados para os diferentes sistemas. (Adaptado EN 12716 (2001) [5]).	24
Quadro 3.4 - Parâmetros de jet grouting adotados para os diferentes sistemas (Adaptado [3]).	24
Quadro 3.5 – Principais parâmetros registados durante a execução.....	29
Quadro 3.6 - Exemplos de instrumentação utilizada em obras geotécnicas e as respetivas funções [2], [23].	32
Quadro 3.7 – Características das colunas de jet grouting ensaiadas.	35
Quadro 3.8 - Características das colunas de jet grouting ensaiadas.	37
Quadro 4.1 – Metodologia para dimensionamento da técnica de jet grouting.....	40
Quadro 4.2 - Diâmetro expectável das colunas em função do tipo de solo e do sistema de jet, sugeridos pela AGI (2012) (Adaptado [38]).....	45
Quadro 4.3 – Valores da resistência à compressão simples em função do tipo de solo (Adaptado [3], [27]).....	47
Quadro 4.4 – Valores da resistência à tração simples em função do tipo de solo (Adaptado [34]).....	48
Quadro 4.5 – Módulo de deformabilidade em função do tipo de solo, constantes na literatura [34]	49
Quadro 4.6 – Fator de capacidade de carga (Adaptado [47]).....	53
Quadro 4.7 – Coeficientes de segurança para as capacidades resistentes (Adaptado [47])	55
Quadro 4.8 – Coeficientes parciais para as capacidades resistentes [6][6]	57

Quadro 4.9 - Coeficientes de correlação ξ para a determinação de valores característicos a partir dos ensaios de carga estática de estacas (n – número de estacas ensaiadas) [6].....	58
Quadro 4.10 - Coeficientes de correlação ξ para a determinação de valores característicos a partir de ensaios do terreno (n – número de perfis ensaiadas) [6].....	59

Simbologia

Siglas

<i>ASCE</i>	American Society of Civil Engineers
<i>FHWA</i>	Federal Highway Administration
<i>AGI</i>	Associazione Geotecnica Italiana
<i>JJGA</i>	Japanese Jet Grouting Association
<i>LCPC</i>	Laboratoire Central dès Ponts et Chaussées
<i>E.L.S.</i>	Estados Limite de Serviço
<i>E.L.U.</i>	Estados Limites Últimos
<i>EC7</i>	Eurocódigo 7
<i>EN</i>	Norma Europeia
<i>CPT</i>	Cone Penetration Test
<i>SPT</i>	Standart Penetration Test
<i>PMT</i>	Pressuremeter Test
<i>a/c</i>	relação água cimento

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE QUADROS	XII
1. INTRODUÇÃO	XVIII
1.1 Enquadramento	xviii
1.2 Objetivos	xix
1.3 Organização do documento	xix
2. TÉCNICAS DE INJEÇÃO	1
2.1 Introdução	1
2.2 Permeação	2
2.2.1 <i>Aplicações da técnica</i>	3
2.2.2 <i>Materiais e Equipamentos</i>	3
2.2.3 <i>Vantagens e limitações da técnica</i>	4
2.3 Fracturação Hidráulica	5
2.3.1 <i>Aplicações da técnica</i>	6
2.3.2 <i>Materiais e Equipamentos</i>	6
2.3.3 <i>Vantagens e limitações da técnica</i>	7
2.4 Compactação	7
2.4.1 <i>Aplicações da técnica</i>	8
2.4.2 <i>Materiais e Equipamentos</i>	8
2.4.3 <i>Vantagens e limitações da técnica</i>	9
2.5 <i>Jet Grouting</i>	10
2.5.1 <i>Aplicações da técnica</i>	11
2.5.2 <i>Materiais e Equipamentos</i>	12

2.5.4	<i>Vantagens e limitações da técnica</i>	14
2.6	Análise comparativa entre as técnicas de injeção	15
3.	JET GROUTING	17
3.1	Evolução Histórica	17
3.2	Sistemas de <i>Jet Grouting</i>	18
3.3.1	<i>Sistema de Jet Simples</i>	18
3.3.2	<i>Sistema de Jet Duplo</i>	19
3.3.3	<i>Sistema de Jet Triplo</i>	19
3.3.4	<i>Evoluções Tecnológicas</i>	21
3.3	Parâmetros de <i>Jet Grouting</i>	23
3.3.1	<i>Características geotécnicas do terreno</i>	23
3.3.2	<i>Parâmetros de execução do jet grouting</i>	23
3.3.3	<i>Geometria dos elementos de jet grouting</i>	25
3.4	Processo de execução <i>Jet Grouting</i>	27
3.5	Controlo de Qualidade	28
3.6	Ensaio de carga.....	32
4.	REGRAS DE DIMENSIONAMENTO	38
4.1	Generalidades.....	38
4.2	Normalização	38
4.3	Metodologia para dimensionamento	40
4.4	Dimensionamento	51
4.4.1	<i>Dimensionamento geotécnico – E.L.U.</i>	52
4.4.2	<i>Dimensionamento estrutural – E.L.U.</i>	62
4.4.3	<i>Deformação axial – E.L.S.</i>	64
4.4.4	<i>Notas Finais</i>	65
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	66
5.1	Síntese das Principais Conclusões	66
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	67

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A disponibilidade de solos com características geotécnicas adequadas à construção é cada vez menor, especialmente, no meio urbano e em zonas densamente habitadas. Com a necessidade crescente de viabilizar obras nessas condições, é cada vez mais comum recorrer a soluções de melhoramento de solos. Neste sentido, as técnicas de injeção são frequentemente utilizadas, particularmente, o *jet grouting*, que tem demonstrado ser uma técnica de grande potencial e muito competitiva, quando comparada com outros métodos de melhoramento dos solos.

A técnica de *jet grouting* consiste em injetar calda de cimento no solo a alta velocidade, de modo a produzir uma mistura de solo-cimento de melhores características físicas e mecânicas do que o solo natural. Trata-se de uma técnica muito versátil, uma vez que, é aplicável a uma extensa variedade de solos e em diferentes condições de aplicação, com a capacidade de formar elementos de *jet* de diferentes geometrias e orientações.

O *jet grouting* foi desenvolvido no Japão na década de 60 e aprimorada mais tarde na Europa nos anos 80 do século passado. Desde então, a técnica tem vindo a ser cada vez mais utilizada, desempenhando um papel de grande importância em obras geotécnicas, especialmente em meios urbanos [1]. São exemplos de aplicação desta técnica, a construção e/ou reforço de fundações de edifícios existentes, melhoramento de terrenos de fracas características geotécnicas para desenvolvimento de infraestruturas viárias e em obras portuárias [2].

Apesar do rápido desenvolvimento da técnica e dos notáveis avanços tecnológicos no equipamento utilizado, principalmente ao nível dos sistemas de injeção, carece ainda de regras de dimensionamento rigorosas para caracterização das propriedades físicas e mecânicas do solo tratado [3, 4]. O dimensionamento de elementos de *jet grouting* tem vindo a ser realizado essencialmente baseado em métodos empíricos e com o auxílio da experiência dos construtores, o que pode muitas vezes, pôr em causa a qualidade da execução e resultar-se num aumento dos custos [4].

As especificações referentes à técnica de *jet grouting*, relativamente à execução, testes e monitorização, encontram-se na norma europeia EN 12716 (2001) - *Execution of special*

geotechnical works - Jet Grouting [5]. No entanto, a norma foca-se mais no processo de execução do que propriamente no dimensionamento.

O dimensionamento de projeto de estruturas geotécnicas é abordado pela regulamentação europeia Eurocódigo 7 (2010) [6], que apresenta métodos e prescrições para a verificação de segurança, que podem ser adaptadas às soluções de *jet grouting*.

Tendo em conta o elevado potencial da técnica, pretende-se com a realização do presente trabalho, apresentar os principais aspetos a considerar num projeto de *jet grouting* e as respetivas verificações de segurança a efetuar no dimensionamento aos Estados Limites Últimos (E.L.U.) e Estados Limites de Serviço (E.L.S.).

1.2 Objetivos

O trabalho de investigação desenvolvido na presente dissertação tem definido os seguintes objetivos:

- Apresentar uma breve explicação sobre as técnicas de injeção de melhoria dos solos, nomeadamente, a permeação, fracturação hidráulica, compactação e fazer uma comparação com o *jet grouting*;
- Fazer uma revisão bibliográfica da técnica de *jet grouting*, atendendo ao campo de aplicação, aos materiais e equipamentos utilizados, ao processo construtivo, aos sistemas de injeção, as principais vantagens e limitações e o controlo de qualidade;
- Apresentar a metodologia e as etapas para o dimensionamento de *jet grouting* e as respetivas verificações de segurança aos estados limites relevantes.

1.3 Organização do documento

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, de acordo com a descrição abaixo mencionada.

No Capítulo 1 faz-se um enquadramento geral do trabalho, apresentam-se os objetivos propostos e faz-se uma breve descrição da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são apresentadas as técnicas de injeção de melhoria dos solos, onde são abordadas as suas principais características, campo de aplicação, materiais e equipamentos utilizados no processo de execução, e suas principais vantagens e limitações.

Por último, procurou-se fazer uma análise comparativa entre o *jet grouting* e as técnicas de injeção convencionais.

No Capítulo 3 dedica-se ao estudo da técnica de *jet grouting*, que é o objetivo de estudo da dissertação. Faz-se um enquadramento histórico da técnica, e de seguida são apresentados os sistemas de *jet grouting*, os parâmetros de execução da técnica, materiais e equipamentos utilizados, o processo construtivo, e as suas principais vantagens e desvantagens. É ainda abordado a importância do controlo de qualidade no decorrer da obra e da realização de ensaios de carga no desempenho dos elementos de *jet grouting*.

No Capítulo 4 são apresentados os principais aspetos relacionados ao dimensionamento do *jet grouting*. Faz-se inicialmente referência a normalização aplicada a esta técnica, e de seguida apresenta-se a metodologia para o dimensionamento geotécnico (GEO) e estrutural (STR) das soluções de *jet grouting*, com uma sequência das principais atividades a desenvolver ao longo do projeto e as verificações de segurança aos estados limites relevantes a efetuar.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e são propostos alguns tópicos para futuros estudos relacionados com esta temática.

E por último é apresentada a bibliografia consultada e referenciada ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2. Técnicas de Injeção

2.1 Introdução

O emprego de injeções no tratamento de estruturas de engenharia civil não é um processo recente. Acredita-se que teve origem em 1802, quando o engenheiro francês Charles Berigny utilizou uma calda de cimento pozolânico para preencher as cavidades da fundação de uma eclusa que sofria problemas de assentamentos e recuperar a sua capacidade de carga. A fundação teria sido construída em solos aluvionares e precisava ser selada e estabilizada [7, 8]. Berigny denominou o tratamento de *procédé d'injection* [8].

Com o desenvolvimento de ligantes hidráulicos e a invenção do cimento Portland em 1821, a técnica tornou-se muito conhecida e amplamente utilizada na construção de várias estruturas, tendo sido aplicada no reforço de estruturas de alvenaria, no preenchimento de fissuras e no espaço subterrâneo na construção de túneis [7].

A partir do ano de 1900, as técnicas de injeção sofreram avanços significativos com a otimização dos equipamentos. Foram desenvolvidas bombas hidráulicas de alta pressão, permitindo ter maior controlo sobre a pressão e o caudal de calda injetada [8].

As injeções podem ser definidas como um processo de introdução, de forma controlada, de um material temporariamente fluído, em solos porosos ou rochas fraturadas, cujo endurecimento contribui para o melhoramento das características físicas do solo, nomeadamente, a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade [2, 9].

As técnicas de injeção têm um alargado campo de aplicação, sendo sobretudo utilizadas em obras hidráulicas e subterrâneas, podendo ser aplicadas com diferentes objetivos [9, 10, 11]:

- Aumentar a capacidade resistente do solo, melhorando o apoio das fundações existentes e a estabilidade de escavações;
- Reduzir a permeabilidade do solo, dificultando a circulação de água por camadas permeáveis;
- Aumentar a densidade do solo, prevenindo a liquefação;
- Recalçamento de estruturas e pavimentos;
- Escoramento de estruturas.

Existem diferentes técnicas de injeção: i) permeação; ii) fracturação hidráulica; iii) compactação; e iv) *jet grouting*. A escolha da técnica mais adequada deve ser feita de acordo com a natureza e as características do terreno, os objetivos e finalidades da intervenção e a adequabilidade da técnica ao terreno. Cada uma das técnicas possui características específicas e por conseguinte, diferentes aplicabilidades [9]. A Figura 2.1 ilustra as diferentes técnicas de injeção referidas.

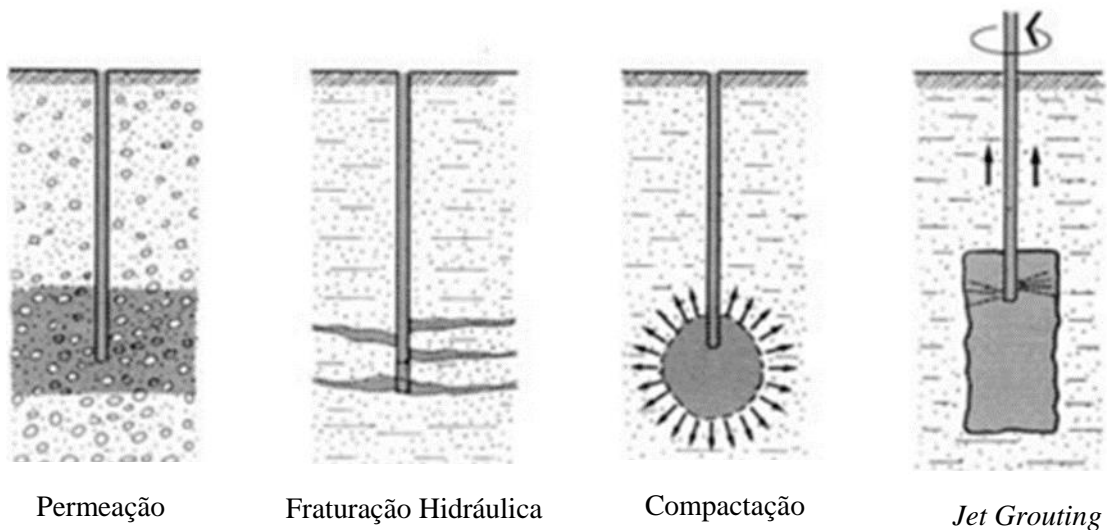


Figura 2.1 - Técnicas de Injeção [12]

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição das diversas técnicas de injeção de melhoramento dos solos, o seu campo de aplicação, os materiais e equipamentos de execução e suas principais vantagens e limitações. Inclui ainda, uma análise comparativa entre o *jet grouting* e as outras técnicas de injeção.

2.2 Permeação

A técnica de permeação é considerada a técnica de injeção mais antiga, sendo a primeira aplicação conhecida há mais de 200 anos [8, 13]. A permeação consiste na injeção de calda de cimento ou fluídos químicos nos poros dos solos, a baixa pressão, sem que se destrua a sua estrutura, ilustrada na Figura 2.2. É geralmente utilizada para reduzir a permeabilidade do solo, permitindo um maior controlo sobre o escoamento de águas subterrâneas, aumentando ainda a coesão entre as partículas do solo, conferindo-lhes maior resistência e rigidez, em função do sucesso da injeção [8, 13].

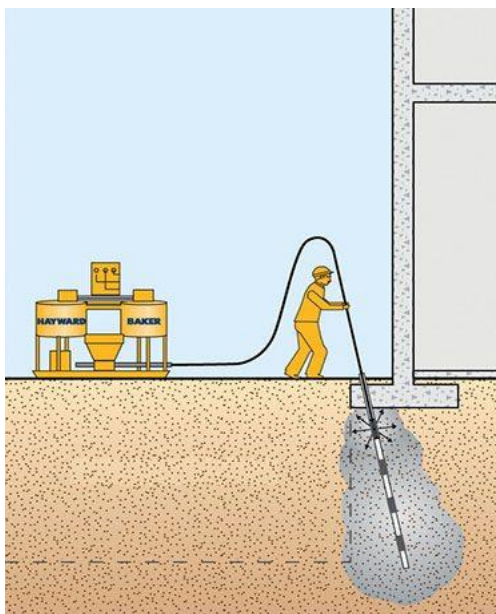


Figura 2.2 – Permeação (Cortesia de *Hayward Baker*)

2.2.1 Aplicações da técnica

A utilização da técnica de permeação depende sobretudo da permeabilidade do solo, uma vez que este deve ser suficientemente permeável permitindo que a calda penetre adequadamente o solo [13]. É geralmente utilizado em areias e cascalhos, embora possa ser aplicada em alguns solos com a presença de silte, em que possam ser injetadas caldas de baixa viscosidade [9, 13]. A injeção de permeação pode ser aplicada [9, 14]:

- Estabilização e reforço do solo;
- Cortinas de estanquidade, reduzindo a permeabilidade do solo;
- Controlar e/ ou reduzir assentamentos de fundações;
- Aumentar a capacidade de suporte do solo.

2.2.2 Materiais e Equipamentos

Tipo de calda

Na execução da técnica de permeação são utilizadas caldas de composições diversas, permitindo a sua adequada penetração aos vazios e discontinuidades a serem preenchidos. Podem ser utilizadas caldas de cimento, compostas por uma mistura de água, cimento e argila ou soluções químicas, sendo a mais utilizada o silicato de sódio [9, 11].

As relações típicas de água/ cimento utilizadas variam de 0.5 a 6, sendo que quando menor a relação a/c, maior é a sua resistência e menor é a filtração de partículas de calda, no entanto são mais difíceis de injetar do que aquelas com maior teor de água [11].

Equipamento

O equipamento de injeção de permeação compreende um dispositivo de perfuração, uma unidade de injeção (formada por uma misturadora e bombas de alta pressão), tubos de injeção de calda, denominados tubos manchete ou TAM com obturadores duplos e equipamentos de monitorização e controlo [8].

O processo de execução envolve a instalação dos tubos manchete (TAM), geralmente de aço, com mangas de borracha separadas a uma certa distância, impedindo a penetração do solo no tubo, conforme ilustrado na Figura 2.3. O tubo de injeção dispõe ainda de dois obturadores e uma mangueira para o escoamento da calda. Para permitir o processo de injeção os obturadores selam o tubo manchete em ambos os lados, permitindo assim a injeção da calda individualmente em cada tubo através da manga de borracha [15].

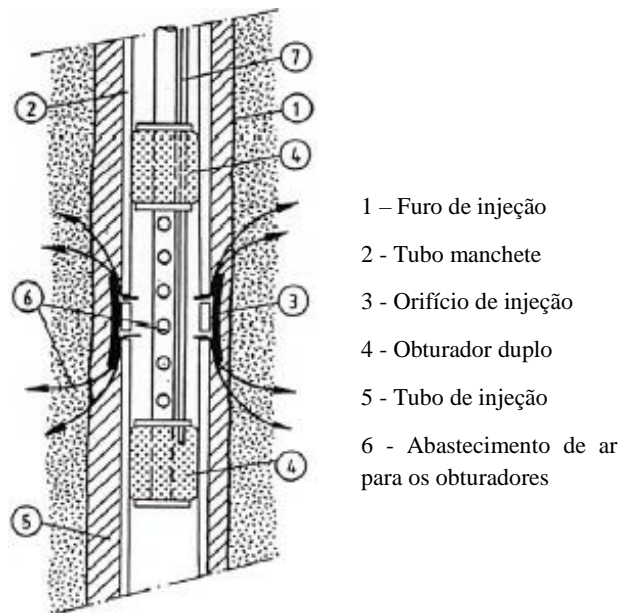


Figura 2.3 - Esquema típico do equipamento para execução da injeção (TAM) [11]

2.2.3 Vantagens e limitações da técnica

A técnica de injeção de permeação apresenta as seguintes vantagens [16]:

- Não provoca assentamentos no solo, nem danifica estruturas adjacentes;
- Rápida e fácil de ser executada;

- Ideal para locais confinados ou de difícil acesso;
- Equipamento fácil de manusear e não invasivo;
- Resultados previsíveis e de longa duração.

No entanto, apresenta as seguintes desvantagens [7, 9, 13]:

- Risco de ocorrer fraturas no solo ou efeitos indesejáveis em estruturas adjacentes, se as pressões de injeção forem elevadas;
- Possibilidade de ocorrer falhas no controlo da injeção quando a calda é injetada no terreno, por apresentar um comportamento muito fluído, podendo ocorrer fugas de material ou mesmo fraturas no solo;
- Deficiente avaliação da porosidade do solo tratado, pode levar à filtração de partículas de calda, obstruindo o caminho de permeação da injeção;
- A utilização de algumas caldas químicas pode ser tóxica para o ambiente, podendo contaminar as águas subterrâneas.

2.3 Fracturação Hidráulica

A técnica de injeção por fracturação hidráulica consiste na realização intencional de fraturas no solo (ou abertura de fraturas preexistentes), através da injeção de calda de cimento a elevadas pressões, sendo as fraturas preenchidas com a calda, e o terreno circundante imediatamente compactado, ilustrada na Figura 2.4 [9, 13]. É usada tipicamente para compactar o solo, melhorar a resistência e também para preencher os vazios, reduzindo a permeabilidade [9].

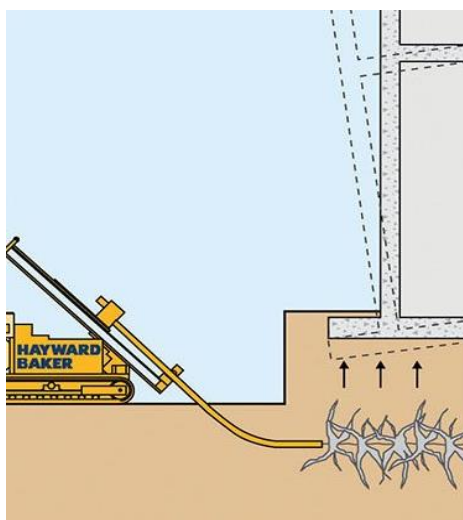


Figura 2.4 – Fraturação Hidráulica (Cortesia de *Hayward Baker Inc.*)

2.3.1 Aplicações da técnica

A técnica de injeção por fracturação hidráulica pode ser aplicada em qualquer tipo de solo, sendo geralmente utilizada em solos finos [9, 13]. Apresenta várias aplicações, entre as quais [9, 17]:

- Controlar e/ou reduzir assentamentos em estruturas;
- Controlar movimentos induzidos por obras subterrâneas;
- Reduzir a permeabilidade do solo;
- Aumentar a capacidade resistente do solo.

2.3.2 Materiais e Equipamentos

Tipo de calda

Na realização da fracturação hidráulica são empregues caldas de cimento, compostas basicamente por cimento, água e pequenas quantidades de argila, ou caldas químicas. As caldas de cimento são geralmente empregues no preenchimento de fraturas, particularmente, na fase de pré-tratamento, ou seja, quando ocorre a fracturação do solo [9].

Por vezes, utiliza-se água para abertura das fissuras antes da injeção de calda. São utilizadas caldas de baixa viscosidade na realização de pequenas fissuras, reduzindo a pressão ao longo destas, e permitindo uma melhor propagação. E são empregues caldas de alta viscosidade para expandirem as fraturas maiores. São utilizados adjuvantes na calda, reduzindo a quantidade de água na mistura, de modo a diminuir o tempo de cura e o período de tempo entre as fases de injeção, impedindo que a calda se afaste da zona de tratamento [9].

Equipamentos

O equipamento utilizado na realização da fracturação hidráulica compreende um equipamento de perfuração, tubos de injeção de calda com obturadores duplos, uma misturadora e uma bomba de alta pressão [17]. O processo de execução também envolve a instalação de tubos manchete (TAM), que são tipicamente usados na técnica de permeação, descrita anteriormente.

É necessário um controlo rigoroso durante o processo de execução da técnica, de modo a monitorar com precisão os movimentos da estrutura ou do solo, garantindo bons resultados do tratamento.

2.3.3 Vantagens e limitações da técnica

A utilização da técnica de fracturação hidráulica apresenta as seguintes vantagens [9]:

- Possibilidade de ser mais económica do que as técnicas alternativas em aplicações convencionais (e.g. reduzir assentamentos em edifícios), por utilizar elevadas pressões;
- Permite controlar movimentos que ocorram perto do ponto de injeção, evitando assim pequenos riscos de empoamentos indesejados, por utilizar pequenos volumes de injeção.

No entanto, a aplicação da técnica requer conhecimento especializado e experiência, uma vez que, podem ocorrer alguns inconvenientes durante a execução, tais como [7, 9]:

- Falta de controlo sobre a direção e a configuração das fraturas, limitando a utilização da técnica a uma localização específica de tratamento, e fazendo com que seja mais utilizada em solos argilosos;
- Dificuldade em prever e/ou determinar a quantidade e a espessura de calda dentro das fissuras;
- Dificuldade em determinar com precisão os parâmetros de injeção, devido a falta de correlação com a quantidade de calda injetada;
- Pode ocorrer levantamento do solo à superfície.

2.4 Compactação

A técnica de injeção de compactação foi originalmente desenvolvida nos EUA (Califórnia), na década de 1950, sendo utilizada por muitos anos como uma medida de controlo de assentamentos [8, 18]. A técnica consiste na injeção controlada de calda de cimento, de baixa mobilidade, no solo ou rocha fragilizada, sob alta pressão, conforme ilustrado na Figura 2.5 [9, 13]. À medida que a calda se expande, são formados corpos sólidos e homogéneos, que induzem a deslocamentos controlados, e a compactação do solo, conferindo-lhe assim, estabilidade, rigidez e resistência [9, 19].

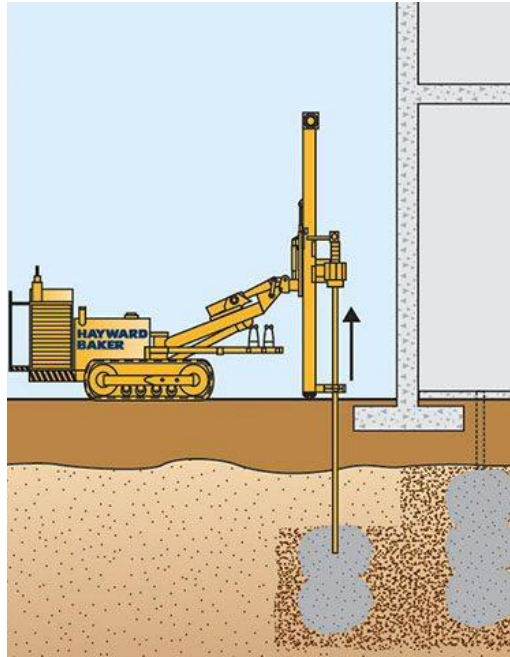


Figura 2.5 – Compactação (Cortesia de *Hayward Baker Inc.*)

2.4.1 Aplicações da técnica

A técnica de injeção de compactação pode ser aplicada numa ampla gama de solos, sendo, particularmente, utilizada em solos granulares. Apresenta variadas aplicações, podendo ser utilizada [9, 18]:

- Controlar/prevenir assentamentos de fundações superficiais ou profundas;
- Prevenir a liquefação sísmica;
- Aumentar a capacidade de suporte do solo;
- Reduzir a permeabilidade;
- Controlar deslocamentos do solo durante a construção de túneis ou escavações.

2.4.2 Materiais e Equipamentos

Tipo de calda

São utilizadas caldas muito espessas no processo de injeção de compactação, sendo geralmente compostas por uma mistura de areia siltosa, cimento e água. Podem ser adicionados materiais de granulometria mais fina como, solos finos naturais, cinzas volantes ou bentonite (em pequenas quantidades), de modo a melhorar as características de bombeamento da calda [17].

Equipamentos

Recorre-se a equipamento especializado para a execução da técnica de compactação, uma vez que são utilizadas caldas muito espessas [9]. É utilizado um equipamento de perfuração, uma unidade de injeção (que compreende uma misturadora e uma bomba) e tubos de injeção [8]. O equipamento de perfuração é usado para instalar os tubos de injeção (geralmente de aço) por meio de perfuração rotativa. A misturadora deve ter a capacidade de misturar uniformemente grandes quantidades de caldas espessas e de baixa *slump*. E a bomba deve ser capaz de entregar continuamente a calda de baixa mobilidade com pressões apropriadas [8, 9].

2.4.3 Vantagens e limitações da técnica

A técnica de injeção de compactação apresenta as seguintes vantagens [13, 18]:

- Bom controlo do local de tratamento;
- Possibilidade de ser aplicada em locais de difícil acesso e espaços limitados;
- Possibilidade de atingir grandes profundidades;
- Técnica não destrutiva, adaptando-se às fundações existentes;
- Alternativa económica em relação às outras técnicas similares.

No entanto, a técnica apresenta algumas limitações, onde podem ser destacadas as seguintes [7, 9]:

- A sua aplicação em solos argilosos fica restrita à existência de uma permeabilidade suficiente para permitir a dissipação da pressão gerada nos poros;
- Torna-se inadequado em solos demasiado consistentes (dificuldade de expansão do volume de calda injetada);
- Dificuldades em avaliar os resultados da intervenção;
- É necessário equipamento especializado na mistura, bombagem, injeção e monitorização, uma vez que se utilizam caldas de baixa mobilidade;
- Utilização condicionada em locais próximos a estruturas existentes, uma vez que provoca deslocamentos sensíveis na massa de solo nas proximidades do local de tratamento.
- Pode ocorrer hidrofraturação do solo, caso sejam cometidos erros na seleção da calda.

2.5 Jet Grouting

O *jet grouting* é uma técnica de melhoramento das características geotécnicas dos solos, realizada diretamente no interior do terreno, em que envolve a erosão da estrutura natural do solo, através de injeções de calda de cimento, ar e/ou água, a elevadas pressões e velocidades. A calda de cimento penetra nos espaços vazios resultantes e mistura-se com o solo, formando colunas de solo-cimento, com melhores características mecânicas e de menor permeabilidade.

O processo executivo da técnica de *jet grouting* envolve basicamente três etapas distintas (Figura 2.6) [3]:

- Corte: é desagregada a estrutura natural do terreno e os fragmentos do solo são dispersos pela ação de um ou mais jatos horizontais de elevada velocidade;
- Mistura e substituição parcial: uma parte dos fragmentos do solo é substituída e a outra parte é misturada com a calda injetada, a partir dos bicos de injeção;
- Cimentação: os fragmentos de solo são aglutinados entre si pela ação auto endurecedora da calda, formando um elemento consolidado.

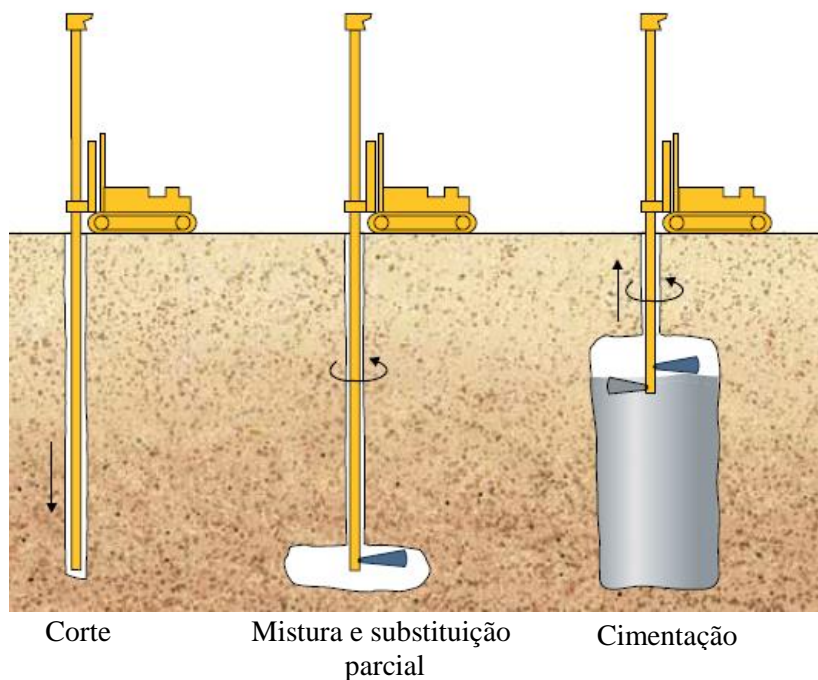


Figura 2.6 – *Jet Grouting* (Cortesia de Hayward Baker)

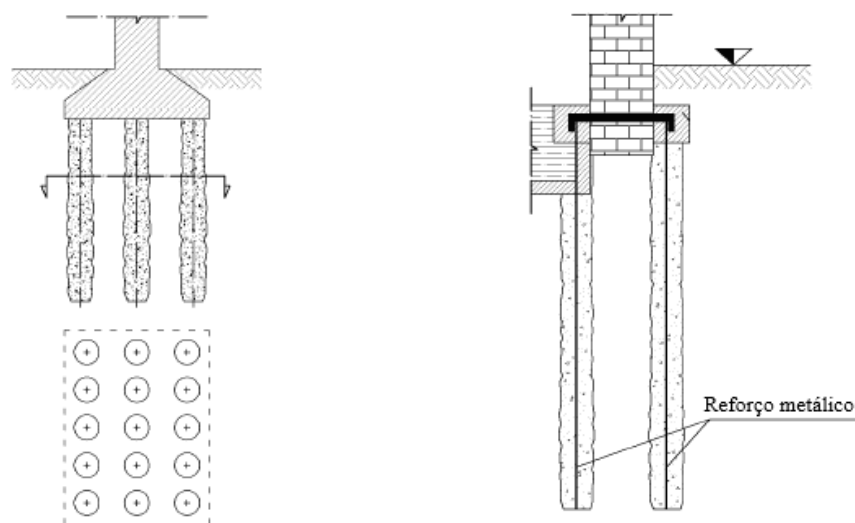
2.5.1 Aplicações da técnica

Como referido anteriormente, o *jet grouting* trata-se de uma técnica muito versátil de melhoramento dos solos. Pode ser aplicada a diversos tipos de solos, desde solos grosseiros, como seixos e areias, a solos mais coesivos, como siltes e argilas, mesmo em presença de água [1, 20].

É uma técnica muito adaptável e que abrange uma vasta área de aplicações, podendo ser utilizada tanto em trabalhos provisórios como permanentes [5]. Apresenta como aplicações típicas as seguintes [8, 9, 21]:

- Execução de fundações novas ou reforço de fundações existentes;
- Estabilização e contenção de taludes;
- Formação de cortinas de estanquidade;
- Reforço da estrutura do solo;
- Proteção de elementos estruturais submersos;
- Tratamento de solos em locais de construção de túneis, garantido maior resistência e impermeabilidade do solo ao redor;
- Consolidação do solo de fundação com capacidade estrutural desadequada;
- Solidificação e contenção de materiais contaminantes no solo.

Na Figura 2.7 são ilustradas diversas aplicações da técnica de *jet grouting*:



a) Execução de fundações

b) Reforço de fundações

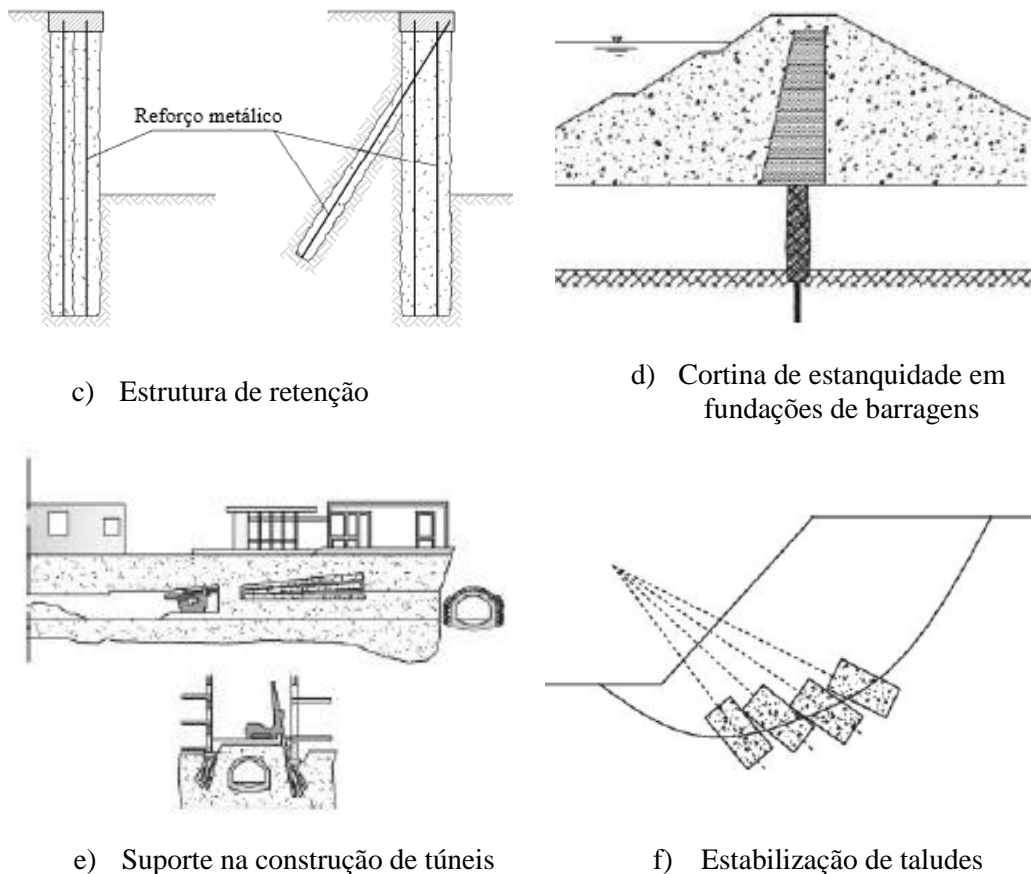


Figura 2.7 - Aplicações comuns de *jet grouting* (Adaptado [22])

2.5.2 Materiais e Equipamentos

Materiais

A composição da calda de cimento tem significativa importância no resultado final da aplicação da técnica de *jet grouting*. Para além do custo, os fatores que determinam a seleção do tipo de calda, dependem do tipo de terreno e das características mecânicas pretendidas para o solo tratado, nomeadamente, a resistência, a permeabilidade e a rigidez [1, 9].

De acordo com a norma EN 12716 (2001), a calda é geralmente composta por uma mistura de água e cimento, em que a relação a/c varia entre 0,5 e 1,5. Outros materiais, como estabilizantes, plastificantes, bentonite, *filler*, também podem ser adicionados à mistura, tornando-a adequada a certas exigências de projeto, melhorando a trabalhabilidade, a penetração dos fluidos, o processo de cura e/ou as características finais do material [23]. Entretanto, podem ser empregues outros ligantes hidráulicos [5]. Pode-se também recorrer ao uso de perfis metálicos ou varões de aço nas colunas de *jet grouting*, a fim de melhorar

as suas características, funcionando como colunas de solo-cimento armadas [5]. O cimento utilizado deve estar em conformidade com as especificações da norma NP EN 197-1 (2001), e água a utilizar na amassadura deve ser potável, evitando assim efeitos adversos na configuração, endurecimento ou durabilidade da mistura e, se for o caso, reduzir o risco de corrosão dos perfis metálicos utilizados como elementos de reforço [5].

Equipamentos

A técnica de *jet grouting* recorre a equipamentos específicos, que compreende [23, 24]:

- Silo para armazenamento de cimento;
- Central misturadora, constituída por um reservatório de água, uma misturadora e um agitador;
- Sistema de bombagem a alta pressão, com a capacidade de bombear de forma contínua;
- Dispositivo de furação e injeção;
- Mangueiras flexíveis que transportam, em separado, a calda de cimento, ar e água, até a vara do dispositivo de furação/ injeção;
- Compressor de ar, no caso de se utilizar os sistemas de *jet* duplo e triplo;
- Equipamento de registo contínuo, que permita durante a execução da técnica, monitorar os parâmetros de execução.
- E se necessário, bomba de refluxo e depósito, para onde o refluxo de calda é encaminhado e depositado, e/ou transportado para local adequado.

Na Figura 2.8 são ilustrados os equipamentos para a execução da técnica de *jet grouting*:

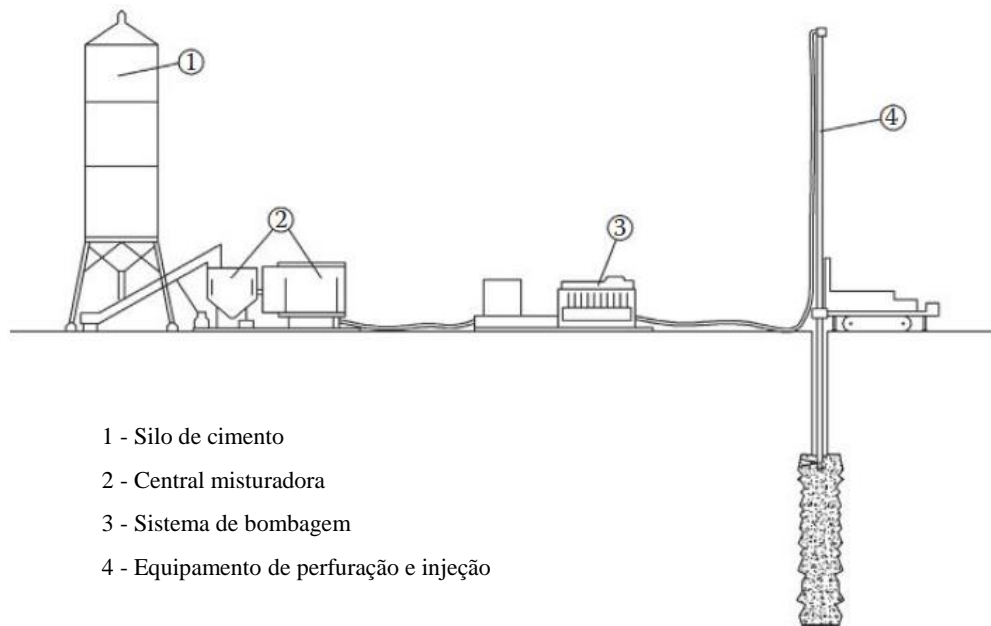


Figura 2.8 - Equipamentos para a realização da técnica de *jet grouting* [22]

2.5.4 Vantagens e limitações da técnica

A utilização da técnica de *jet grouting* apresenta inúmeras vantagens, das quais se podem destacar as seguintes [25, 26]:

- Possibilidade de ser aplicada em qualquer tipo solo, mesmo a baixo nível freático;
- Possibilidade de ser realizada em espaços limitados e/ou de difícil acesso, uma vez que requer equipamento de pequeno porte, produzindo ruídos e vibrações reduzidas;
- Não necessita de escavação prévia, evitando assim a descompressão do solo;
- Rapidez de execução e elevado rendimento, quando comparada com soluções tradicionais;
- Possibilidade de ser aplicada em diferentes direções e profundidades, com diferentes diâmetros e geometrias;
- Possibilidade de tratar só as camadas de terreno necessárias, permitindo tratar solos heterogêneos, adaptando os parâmetros de execução aos extratos de solo correspondentes.

Entretanto, a técnica apresenta algumas desvantagens e limitações, onde se podem destacar as seguintes [25, 26]:

- Reduzida capacidade de resistir a esforços de tração e flexão (exceto se os corpos de *jet* forem reforçados com elementos metálicos);
- Apresenta uma elevada dispersão dos valores das características mecânicas do solo tratado;
- Dificuldade na medição dos diâmetros das colunas executadas;
- Podem ser produzidos grandes quantidades de refluxo de calda, dependendo do sistema de *jet* selecionado, podendo resultar em movimentos indesejados do solo à superfície;
- Dificuldades em remover e manusear o refluxo de calda;
- Apresenta custos elevados, tanto no processo de execução, como no controlo de qualidade;
- Dificuldades de garantir a verticalidade em colunas muito compridas.

Deverá ser avaliada com precaução a utilização da técnica de *jet grouting* nas seguintes situações:

- Em solos muito compactos, de difícil desagregação, ou com a percolação muito rápida de água;
- Em solos orgânicos, pela sua agressividade e potencial reação química e degradação da calda e em solos contaminados;
- Em camadas de solos com muitos vazios (e.g. cascalho), sob risco de não se obter as colunas com os diâmetros esperados e com o risco da percolação da calda.

2.6 Análise comparativa entre as técnicas de injeção

Como visto anteriormente, as técnicas de injeção apresentam um alargado campo de aplicações, no entanto, cada técnica possui características próprias e aplicabilidades específicas. Ao selecionar a técnica de injeção mais adequada, há que se ter em conta a finalidade e o local da obra, o tipo de solo e o contexto geotécnico, os materiais e equipamentos utilizados e ainda os custos associados.

Tendo em conta a caracterização anteriormente apresentada de cada uma das técnicas de injeção, pode afirmar-se que o *jet grouting* é a solução mais competitiva e vantajosa. Quando comparada com as demais técnicas de injeção, distingue-se pela sua versatilidade,

no que se refere aos tipos de solos em que pode ser aplicado (de solos finos a solos granulares), nas mais distintas condições de aplicação, podendo obter elementos de diferentes geometrias e orientações (elementos horizontais, verticais ou inclinados), recorrendo a equipamentos de pequeno porte, permitindo a sua aplicação em locais de acesso restrito e/ou limitado (e.g. reforço de fundações a partir do interior da própria estrutura), em condições de operação difíceis (e.g. consolidação de abóbodas de túneis a partir do seu interior ou da superfície), provocando vibrações e ruídos reduzidos não causando danos em estruturas adjacentes [3, 27]. E ainda, com a técnica é possível ter maior controlo sobre a quantidade e a pressão de calda injetada, o que nem sempre acontece nas demais técnicas, como é o caso da permeação.

Na Figura 2.9 é possível observar a aplicabilidade do *jet grouting* e das técnicas de injeção tradicionais, em diferentes tipos de solos. Nota-se que as injeções tradicionais são maioritariamente aplicadas em solos de granulometria mais grossa, sendo o *jet grouting* a única solução que pode ser utilizada nos diferentes tipos de solos.

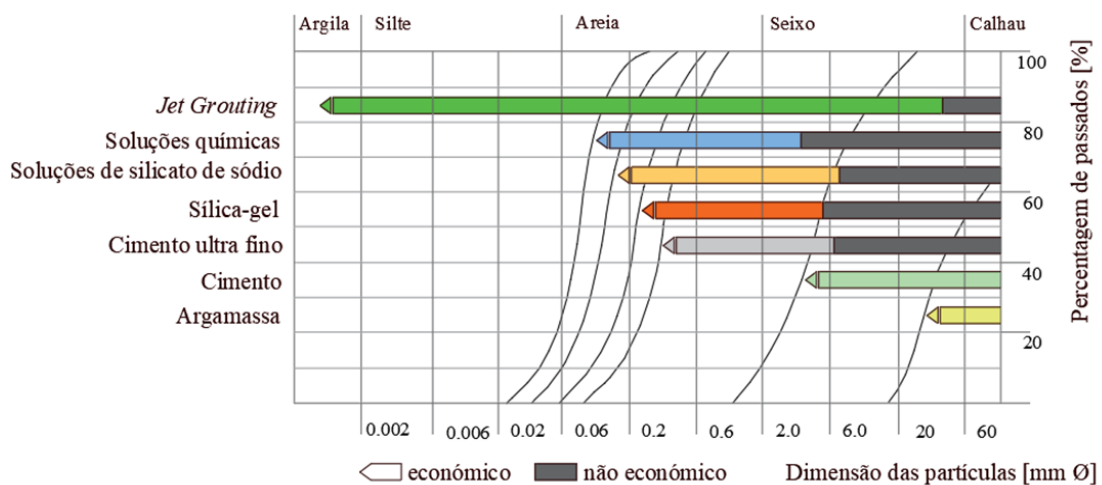


Figura 2.9 - Comparação da aplicabilidade das técnicas de injeção de melhoria dos solos (Adaptado [26])

No capítulo 3 dedica-se ao estudo da técnica de *jet grouting* de forma pormenorizada, uma vez que, é o objetivo de estudo da dissertação. Apresenta-se o desenvolvimento histórico da técnica, os sistemas de injeção e as principais evoluções tecnológicas, os parâmetros operacionais do *jet grouting* e o processo executivo da técnica. Inclui ainda o controlo de qualidade de todo o processo.

3. *Jet Grouting*

3.1 Evolução Histórica

A técnica de *jet grouting*, também conhecida por *Very High Pressure (VHP) grouting*, foi aplicada pela primeira vez na década de 50 no Paquistão, pela *Cementation Company*. Entretanto, em meados de 1965, teve o seu desenvolvimento no Japão, pelas mãos dos irmãos *Yamakado*, onde foi sujeito a várias modificações, alcançando importantes progressos [8, 28].

No início dos anos 70 foram desenvolvidos em simultâneo, dois métodos de *jet grouting*. O primeiro método designado de *Chemical Churning Pile* ou *CCP jet grouting*, desenvolvido por *Nakanishi* [29], que utilizava caldas químicas como material aglutinante. As caldas eram injetadas a altas pressões, através de bicos injetores localizados na parte inferior de uma única barra de furação que rodava durante a injeção, formando as colunas de solo-cimento [8, 28]. No entanto, as caldas químicas foram substituídas por caldas de cimento devido a preocupações ambientais [28].

Relativamente ao segundo método, designado de *Jet Grouting (JG)* pelo seu criador *Yahiro*, baseava-se no corte, substituição e cimentação do solo, tipicamente usando três varas coaxiais que forneciam água, ar e calda de cimento [8].

O sistema de *jet grouting* foi sujeito, ainda no Japão, a várias modificações, sendo a mais importante o uso de calda de cimento envolvida por ar comprimido, originando assim o sistema *Jumbo Special Grout (JSG)*, que permitia a construção de colunas de maiores diâmetros. Com o *JSG* foi possível obter colunas com diâmetros 1.5 a 2 vezes maiores dos que as colunas de *CCP* [8].

Após o desenvolvimento inicial no Japão, o *jet grouting* foi introduzido e otimizado em vários países na década de 1980, nomeadamente, na Alemanha, França, Brasil e especialmente em Itália [8]. Em Portugal, a utilização da técnica foi generalizada a partir da década de 1990, em particular em obras subterrâneas, com destaque para os trabalhos de expansão do metropolitano de Lisboa [30].

3.2 Sistemas de *Jet Grouting*

A otimização da técnica de *jet grouting* ao longo dos anos, levou ao desenvolvimento de três sistemas base, que se diferenciam em função do tipo e número de fluídos injetados no terreno [22]. A seleção do sistema de *jet* mais adequado é determinada em função das características do solo, da forma geométrica dos elementos que se pretende obter e das propriedades mecânicas a atingir após o tratamento do solo [26]. Deve-se ainda ter em conta os objetivos da intervenção, o prazo de execução e os custos associados [2]. Assim sendo, têm-se os seguintes sistemas de *jet*, ilustrados na Figura 3.1:

- Sistema de *Jet* Simples ou *Jet* 1;
- Sistema de *Jet* Duplo ou *Jet* 2;
- Sistema de *Jet* Triplo ou *Jet* 3.

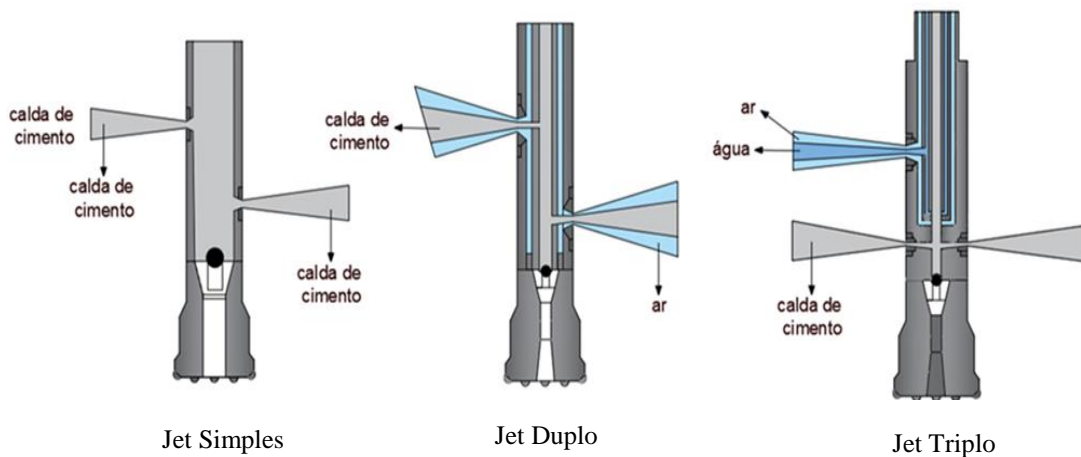


Figura 3.1 - Sistemas de *jet grouting* (Adaptado [31])

3.3.1 Sistema de *Jet Simples*

O sistema de *jet* simples é o mais básico de todos, e é caracterizado pela injeção de calda de cimento no solo, através de bicos injetores, a altas pressões e com elevada velocidade, promovendo simultaneamente, a desagregação das partículas de solo e a sua aglutinação [2].

A sua utilização é geralmente limitada a solos coesivos com $5 < N_{SPT} < 10$, e a solos incoerentes com $N_{SPT} < 20$, restrição esta explicável pela resistência oposta pelos solos de maior consistência ou mais densos à ação do jato. É possível obter colunas com diâmetros entre os 0,3 m e os 1,2 m [3]. É geralmente aplicado em cortinas de impermeabilização em

solos porosos, na consolidação de abóbodas de túneis, em ancoragens e selagens [26]. É um sistema económico, contudo, é o mais limitado quanto à sua aplicabilidade nos diferentes tipos de solos [25].

3.2.2 Sistema de *Jet Duplo*

O sistema de *jet* duplo difere do anterior, pela utilização de jatos de calda de cimento envolvidos por ar comprimido, aumentando assim a capacidade de desagregação do solo e facilitando a sua aglutinação [2]. Devido ao maior poder de erosão e maior alcance do jato, é possível executar colunas com maiores diâmetros, sendo possível obter colunas de 0.6 a 2.0 m de diâmetro [3].

Pode ser utilizado em vários tipos de solos, desde argilas, areias e solos com cascalhos, sendo no entanto, a sua utilização limitada a solos coesivos com $N_{SPT} < 10$, e a solos incoerentes com $N_{SPT} < 50$ [2, 3]. É geralmente aplicado na estabilização de solos, painéis impermeabilizantes e reforço de fundações [26].

3.2.3 Sistema de *Jet Triplo*

O sistema de *jet* triplo é o mais complexo dos três, recorrendo a jatos de água, ar e calda [2]. A desagregação do solo é efetuada por um jato de água, envolvido por ar comprimido, através de um bico injetor superior comum, possibilitando assim, maior penetração da calda de cimento no solo, que é injetada através de um bico injetor inferior, numa vara coaxial tripla [2, 23].

Pode ser aplicado a qualquer tipo de solo, sendo a sua utilização geralmente limitada a solos coesivos com valores de $N_{SPT} < 15$, e a solos incoerentes com $N_{SPT} < 50$. É possível obter colunas com diâmetros de 0.8 m a 3m [3]. É geralmente utilizado no reforço de escavações e fundações, controlo da permeabilidade no solo, cortinas impermeabilizantes, estabilização de solos de granulometria fina [26]. É o sistema mais dispendioso dos três, devido à potência necessária para a realização das injeções e por requerer equipamentos mais complexos [25].

Apresenta-se no Quadro 3.1, de forma resumida, a análise comparativa das principais vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas de *jet grouting* convencionais.

Quadro 3.1 – Análise comparativa entre os sistemas de *jet grouting* (Adaptado [3, 25, 29])

<i>Sistemas de Jet Grouting</i>	
<i>Sistema de Jet Simples (JET1)</i>	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema simples e de rápida execução; • Menor retorno de material de refluxo; • Apresenta maiores valores de resistência em solos arenosos do que o JET2 e JET3; • Adequado para a realização de colunas sub-horizontais; 	<ul style="list-style-type: none"> • Colunas de menores diâmetros (0.3 a 1.2 m); • Dificuldade em controlar a qualidade dos elementos em solos coesivos; • Mais propenso à obstrução à saída do material de refluxo; • Maior consumo de cimento por volume de solo tratado do que JET2 e JET3, pela não existência de mecanismos de desagregação auxiliares;
<i>Sistema de Jet Duplo (JET2)</i>	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Diâmetros superior ao JET2 e inferior ao JET3 (0.6 a 2.0 m); • Maior eficiência em solos coesivos do que o sistema JET1; 	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta menores valores de resistência em relação aos sistemas de JET1 e JET3, em qualquer tipo de solo; • Dificuldade na execução de elementos horizontais; • A eficiência do jato de ar diminui à mediada que passa da horizontal para vertical; • Pouco usado no reforço de fundações.
<i>Sistema de Jet Triplo (JET3)</i>	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Diâmetros superiores aos restantes sistemas (0.8 a 3.0 m); • Sistema mais eficaz no tratamento de solos argilosos; • Valores de resistência superior aos restantes sistemas, com exceção dos solos arenosos tratados pelo JET1; • Maior facilidade em controlar o material de refluxo e empolamento; 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema e equipamentos mais complexos; • Requer experiência significativa; • Maior tempo de execução do que os restantes sistemas; • A eficiência do jato de ar diminui a mediada que passa da horizontal para vertical;

3.2.4 Evoluções Tecnológicas

Ao longo dos anos foram surgindo algumas variações dos sistemas convencionais de *jet grouting*, com melhoria dos equipamentos e técnica de injeção, com o objetivo de melhorar ainda mais as propriedades mecânicas e aumentar as dimensões das colunas, obtendo maior precisão na geometria final dos corpos de *jet* [23, 32]. São apresentados a seguir alguns sistemas modificados de *jet grouting* e suas principais características.

Sistema X-Jet (Cross-jet)

Nos finais de 1980 foi desenvolvido o sistema *X-Jet* que proporcionou avanços inovadores nos sistemas de injeção [33]. Neste sistema são utilizados dois jatos de água colidindo, envolvidos por ar comprimido para erodir o solo, e que se intersectam a uma determinada distância do ponto de injeção. A energia de corte é gradualmente reduzida, limitando a capacidade de desagregação do solo, permitindo deste modo controlar com maior precisão as dimensões dos elementos de *jet* [23]. É possível obter colunas de 2 a 2,5 metros de diâmetro, com grande precisão de geometria, sendo normalmente aplicado no tratamento de solos moles, como é o caso das argilas moles [30].

Este sistema permite tratar até 4 vezes mais volume de solo quando comparado com os outros sistemas de *jet*, utilizando os mesmos equipamentos [33]. Permite ainda, a redução da quantidade de refluxo produzida [30]. Porém, a técnica requer equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada, o que pode tornar-se oneroso [30].

Sistema Super Jet

O sistema *Super Jet* foi desenvolvido no Japão na década de 90. Foi desenvolvido com base na evolução dos equipamentos e no aumento da energia de injeção, produzindo colunas de *jet grouting* de maiores diâmetros [32]. Deriva da evolução do sistema de *jet* duplo e recorre a bicos injetores opostos e de grande diâmetro [2, 34]. Foi desenvolvido para que os bicos injetores concentrem o fluxo de injeção e minimizem a sua dispersão, obtendo maior eficácia na desagregação do terreno. Aliada a uma lenta rotação e elevação da vara, torna-se possível a execução de colunas com cerca de 3 a 5.5 metros de diâmetros [29].

Possui um vasto campo de aplicação e é considerado o sistema mais eficaz na estabilização de grandes massas de solo [22]. É geralmente utilizado no controlo de águas subterrâneas, na estabilização de solos à liquefação, em painéis impermeabilizantes e na estabilização de solos em túneis [26].

Sistema Super Jet - Midi

O sistema *Super Jet-Midi* é um sistema recente, que surgiu em Taiwan, em 2003 [2]. É uma pequena variação do sistema *Super Jet*, também desenvolvido com base no sistema de *jet* duplo. A calda de cimento é injetada a elevada pressão e a vara de injeção é retirada a uma velocidade de rotação constante, permitindo obter colunas com diâmetros entre os 2.4 a 3.5 m [2]. É geralmente aplicado quando não é possível utilizar o sistema *Super Jet* devido a restrições de espaço [29].

No Quadro 3.2 são apresentados os principais aspetos dos sistemas *X-Jet*, *Super Jet* e *Super Jet-Midi*, incluindo os principais parâmetros de execução e uma estimativa dos diâmetros e a profundidade máxima alcançada.

Quadro 3.2 - Principais aspetos dos sistemas *X-Jet*, *Super Jet* e *Super Jet-Midi* (Adaptado [29])

<i>Parâmetros</i>		<i>Sistemas de Jet Grouting</i>		
		<i>Super Jet</i>	<i>Super Jet - Midi</i>	<i>X - Jet</i>
Sistema		Modificação do sistema de <i>jet</i> duplo		Sistema de <i>jet</i> triplo
Pressão	Calda (MPa)	30		4 ± 1
	Ar (MPa)	0.7 a 1.05		0.6 a 1.05
	Água (MPa)	N/A		40
Caudal	Calda (l/min)	300 x 2 = 600	200 x 2 = 400	190 a 250 ¹
	Ar (m ³ /min)	>10		6 ± 2
	Água (l/min)	N/A		180
Velocidade de subida (min/m)		16	12	8, 16, 24 ²
Diâmetro alcançável (m)		5	3.5	2.5
Profundidade alcançável (m)		30 (máximo 65)		60
N/A Não Aplicável ^{1 e 2} dependem das condições do solo				

3.3 Parâmetros de *Jet Grouting*

Existem vários fatores que influenciam na execução da técnica e no desempenho final das colunas de *jet grouting*, nomeadamente as características geotécnicas do terreno natural, os parâmetros de execução e as geometrias possíveis de se obter.

3.3.1 Características geotécnicas do terreno

É fundamental recorrer à caracterização geológica e geotécnica adequada dos terrenos a intervir, uma vez que tem grande influência no projeto e no resultado final dos elementos de *jet grouting*. Deverá ser efetuada uma campanha de prospeção geotécnica, com a realização de sondagens, ensaios *in-situ* e de laboratório, de modo a obter o perfil do terreno e suas respetivas características, e com base nos parâmetros geotécnicos obtidos escolher o sistema de *jet* mais adequado para cada caso.

3.3.2 Parâmetros de execução do *jet grouting*

Para a realização da técnica de *jet grouting* é necessário definir um conjunto de parâmetros de execução, que variam de acordo com o sistema de injeção adotado. Assim sendo, a eficiência da técnica, a geometria do elemento final e suas características mecânicas, dependem da seleção correta dos valores a atribuir a esses parâmetros [3].

Os parâmetros de *jet grouting* comuns aos três sistemas de injeção são os seguintes [5]:

- Pressão e caudal dos fluídos (calda, água e ar);
- Composição da calda (relação água/cimento (a/c));
- Velocidade de subida e rotação da vara durante a injeção;
- Características dos bicos injetores (diâmetro e número de bicos injetores).

No caso do sistema de *jet* duplo são necessários adicionar mais dois parâmetros, relativos a utilização de um jato de fluído desagregador (ar e/ou água), considerando assim, a pressão e o caudal do fluído desagregador. No sistema de *jet* triplo, para além dos parâmetros mencionados anteriormente, é necessário definir o número e o diâmetro dos bicos injetores dos fluídos desagregadores.

Durante a execução do *jet grouting*, a pressão de injeção dos fluídos, a velocidade de rotação e de ascensão da vara e os caudais dos fluídos são controlados, e registados automaticamente, de forma contínua, e se necessário reajustados.

Os parâmetros de execução de *jet grouting* podem variar de acordo com o tipo de solo, equipamento utilizado e os requisitos especiais de cada projeto. São apresentados a seguir os valores limites dos parâmetros de *jet grouting* usualmente adotados para os sistemas de injeção convencionais. No Quadro 3.3 são apresentados os valores prescritos pela EN 12716 (2001) e no Quadro 3.4 os valores recomendados por Carreto (2000) [3], que resultam da compilação de valores indicados na bibliografia de especialidade.

Quadro 3.3 – Parâmetros de *jet grouting* adotados para os diferentes sistemas. (Adaptado EN 12716 (2001) [5]).

<i>Parâmetros de Jet Grouting</i>		<i>Sistemas de Jet Grouting</i>			
		<i>Jet Simples</i>	<i>Jet Duplo (ar)</i>	<i>Jet Duplo (água)</i>	<i>Jet Triplo</i>
Pressão	Calda (MPa)	30 a 50	30 a 50	> 2	> 2
	Ar (MPa)	N/A	0.2 a 1.7	N/A	0.2 a 1.7
	Água (MPa)	N/A	0.2 -1.7	N/A	0.2 – 1.7
Caudal	Calda (l/min)	50 a 450	50 a 450	50 a 200	50 a 200
	Ar (m ³ /min)	N/A	3 a 12	N/A	3 a 12
	Água (MPa)	N/A	1 a 9.8	50 a 150	0.33 a 6.0

Quadro 3.4 - Parâmetros de *jet grouting* adotados para os diferentes sistemas (Adaptado [3]).

<i>Parâmetros de Jet Grouting</i>		<i>Sistemas de Jet Grouting</i>		
		<i>Jet Simples</i>	<i>Jet Duplo</i>	<i>Jet Triplo</i>
Pressão	Calda (MPa)	20 a 60	20 a 55	0.5 a 27.6
	Água (MPa)	Pré-furação	Pré-furação	20 a 60
	Ar (MPa)	-	0.7 a 1.7	0.5 a 1.7
Caudal	Calda (l/min)	30 a 180	60 a 150	60 a 250
	Água (l/min)	Pré-furação	Pré-furação	30 a 150
	Ar (m ³ /min)	-	1 a 9.8	0.33 a 6.0
Diâmetros dos injetores	Calda (mm)	1.2 a 5	2.4 a 3.4	2 a 8
	Água (mm)	Pré-furação	Pré-furação	1.0 a 3.0
Número de injetores	Calda	1.0 a 6.0	1.0 a 2.0	1.0
	Água	Pré-furação	Pré-furação	1.0 a 2.0
Relação água/ cimento (a/c)		1:0.5 a 1:1.25	1:0.5 a 1:1.25	1:0.5 a 1:1.25
Velocidade de subida (cm/min)		0.1 a 0.8	0.07 a 0.3	0.04 a 0.5
Velocidade de rotação (r.p.m.)		6.0 a 30	6.0 a 30	3.0 a 20

É possível observar pela análise do Quadro 3.3 e do Quadro 3.4 que os parâmetros de *jet grouting* apresentam uma dispersão de valores, o que pode resultar do equipamento utilizado, da experiência dos engenheiros, de investigações realizadas em cada país ou empresa especializada, resultando em alterações no método original [3, 35].

A EN 12716 (2001) (Quadro 3.3) apresenta valores de pressão de calda para o sistema de *jet* simples e duplo (ar) entre 30 MPa a 50 MPa, no entanto afirma que limites inferiores até 10 MPa podem ser adotados em casos particulares, como em colunas de pequeno diâmetro em solos muito soltos. Também refere que os equipamentos mais recentes permitem atingir valores de pressão de calda até os 70 MPa ou caudal até 650 l/min.

3.3.3 Geometria dos elementos de *jet grouting*

O sucesso da técnica de *jet grouting* deve-se também à sua versatilidade em criar elementos de diversas geometrias e orientações, consoante a finalidade de aplicação. As geometrias dos elementos de *jet grouting* usualmente utilizadas são ilustradas na Figura 3.2 [26]:

- Colunas: circulares, semicirculares ou parciais;
- Painéis: simples ou duplos.

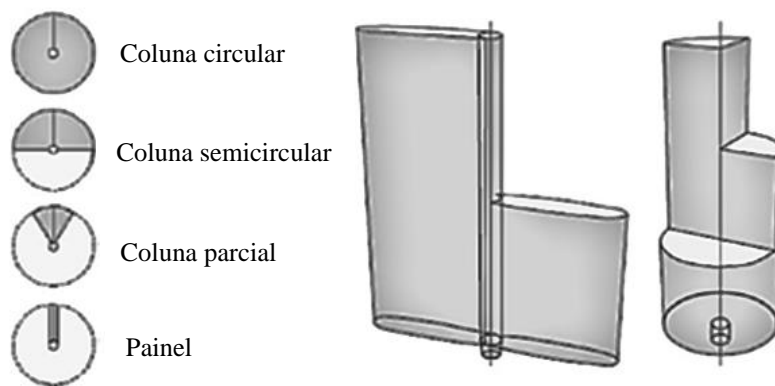


Figura 3.2 - Geometrias usualmente utilizadas nos elementos de *jet grouting* [36]

A geometria dos elementos de *jet grouting* depende de como é realizada a ascensão da vara durante a injeção, ou seja, do tipo de movimento e da velocidade de subida e de rotação. Assim, se a vara efetuar um movimento de rotação completa (de 360°) obtêm-se uma coluna completa, se efetuar um movimento de rotação parcial (de 180°) obtêm-se meia coluna ou

uma coluna parcial [1, 22]. Quanto aos painéis, estes são executados sem rotação da vara durante a sua execução [22].

Podem ser criados elementos de *jet grouting* de formas mais complexas recorrendo a diferentes medidas construtivas, tais como, variar a inclinação, o sentido e a velocidade de rotação da vara e a disposição das varas de injeção [22, 37]. Os elementos e as estruturas de *jet grouting* criados podem ser reforçadas com recurso a varões de aço, inserção de perfis metálicos ou fibra de vidro, de modo a conferir maior resistência à flexão e à tração, se necessário [22].

As diferentes geometrias dos elementos de *jet grouting* anteriormente apresentadas, permitem criar diversas estruturas, sendo as mais usuais as seguintes, ilustradas na Figura 3.3 [5]:

- Diafragmas - são estruturas obtidas pela sobreposição de elementos entre si;
- Lajes - são estruturas horizontais formadas pela sobreposição de elementos verticais;
- Blocos - estruturas tridimensionais formadas pela sobreposição de elementos;
- Enfilagens - estruturas formadas pela sobreposição de elementos horizontais ou sub-horizontais.

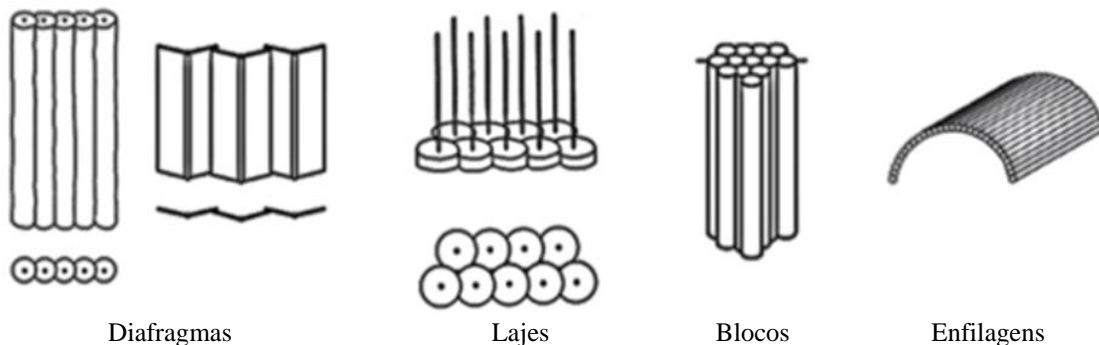


Figura 3.3 - Exemplos de estruturas de *jet grouting* [5, 22]

Relativamente ao modo de execução de elementos de *jet grouting*, a norma EN 12716 (2001) apresenta duas sequências que podem ser adotadas, denominadas de "*fresh in fresh*" ou sequência contínua e "*fresh in hard*" ou sequência alternada, ilustradas na Figura 3.4. Na sequência "*fresh in fresh*" as colunas são criadas de forma contínua, e em curtos intervalos de tempo, sem esperar que a calda ganhe presa nas colunas adjacentes. Assim sendo, parte da coluna criada anteriormente é erodida e injetada novamente, repetindo todo o processo de tratamento, até que se obtenha um elemento de *jet* contínuo. No entanto, deve-

se ter especial atenção na fase de furação para evitar que não se destruam os elementos previamente criados [22]. Para isso, é aconselhável a utilização de calda de cimento como fluído desagregador, pelo menos na área de sobreposição dos elementos [38]. Por outro lado, na sequência "fresh in hard", também conhecida por sequência primária-secundária, só se pode criar uma nova coluna quando o elemento adjacente já tenha adquirido a resistência predefinida ou após um determinado tempo de cura. Ao utilizar a sequência é necessário elaborar um plano de execução detalhado, de acordo com o tipo de estrutura que se pretende criar. É então definido um conjunto de colunas primárias, secundárias e, por vezes, terciárias, a sua distribuição e o intervalo de tempo de execução [22].

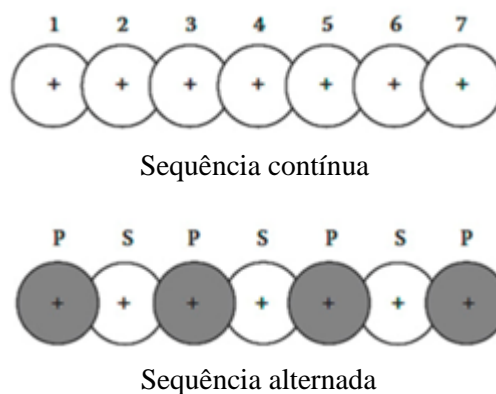


Figura 3.4 – Sequências de tratamento de colunas sobrepostas [22]

3.4 Processo de execução *Jet Grouting*

O processo de execução da técnica de *jet grouting*, compreende as seguintes etapas, esquematicamente representadas na Figura 3.5, e a seguir descritas [2, 3]:

- **Posicionamento do equipamento e furação:** inicia-se com a colocação da sonda em posição nivelada com o eixo da vara de furação e injeção, coincidente com o eixo da coluna (caso se Sequência primária-secundária íco) ou coincidente com uma das extremidades do painel. De seguida introduz-se a vara no solo e inicia-se a furação utilizando jatos de ar/ água, até à profundidade máxima que se pretende tratar. Concluída a furação obtura-se a válvula de água, para se dar início à injeção de calda.
- **Injeção:** de seguida inicia-se a injeção de calda de cimento, através de bicos injetores localizados na parte inferior da vara de perfuração. Obtêm-se assim, elementos de *jet grouting* com diferentes geometrias, conforme o tipo de

movimento efetuado pela vara. Finalizada a realização da coluna, a vara é retirada do furo e é preenchido com calda até ao topo, por gravidade.

- **Selagem e recomeço:** o processo de injeção finaliza-se com a selagem do furo. De seguida, inicia-se um novo ciclo do processo.

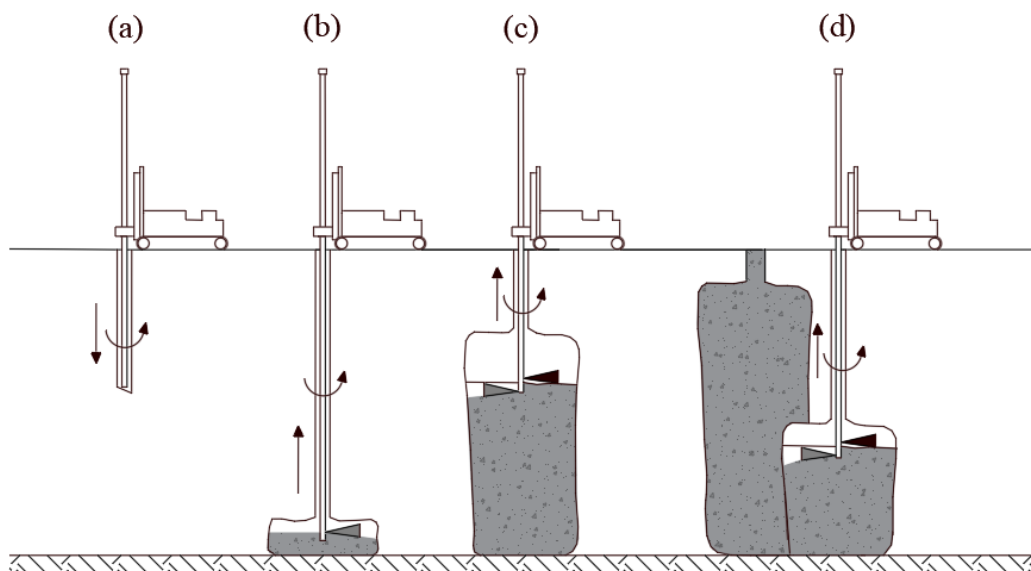


Figura 3.5 - Processo de execução da técnica de *jet grouting*: (a) furação, (b) início da injeção, (c) formação da coluna e (d) selagem e recomeço (Adaptado [26])

Em alguns casos, existem fases adicionais no processo de execução, tais como [39]:

- **Colocação da armadura:** quando se prevê no projeto o reforço das colunas de *jet grouting* com recurso a armaduras, estas são normalmente colocadas no eixo da coluna logo após a injeção. Como alternativa a armadura pode ser colocada com a perfuração da coluna após o endurecimento.
- **Ligação das colunas de *jet grouting* à estrutura:** quando se recorre ao reforço de fundações, deve-se proceder à ligação dos elementos de *jet grouting* à estrutura existente. Nas situações correntes a carga é transmitida diretamente da estrutura para as colunas de *jet grouting* sem necessidade de dispositivos especiais ou de elementos de reação.

3.5 Controlo de Qualidade

Tendo em conta as várias etapas que envolvem o projeto de *jet grouting* e a dificuldade em conhecer com precisão as características finais do material tratado, torna-se fundamental definir e implementar um rigoroso plano de garantia e controlo de qualidade, de modo a

validar os pressupostos de projeto, assegurar que a execução seja bem-sucedida e verificar o adequado funcionamento das estruturas definitivas, monitorizando todo o processo.

O controlo de qualidade é realizado de acordo com a norma EN 12716 (2001), como referido anteriormente, que define os procedimentos de controlo e monitorização que devem ser seguidos.

Validação dos pressupostos de projeto

Assim sendo, os parâmetros pré-estabelecidos na fase de projeto, muitas vezes definidos com bases empíricas, devem ser validados através da realização de ensaios *in situ*. A realização das colunas de teste tem como objetivo a inspeção visual dos elementos de *jet grouting* e a recolha de amostras para a realização de ensaios de laboratório, permitindo verificar os diâmetros obtidos e os parâmetros de resistência, deformabilidade ou permeabilidade definidos em projeto, possibilitando ajustá-los, caso necessário.

Controlo de execução

O controlo de execução é efetuado através da monitorização e o registo contínuo e em tempo real, dos parâmetros de execução de *jet grouting*, através de um sistema automático de aquisição de dados, durante os processos de furação e injeção, sendo os principais parâmetros registados apresentados no Quadro 3.5. É possível ajustar os parâmetros de execução em tempo real, através dos registos obtidos, caso necessário [23].

Quadro 3.5 – Principais parâmetros registados durante a execução do *jet grouting* (Adaptado [22])

<i>Furação</i>	<i>Injeção</i>
Diâmetro de perfuração	Velocidade de rotação e subida das hastes
Inclinação do furo	Pressão do ar
Comprimento	Caudal e pressão da água
Velocidade de avanço e rotação	Caudal e pressão de argamassa
Pressão de furação	Quantidade de cimento consumida

Existem outros parâmetros que devem ser verificados, tais como, as condições dos injetores, caracterização da calda de cimento, e o material de refluxo [30].

As condições dos injetores são rigorosamente inspecionadas antes e durante a execução dos elementos de *jet*, visto que, têm grande influencia na energia de injeção e consequentemente no diâmetro final das colunas [30].

Durante a formulação da calda de cimento deverão ser recolhidas, periodicamente, amostras da mesma, para que seja submetida a realização de ensaios, garantindo que preencha os requisitos necessários, isto é, que seja injetada sem dificuldade, permitindo a melhor erosão e mistura com o solo e apresentar as características finais desejadas [22]. Para tal, devem ser verificados constantemente, o peso volúmico, a segregação, a viscosidade, a variação do volume e a resistência à compressão da calda [5, 22].

É também importante controlar a quantidade e qualidade do material de refluxo. O material de refluxo é, provavelmente, o mais importante indicador no controlo de qualidade de execução [22]. A norma EN 12716 (2001) recomenda que durante o processo de injeção se proceda à inspeção visual do material de refluxo e de suas características, devendo este manter-se espesso e contínuo, o que indica que a mistura do solo e da calda está a processar-se de forma correta [23]. A inspeção visual do refluxo permite [23]: (i) identificar a ocorrência de obstruções no espaço anelar entre o furo e a vara, o que pode provocar pressões excessivas no solo e conseqüentemente o seu levantamento; (ii) controlar a eficiência do corte do terreno, pela avaliação da presença de partículas de solo no refluxo e (iii) identificar alterações litológicas, pela verificação de variações de aspeto e cor do refluxo.

De acordo com a EN 12716 (2001), se for observado algum comportamento inesperado do material de refluxo, ou em caso de redução inesperada do caudal, devem ser investigadas as causas e ajustados os parâmetros de execução, permitindo assim, controlar riscos de ocorrência de empolamento ou deslocamentos laterais no terreno [23]. A norma recomenda ainda, que sejam recolhidas amostras do material de refluxo para submeter a ensaios laboratoriais (ensaio de compressão).

Para facilitar no controlo do refluxo e evitar problemas ambientais, o material deverá ser devidamente direcionado para uma zona de retenção ou deposição.

Controlo do elemento final de *jet grouting*

O controlo do elemento final de *jet grouting* tem como objetivo averiguar se as características de conceção são compatíveis com os requisitos de projeto, no que diz respeito às características geométricas (diâmetro e comprimento) e mecânicas (resistência à compressão, deformabilidade, permeabilidade) e ao seu desempenho e funcionalidade.

De acordo com a norma EN 12716 (2001) a inspeção visual e a medição direta são os métodos mais eficazes para avaliar as dimensões dos elementos de *jet grouting*, no entanto nem sempre é viável devido a problemas de acesso (e.g. em reforço de fundações), ao nível

freático elevado ou em colunas muito profundas (e.g tampões de fundo) [39]. Nos casos em que os elementos de *jet grouting* não podem ser expostos para a inspeção visual, a avaliação dos resultados (principalmente o comprimento dos elementos) pode ser feita pela realização de carotagem de amostras, que posteriormente serão submetidas a análises laboratoriais para a verificação das características físicas e mecânicas dos elementos.

O controle do desempenho permite verificar a funcionalidade dos elementos finais de *jet grouting*. As colunas são submetidas a ensaios, tendo em conta as suas finalidades, submetendo-as às condições de operação e analisando os resultados [38]. São tipicamente realizados ensaios de carga e de permeabilidade.

Os ensaios de carga são apropriados quando as colunas de *jet grouting* são usadas na construção ou reforço de fundações, para analisar o seu desempenho e confirmar a adequabilidade de resposta das colunas às cargas aplicadas.

Os ensaios de permeabilidade são realizados para verificar capacidade de impermeabilização das cortinas de estanquidade ou para avaliar a continuidade das estruturas criadas com colunas parcialmente sobrepostas [22].

Instrumentação e monitorização

Devido as elevadas pressões que a técnica de *jet grouting* induz ao terreno durante a injeção da calda, podem ocorrer possíveis empolamentos e assentamentos do solo e deslocamentos em estruturas adjacentes, havendo, portanto, a necessidade de elaborar um Plano de Instrumentação e Observação (PIO), onde possam ser registados e analisados todo o comportamento do subsolo, das estruturas e infraestruturas adjacentes, durante e após a construção [1, 2].

O Plano de Instrumentação e Observação é definido a partir da análise dos principais condicionamentos intervenientes na execução, tendo como objetivo a prevenção e gestão de riscos, garantindo a realização dos trabalhos relativos ao *jet grouting* em condições de segurança e de economia [1, 2].

Devem ser definidos as grandezas a medir, o tipo de aparelho instalado e suas características, a frequência das leituras, os critérios de alerta e de alarme das grandezas a monitorizar [1]. Em obras de *jet grouting*, são geralmente adotados os dispositivos apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Exemplos de instrumentação utilizada em obras geotécnicas e as respectivas funções [2, 23].

<i>Instrumento</i>	<i>Função</i>
Marcas topográficas Alvos topográficos	Determinar deslocamentos (à superfície e em profundidade), quer na horizontal, quer na vertical em estruturas e edifícios.
Réguas	Controlar os deslocamentos nas estruturas vizinhas.
Extensómetros	Controlar as deformações (extensões) em estruturas e edifícios.
Inclinómetros	Monitorizar os deslocamentos internos, horizontais e verticais do terreno.
Piezómetros	Controlar o nível freático e a variação de pressões intersticiais resultantes da injeção.

3.6 Ensaios de carga

Os ensaios de carga são realizados de modo a assegurar um melhor desempenho dos elementos de fundação, permitindo verificar o comportamento da estrutura tendo em conta os requisitos de utilização e a sua capacidade resistente.

Os ensaios de carga possibilitam recolher informação relativa a [40]:

- avaliação da capacidade resistente última;
- analisar curvas carga/ deslocamento;
- avaliar os assentamentos associados às cargas aplicadas;
- degradação da carga por resistência lateral e de ponta.

As colunas de *jet grouting*, quando usadas como elementos de fundação, devem ser submetidas a ensaios de carga de modo a verificar o seu desempenho real e confirmar a sua capacidade de carga. Os ensaios de carga sobre as colunas de *jet grouting* podem ser realizados com os mesmos procedimentos recomendados para as estacas de fundação [22].

De acordo com o EN 1997-1 (2010), os ensaios de carga em estacas podem ser utilizados para avaliar a adequação do método construtivo, determinar a resposta ao carregamento, tanto em termos de assentamento como de carga limite de uma estaca representativa e do respetivo terreno circundante e permitir o juízo sobre o conjunto da fundação por estacas.

Nesta secção são apresentados dois exemplos de trabalhos onde foram realizados ensaios de carga sobre colunas de *jet grouting*

Bzówka, J., (2012) [41]

O trabalho desenvolvido por Bzówka, J., (2012) teve como principal objetivo analisar os resultados de ensaios de carga e de tração em colunas de *jet grouting* realizados em Bojszowy Nowe (Polónia). Foram executas quatro colunas de *jet*, com o sistema de *jet* duplo, dispostas em uma malha quadrada 5.0 x 5.0 m² (Figura 3.6), todas com 7.0 m de comprimento e com o diâmetro de 0.6 m. Três das colunas foram reforçadas com barras de aço HEB240, a P2, P3 e P4, enquanto que a P1 não foi reforçada.

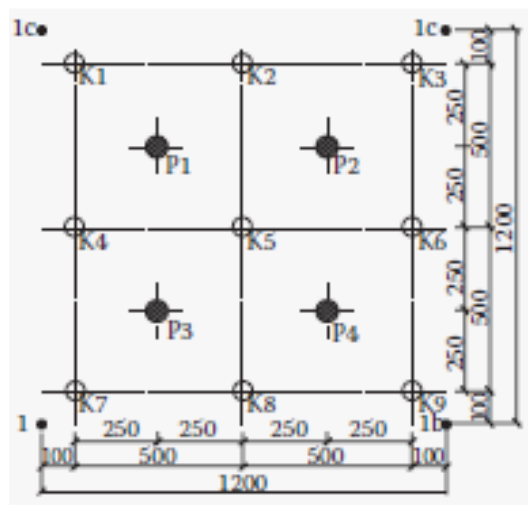


Figura 3.6 - Localização das colunas *jet grouting* no local dos ensaios [41]

Foi implementado um programa de ensaios de carga, ensaio de compressão e tração, onde foi possível observar o desempenho das colunas de *jet grouting* reforçadas e não reforçadas ao longo do carregamento, analisar a transferência de carga por atrito lateral e de ponta e sua influência na capacidade resistente. Na Figura 3.7 é apresentado o esquema de ensaio adotado.



a) Ensaio de compressão



b) Ensaio de compressão

Figura 3.7 – Esquema de ensaio adotado [41]

Os ensaios de carga foram realizados em duas fases. A FASE I consistiu na realização de dois ensaios de tração nas colunas reforçadas P2 e P4 e dois ensaios de carga na coluna reforçada P3 e na coluna não reforçada P1. A FASE II, realizada 10 meses após a primeira, consistiu na realização de três ensaios de carga nas colunas P2, P3 e P4 e um ensaio de tração na coluna reforçada, P1.

Após a análise dos ensaios de carga e de tração, os autores concluíram que: (i) a carga transferida ao solo pelo atrito lateral é significativa; (ii) não há diferença significativa na capacidade de carga de coluna reforçada e não reforçada.

Tomásio et al. (2011) [43]

Em 2011, no âmbito dos trabalhos de Reabilitação e Reforço do Cais entre Santa Apolónia e o Jardim do Tabaco – 2ª Fase, os autores realizaram ensaios em colunas de *jet*. Foram realizados ensaios de carga verticais e horizontais, à escala real, sobre as colunas de *jet grouting*, com o objetivo de avaliar a viabilidade das colunas poderem vir a ser integradas na solução de fundações do edifício da Gare de Passageiros do Terminal de Cruzeiros.

Foram executadas colunas de *jet* no tratamento dos materiais lodosos existentes no interior da Doca do Terreiro do Trigo, de modo permitir a construção do seu posterior aterro com 4.2 m de altura. Consistiu na execução de colunas de *jet grouting* com 1.5 m de diâmetro, dispostas em duas malhas desfasadas de 8.0 x 8.0 m², assegurando a transferência da carga do aterro diretamente para o substrato Miocénico competente, localizado a mais de 20 m de profundidade.

A realização dos ensaios foi devidamente instrumentada, com o objetivo de medir as deformações axiais e horizontais das colunas e das cargas aplicadas. Na Figura 3.8 é ilustrado

o esquema de ensaio adotado para os ensaios de carga. Os ensaios de carga axial consistiram na aplicação ao coroamento das colunas de *jet grouting* de uma carga de compressão, por patamares, com um valor máximo de 5000kN (6000kN, ensaio 2). Valor este que correspondia a cerca do dobro do respectivo valor de serviço (2500kN). Foram utilizadas seis ancoragens de seis cordões de 0,6” como sistema de reação, e amarradas no coroamento das colunas através de um capacete metálico, que permitiu acomodar as cabeças das ancoragens, devidamente seladas no substrato competente e que permitiram suportar a força de reação (tração) necessária à aplicação das cargas de compressão sobre as colunas. As características das colunas ensaiadas encontram-se representadas no Quadro 3.7.



Figura 3.8 – Ensaios de carga axial [42]

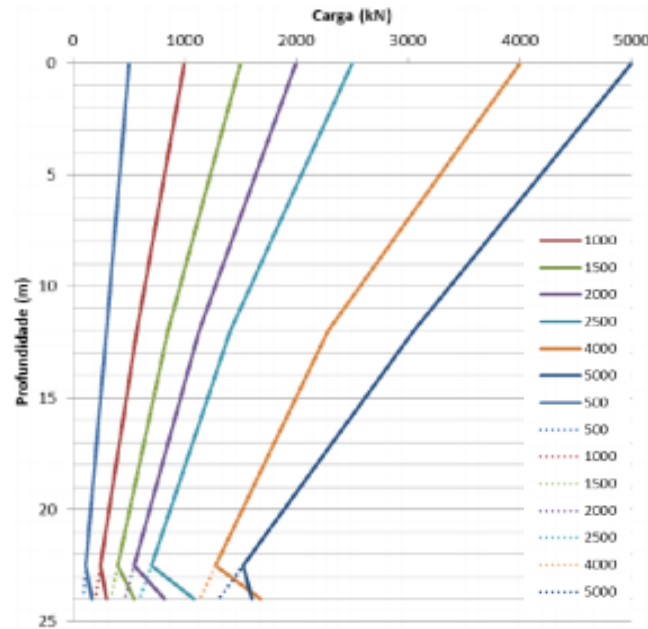
Quadro 3.7 – Características das colunas de *jet grouting* ensaiadas.

<i>Características das colunas</i>	<i>Colunas ensaiadas</i>	
	Coluna 111 (ensaio 1)	Coluna 149V (ensaio 2)
Diâmetro	1.5 m	
Comprimento	24 m	22.5 m
Tipo de reforço	Tubo de microestacas (aço da classe N80)	

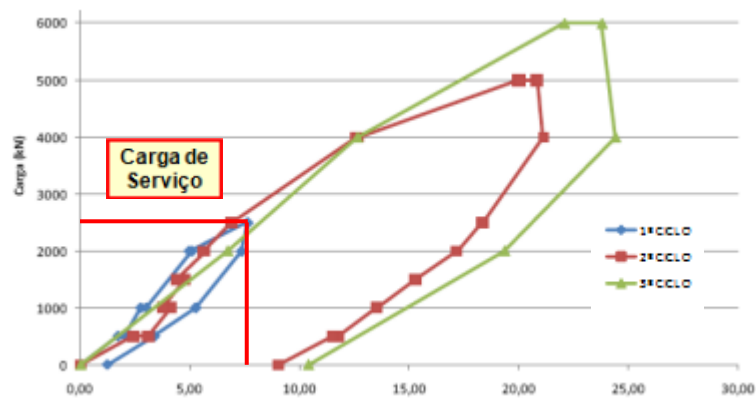
Os ensaios de carga axial permitiram verificar as deformações axiais das colunas de *jet grouting*, avaliar as tensões de atrito mobilizáveis ao longo do perímetro da coluna e a sua capacidade de carga.

Na Figura 3.9 são apresentados os resultados da transferência obtidos com base nas leituras efetuadas nos diferentes aparelhos de instrumentação. Com a análise dos resultados obtidos dos ensaios de carga vertical, foi possível: (i) confirmar a adequabilidade de resposta das colunas ensaiadas de *jet grouting* às cargas de compressão aplicadas no respectivo

coroamento; (ii) verificar que cerca de 20 a 30% da carga aplicada à cabeça da coluna é transmitida por ponta ao solo (Figura 3.9 a); e (iii) verificar que a perda de carga por atrito lateral tem um valor significativo face ao grande diâmetro da coluna (Figura 3.9 b).



a) Transferência da carga em profundidade



b) Diagrama carga/deslocamento no topo da coluna

Figura 3.9 – Resultados dos ensaios de carga axial [42]

Os ensaios com carga horizontal (Figura 3.10) permitiram avaliar as deformações horizontais das colunas de *jet grouting* quando solicitadas por uma força lateral no seu coroamento. Os ensaios realizados consistiram na aplicação ao coroamento das colunas de *jet grouting* (através do maciço de encabeçamento) de uma carga horizontal com um valor máximo estimado em 600kN, aproximadamente 10% do valor utilizado para o ensaio de carga axial. Este valor correspondia a, aproximadamente, cerca de 15% da carga de dimensionamento vertical estimada.

A carga transmitida ao coroamento da coluna foi acomodada pela resistência ao corte e à flexão das colunas armadas, devidamente restringidas pelos materiais lodosos confinantes. As características das colunas ensaiadas encontram-se apresentadas no Quadro 3.8.

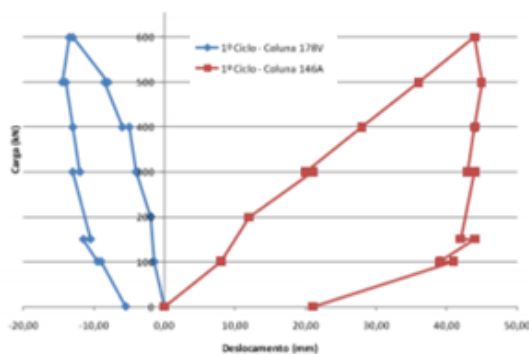


Figura 3.10 – Ensaio de carga horizontal [42]

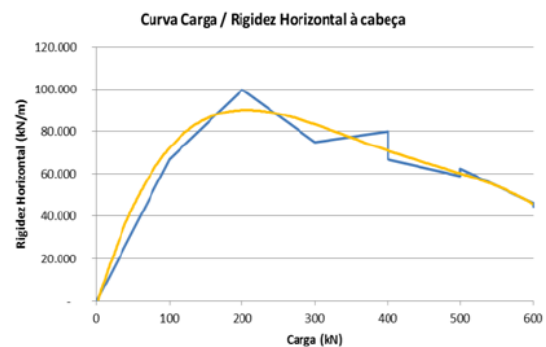
Quadro 3.8 - Características das colunas de *jet grouting* ensaiadas.

Características das colunas	Colunas ensaiadas	
	Coluna 178V	Coluna 146A
Diâmetro	1.5 m	
Comprimento	23 m	
Tipo de reforço	Tubo de microestacas (aço N80)	

Os resultados dos ensaios com carregamento lateral são apresentados em forma de gráfico na Figura 3.11.



a) Curva carga/deslocamento



c) Curva carga/ rigidez horizontal

Figura 3.11 – Diagrama carga/ deslocamento no topo das colunas [42]

Com base nos gráficos apresentados os autores concluíram que a rigidez horizontal é máxima para um valor da carga de 200 kN, que representa 8% da carga de serviço, e que os deslocamentos horizontais observados foram reduzidos

Nesta secção foram apresentados dois trabalhos com recurso a *jet grouting* onde são descritos ensaios teste que permitem avaliar o comportamento destes elementos em serviço, quer sob carregamento axial quer sobre carregamento horizontal. Além da resistência das colunas é igualmente importante a recolha de amostras e aferir o diâmetro das colunas que é um parâmetro fundamental na utilização deste método.

4. Regras de Dimensionamento

4.1 Generalidades

No presente capítulo são apresentados os principais aspetos relacionados ao dimensionamento da técnica de *jet grouting*. Faz-se inicialmente uma abordagem das normas e recomendações técnicas aplicáveis ao método, de seguida apresenta-se uma sequência das principais etapas envolvidas no processo de dimensionamento e as respetivas verificações de segurança a efetuar.

O dimensionamento da técnica de *jet grouting* é um processo muito complexo, uma vez que, é muito difícil ainda em fase de projeto determinar com precisão as propriedades geométricas e mecânicas do material resultante do solo tratado. Tais incertezas resultam do facto do princípio executivo da técnica consistir na desagregação e posterior mistura do solo ao material injetado. Assim sendo, o resultado final do tratamento dependerá das características do solo natural, da qualidade de execução do método, isto é, da percentagem de substituição ocorrida, bem como da uniformidade da operação em profundidade e do elevado número de parâmetros envolvidas no processo [3, 34].

4.2 Normalização

Apesar da técnica de *jet grouting* se encontrar amplamente difundida, verifica-se ainda uma falta de unanimidade das normas e recomendações técnicas para a sua execução, dimensionamento e controlo de qualidade.

A norma EN 12716 (2001) - *Execution of special geotechnical works - Jet Grouting*, define as especificações para a realização desta técnica. Estabelece princípios de execução, testes e monitorização dos trabalhos de *jet grouting*. No entanto, a norma concentra-se mais no processo de execução e controlo de qualidade, fornecendo apenas algumas

recomendações gerais de dimensionamento, que se encontram brevemente expostas na Secção 7, denominada de “*Considerações de dimensionamento*”.

A norma europeia referida descreve um conjunto de informações que devem ser obtidas antes da execução da técnica, que atendem: (i) descrição detalhada do solo a tratar e das suas propriedades geotécnicas; (ii) condições hidrogeológicas; (iii) avaliação das condições das estruturas e infraestruturas existentes na vizinhança da obra, e eventuais restrições à intervenção ou acessos ao local; (iv) condicionalismos ambientais; e (v) deformações admissíveis no local de execução da obra ou em estruturas adjacentes. Apresenta ainda, uma lista de atividades recomendadas para o projeto, execução e controlo de qualidade dos elementos de *jet grouting*, e indica a necessidade de se proceder a realização de investigações geotécnicas cuidadosas das condições do solo a tratar. No que diz respeito ao controlo de qualidade, é feita referência específica à avaliação da configuração geométrica e às propriedades mecânicas dos elementos de *jet grouting* (resistência, deformabilidade e/ou permeabilidade), à monitorização e realização de ensaios.

Alguns países desenvolveram suas regulamentações e normas sobre o *jet grouting*, como é o caso dos EUA (GI-ASCE 2009) [43], da Itália (AGI 2012) [38] e do Japão (JJGA 2005).

A Associazione Geotecnica Italiana (AGI 2012) [38] emitiu um documento intitulado *Raccomandazioni Tecniche sul Jet Grouting*, em que fornece fundamentos para execução da técnica. São apresentados aspetos relacionados com o dimensionamento, com indicações quantitativas de alguns parâmetros de execução. Refere-se ao controlo de qualidade e a sua relevância em todas as fases do projeto. Apresenta ainda, uma sequência ordenada de atividades que devem ser seguidas na elaboração do projeto e das respetivas verificações de segurança.

A American Society of Civil Engineers (GI-ASCE 2009) apresenta uma abordagem mais genérica, onde destaca a importância dos ensaios de campo preliminares e testes de controle de qualidade para quantificar as propriedades dos elementos de *jet grouting*.

A Japanese Jet Grouting Association (JJGA 2005) desenvolveu documentos normativos nacionais, onde se estabelecem princípios e regras de dimensionamento da técnica de *jet grouting*. Apresentam parâmetros de execução tendo em conta valores de N_{SPT} , para os diferentes sistemas de injeção e tipos de solos.

4.3 Metodologia para dimensionamento

Apresenta-se no Quadro 4.1 uma sequência das várias etapas e das principais atividades a desenvolver num projeto de *jet grouting*, após a identificação dos objetivos e finalidades da intervenção, tendo por base recomendações de projeto e execução prescritos na norma europeia EN 12716 (2001). É necessário assegurar que o projeto seja acompanhado de um rigoroso controlo de qualidade ao longo de todas as etapas.

Quadro 4.1 – Metodologia para dimensionamento da técnica de *jet grouting*.

<i>Etapa</i>	<i>Atividades</i>	Controlo de Qualidade
1	Realização de estudos geológico-geotécnico e identificação de condicionalismos	
2	Avaliação da aplicabilidade do uso de <i>jet grouting</i>	
3	Ações e combinações de ações	
4	Pré-dimensionamento da solução A. Sistema de <i>jet grouting</i> B. Diâmetro das colunas de <i>jet grouting</i> C. Parâmetros de execução D. Propriedades mecânicas dos elementos de <i>jet grouting</i>	
5	Realização de colunas de teste	
6	Dimensionamento da solução de <i>jet grouting</i> A. E.L.U. de capacidade de carga do terreno B. E.L.U. de resistência estrutural C. E.L.S. de assentamento axial	

Etapa 1 - Realização de estudos geológico-geotécnico e identificação de condicionalismos

Na fase inicial de um projeto de *jet grouting* devem ser realizadas investigações geotécnicas, de acordo com os requisitos e recomendações da NP EN 1997-1 (2010). As investigações procuram reconhecer as condições do subsolo e suas respectivas características geológicas-geotécnicas. Deverão ser realizados ensaios *in situ*, para o reconhecimento das propriedades mecânicas do terreno e caracterização da sua permeabilidade e ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas, para a determinação das características físicas e de deformabilidade do solo (nomeadamente a composição granulométrica e os limites de *Atterberg*) e a caracterização química do solo.

A caracterização geológica-geotécnica torna-se necessária num projeto de dimensionamento de *jet grouting*, uma vez que, é com base nos resultados experimentais, que se torna possível verificar a adequação da técnica ao solo, e confirmar a aptidão de sua aplicação. Portanto, uma investigação geológica-geotécnica inadequada pode resultar em erros de projeto, atrasos no cronograma da obra e emergir em custos adicionais devido a alterações construtivas no decorrer da obra.

Também devem ser avaliados os condicionalismos existentes no local de intervenção, relativamente às condições de implantação, à logística e as condições ambientais [22]. Devem ser avaliadas as condições do local de intervenção, as construções vizinhas, as condições do subsolo, as condições de acesso e condicionantes do espaço de intervenção, e também as condições ambientais, em particular na gestão do refluxo de calda [38].

Etapa 2 – Avaliação da aplicabilidade do uso de *jet grouting*

Deve-se proceder a uma análise de viabilidade técnica e económico-financeira do *jet grouting*, determinando a exequibilidade da obra perante os requisitos de projeto e estimando a relação custo/ benefício da execução.

O *jet grouting* caracteriza-se por ser uma técnica aplicável a uma ampla gama de solos, independentemente de sua granulometria ou permeabilidade. No entanto, por promover a erosão da estrutura natural do solo, através de jatos de elevadas pressões, a capacidade de desagregação do solo varia consoante a natureza do solo a tratar, influenciando na geometria final do elemento.

É possível observar na Figura 4.1 que os solos coesivos são mais difíceis de erodir do que os solos granulares. No entanto, o que se nota na prática é que a limitação da aplicação da técnica reside no aspeto financeiro, uma vez que, a velocidade de subida da vara de injeção deve ser tão pequena e/ou a quantidade de material passa a ser tão grande que o custo para se obter o elemento desejado se torna oneroso [27].

Etapa 4 - Pré-dimensionamento da solução

Após a caracterização geotécnica do terreno e confirmada a aptidão do uso de *jet grouting*, são estimadas as características geométricas e mecânicas requeridas dos elementos de *jet grouting* finais [23].

Nesta fase de projeto, são propostas diferentes soluções de dimensionamento, muitas vezes baseadas no conhecimento empírico. São definidos a geometria dos elementos (diâmetro, comprimento), a distribuição geométrica da solução a adotar (malha triangular ou quadrada), os parâmetros de execução e as propriedades mecânicas dos elementos. Cada uma das soluções deverá ser verificada em conformidade com os estados limite último e de serviço, devendo a solução ideal otimizar uma combinação de segurança, funcionalidade, economia e viabilidade [22].

São apresentados a seguir alguns dos conceitos e correlações para a definição dos diferentes parâmetros intervenientes no processo

A. Seleção do sistema de *jet grouting*

A seleção do sistema de injeção a utilizar é um dos primeiros parâmetros a ser escolhido no dimensionamento da técnica de *jet grouting*. Os principais fatores que orientam a decisão, são o tipo de solo e suas propriedades, e a energia de corte associada a cada sistema de injeção. Também, deve-se ter em conta os objetivos e requisitos do projeto e ainda, os aspetos económicos [30].

Estão disponíveis na literatura diversas correlações empíricas que ajudam na seleção do sistema de injeção a utilizar, com indicação dos limites de variação do diâmetro para diferentes tipos de solos. É possível observar na Figura 4.2 e Figura 4.3 na aplicabilidade dos três sistemas de *jet grouting* (simples, duplo e triplo) em solos coesivos e incoerentes em função dos valores de N_{SPT} . Nota-se que o diâmetro das colunas é superior em solos incoerentes para o mesmo valor de N_{SPT} , e que os maiores diâmetros são obtidos pelo sistema de *jet* triplo.

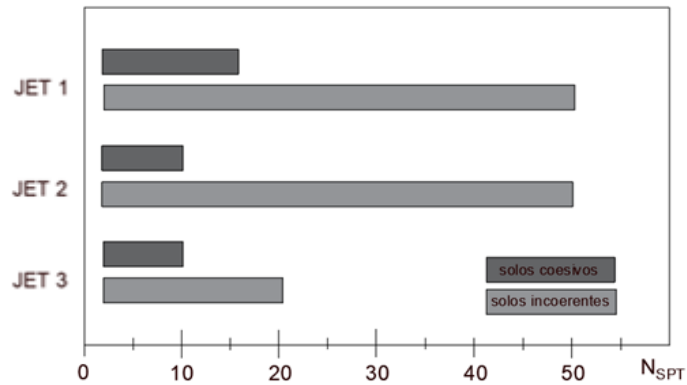


Figura 4.2 - Aplicabilidade dos sistemas de *jet grouting* em solos coesivos e incoerentes [30].

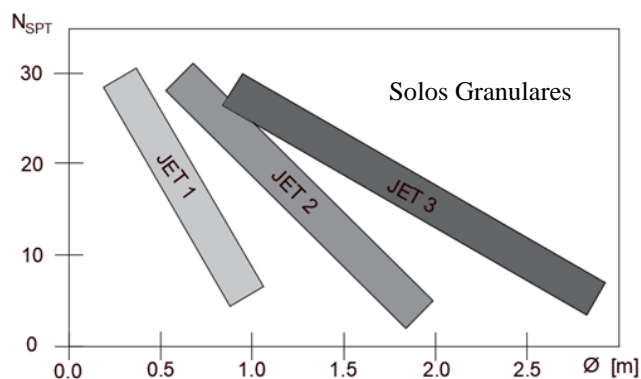


Figura 4.3 - Relação entre o diâmetro das colunas e o valor de NSPT para os diferentes sistemas de *jet grouting* [30].

B. Diâmetro das colunas de *jet grouting*

A definição do diâmetro efetivo das colunas de *jet grouting* é de difícil previsão teórica, uma vez que é influenciado por diversos fatores, nomeadamente, pelo tipo de solo e suas características iniciais, o sistema de injeção utilizado e os parâmetros de execução, entre os quais, a pressão de injeção e o caudal dos fluídos, número e diâmetro dos bocais, velocidade de elevação da vara e composição da calda [22, 27].

Existem inúmeras indicações na literatura que permitem estimar o diâmetro das colunas de *jet grouting*, e que podem ser úteis na fase de projeto, em que indicam valores de referência para os diferentes sistemas de injeção em função dos tipos de solos.

São apresentados na Figura 4.4 e Figura 4.5 valores de diâmetros para os solos incoerentes e coesivos, em função dos resultados de ensaio SPT, valores indicados por Carreto (2000) [3], que resultam da compilação divulgada na bibliografia de especialidade.

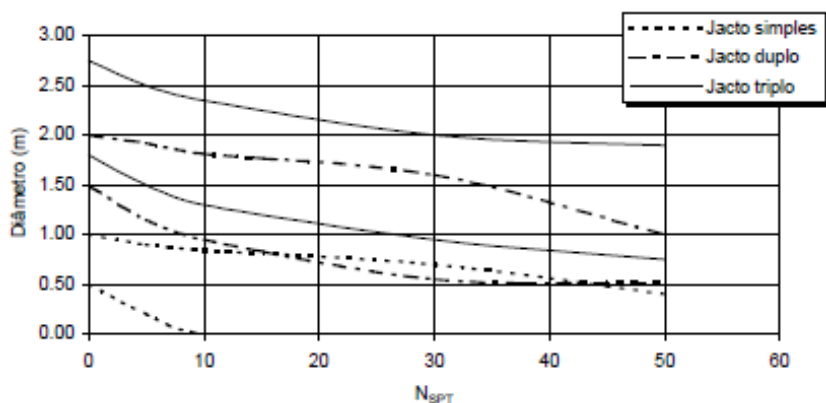


Figura 4.4 - Limites máximos e mínimos do diâmetro de colunas realizadas em solos incoerentes [3].

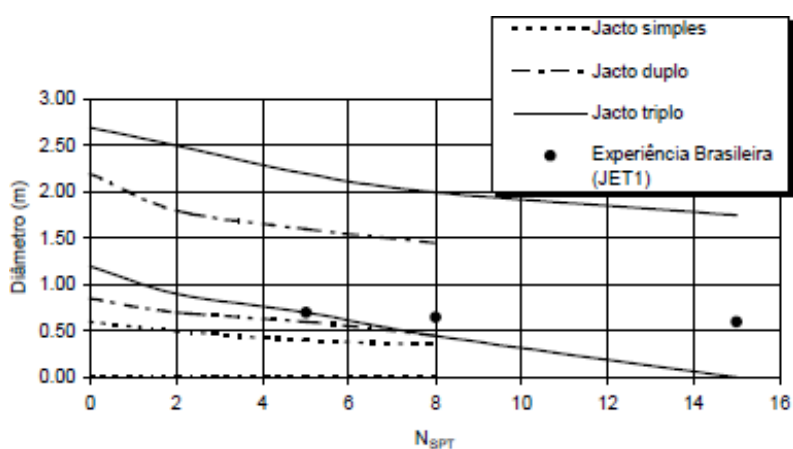


Figura 4.5 - Limites máximos e mínimos do diâmetro de colunas realizadas em solos coesivos [3].

Pela análise da Figura 4.4 e da Figura 4.5, verifica-se que o diâmetro das colunas realizadas em solos incoerentes é superior ao das colunas efetuadas em solos coesivos, para o mesmo valor de N_{SPT} e qualquer que seja o sistema de injeção utilizado.

No Quadro 4.2 são apresentados valores de diâmetros para os diferentes sistemas de *jet grouting* e para diferentes tipos de solos, fornecidos pela AGI (2012) [38] tendo em conta experiência com obras em que se utilizou esta técnica.

Quadro 4.2 - Diâmetro expectável das colunas em função do tipo de solo e do sistema de *jet*, sugeridos pela AGI (2012) (Adaptado [38])

AGI (2012)	Sistema	Diâmetros			
		Argila média consistente	Silte e argila pouco consistente	Areia siltosa	Areia e/ou seixo
	Jet Simples	S	0.4 a 0.8 m	0.6 a 1.0 m	0.6 a 1.2 m
	Jet Duplo	0.5 a 1.0 m	0.6 a 1.3 m	1.0 a 2.0 m	1.2 a 2.5 m
	Jet Triplo	0.8 a 1.5 m	1.0 a 1.8 m	1.2 a 2.5 m	1.5 a 3.0

S = não recomendado

Nota-se também que, o diâmetro das colunas aumenta em função do sistema de injeção utilizado, simples, duplo ou triplo ou outro de capacidade superior (Quadro 4.2) [23]. Também é possível notar uma relação entre o tipo de terreno, ou seja, a sua facilidade de desagregação, os valores de N_{SPT} e os diâmetros alcançáveis por cada sistema de injeção [23].

No entanto, os valores estimados dos diâmetros podem ser imprecisos, devendo, portanto, serem validados por meio de colunas de teste.

C. Parâmetros de execução

Após a caracterização geotécnica do subsolo e definido o sistema de *jet grouting* a adotar, são então estimados os parâmetros de execução capazes de atender aos requisitos de projeto [20]. Os parâmetros de execução são interdependentes, e têm grande influência sobre as características físicas e mecânicas do elemento final de *jet grouting*, nomeadamente, a pressão de injeção, a velocidade de rotação e subida da vara, o volume de calda injetado e o diâmetro dos injetores. A escolha desses parâmetros é feita de acordo com os resultados pretendidos, podendo ser estabelecidos com base nos valores disponibilizados na norma EN 12716 (2001), com valores de referência encontrados na bibliografia da especialidade ou desenvolvidos por empresas especializadas, e que serão posteriormente verificados através de colunas testes. Entretanto, os valores de referência estão sujeitos a alterações, a medida que os sistemas de injeção são otimizados.

Foram apresentados na Secção 3.3.2 limites máximos e mínimos dos valores dos parâmetros de execução usualmente adotados, indicados na bibliografia de especialidade.

D. Propriedades mecânicas dos elementos de *jet grouting*

Resistência à compressão

A resistência à compressão do material tratado é também condicionada pelo tipo de solo e as respectivas propriedades mecânicas, pelo sistema de injeção adotado e pela influência dos parâmetros de execução, nomeadamente, a pressão e o caudal de injeção, a velocidade de subida da vara e, especialmente, a relação a/c .

A relação de água/cimento utilizada varia, geralmente, entre 0.5 e 1.5, resultando em valores de resistência menores, quanto maior for a relação a/c , em qualquer tipo de solo e sistema de injeção empregue [5, 34].

No Quadro 4.3 apresentam-se valores indicativos de resistência à compressão simples, propostos por vários autores na bibliografia da especialidade, para diferentes tipos de solos. Nota-se que os valores apresentam diferenças substanciais de autor para autor, o que pode ocorrer devido ao tipo de solo, sistema de injeção e/ou da razão a/c utilizada.

Quadro 4.3 – Valores da resistência à compressão simples em função do tipo de solo (Adaptado [3, 27])

<i>Autor (Data)</i>	<i>Relação a/c</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>				
		<i>Tipo de Solo</i>				
		<i>Argila orgânica</i>	<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia</i>	<i>Cascalho</i>
<i>Welsh e Burke (1991)</i>	-	-	1 - 5	1 - 5	5 - 11	5 - 11
<i>Baumann et al. (1984)</i>	0.67	-	-	6 - 10	10 - 14	12 - 18
	1.0	-	-	3 - 5	5 - 7	6 - 10
<i>Paviani (1989)</i>	-	-	1 - 5	1 - 5	8 - 10	20 - 40
<i>Teixeira et al. (1987)</i>	0.8 – 1.0	0.5 - 2.5	-	-	-	-
	0.8 – 1.2	-	1.5 - 3.5	2 - 4.5	-	-
	0.8 – 1.5	-	-	-	2.5 - 8	-
<i>JJGA (1995)</i>	0.96 – 1.08	0.3	1	1 - 3	-	-
<i>Guatteri et al. (1994)</i>	-	-	0.5 - 4	1.5 - 5	3 - 8	-
<i>Kutzner (1996)</i>	0.67 – 1.0	≤ 3	≤ 12	≤ 12	≤ 15	≤ 20

Na Figura 4.6 apresentam-se a relação entre valores estimados de resistência à compressão simples e a dosagem de cimento utilizada, para cada tipo de solo. Nota-se que os valores de resistência à compressão aumentam em função da dosagem de cimento, e que os solos de granulometria mais grosseira apresentam valores mais elevados de resistência à compressão.

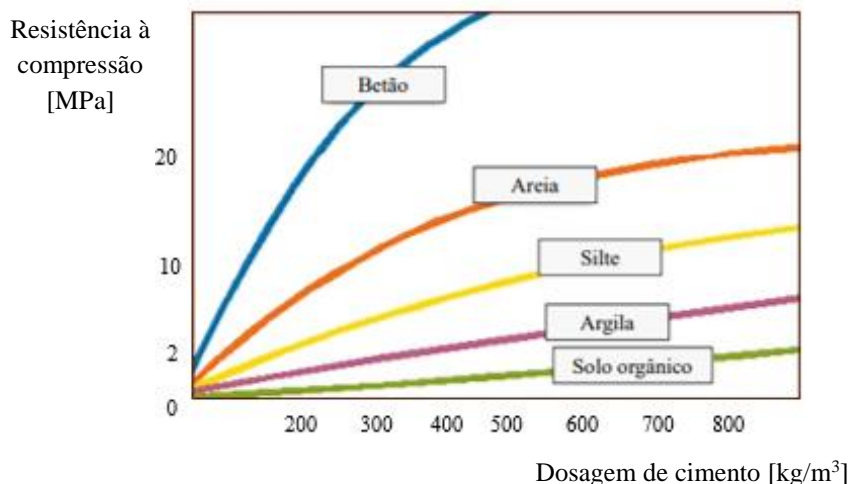


Figura 4.6 – Resistência à compressão em função da dosagem de cimento [44]

Resistência à tração

Os elementos de *jet grouting* apresentam reduzida resistência à tração, sendo normalmente adotadas em situações em que as colunas trabalham preferencialmente à compressão. No entanto, em situações em que se prevê esforços de tração, as colunas podem ser reforçadas com elementos metálicos, tais como, varões de aço, perfis metálicos e microestacas.

No Quadro 4.4 apresentam-se alguns valores de referência da variação da resistência à tração, para diferentes tipos de solos.

Quadro 4.4 – Valores da resistência à tração simples em função do tipo de solo (Adaptado [34]).

<i>Autor (Data)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>			
	<i>Tipo de Solo</i>			
	<i>Argila orgânica</i>	<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia</i>
<i>Guatteri e Teixeira (1987)</i>	-	0.20 – 0.50	0.20 – 0.50	0.20 – 0.65
<i>JJGA (1995)</i>	0.07	0.20	-	0.13 – 0.33

Em situações de projeto, é usual recorrer-se a valores de resistência à tração de materiais tratados com *jet grouting* na ordem de 10% a 30% da sua resistência à compressão simples, para o dimensionamento da solução [27, 34].

Resistência ao corte

A resistência ao corte de elementos de *jet grouting* é geralmente assumida como 10% a 15% da sua resistência à compressão simples [28]. No entanto, são apresentados em

Xanthakos *et al.* (1994) [28], valores na ordem dos 0.5 MPa para solos granulares e 0.3 MPa para solos coesivos [28].

Módulo de deformabilidade

Os valores do módulo de deformabilidade são também caracterizados por apresentam uma grande dispersão, como é possível observar na Quadro 4.5, onde constam valores constantes na bibliografia, em função do tipo de solo.

Quadro 4.5 – Módulo de deformabilidade em função do tipo de solo, constantes na literatura [34]

<i>Autor (Data)</i>	<i>Módulo de deformabilidade (MPa)</i>			
	<i>Tipo de Solo</i>			
	<i>Orgânicos</i>	<i>Areias</i>	<i>Siltes</i>	<i>Argilas</i>
<i>Welsh and Burke (1991) *</i>	-	100	-	500
<i>JJGA (1995)</i>	30	100	-	100 - 300
<i>Kaidussis e G. de Tejada (2000)</i>		7 - 12	4.5 - 7	2.5 - 4
* Sistema de <i>jet</i> triplo				

Coefficiente de permeabilidade

A permeabilidade dos elementos de *jet grouting* é geralmente muito reduzida, apresentando valores na ordem dos 10^{-7} a 10^{-11} m/s, para qualquer tipo de solo [3].

No entanto, como a técnica de *jet grouting* apresenta várias aplicações em cortinas de estanquidade, constata-se que na prática, a verticalidade das colunas executadas com a função de parede de vedação é muito mais importante do que o valor da permeabilidade do material tratado. Uma vez que, um controlo ineficiente da verticalidade poderá resultar em espaçamentos indesejados entre as colunas, com a percolação de água entre elas [3, 27].

Etapa 4 – Testes de campo

De acordo com a norma europeia EN 12716 (2001), quando uma experiência comparável não estiver disponível deve-se proceder à realização de colunas de teste, antes do início dos trabalhos, num local próximo e/ ou num contexto geotécnico representativo do local de execução dos elementos de *jet grouting*, a fim de aferir e/ou otimizar as várias considerações de projeto.

São realizadas colunas de teste, conforme representadas na Figura 4.7, com os mesmos parâmetros definidos em projeto (e.g relação a/c, pressão de injeção, velocidade de rotação e ascensão da vara, etc.), a fim de:

- possibilitar a seleção dos parâmetros de tratamento e do sistema de injeção mais adequados para a obtenção do diâmetro de coluna especificado;
- avaliar as características geométricas e mecânicas das colunas em relação aos parâmetros definidos em projeto;
- testar o sistema de monitorização a ser implementado durante a fase de construção;
- medir a eficácia do retorno do material de refluxo;
- verificar os efeitos do tratamento no solo em estruturas adjacentes e fornecer informações acerca dos custos de execução.



Figura 4.7 – Colunas de teste de *jet grouting* [45].

Após a construção das colunas de teste, a norma EN 12716 (2001) recomenda que sejam recolhidas amostras de material de refluxo para que sejam submetidas a ensaios de compressão em laboratório.

Após o período de cura deve-se proceder à escavação das colunas de teste, para a avaliação das propriedades geométricas (geralmente, o diâmetro da coluna) por meio de inspeção visual e direta dos elementos expostos, como é possível observar na Figura 4.8 e na Figura 4.9. A escavação é o método mais preciso, no entanto só pode ser usado a pequenas profundidades ou em locais onde as condições permitem tais obras [35]. É geralmente aconselhável escavar os elementos de *jet grouting* que não estejam em contacto umas com as outras ou sobrepostos, permitindo medir avaliar com maior precisão a sua geometria e também verificar a forma do elemento construído [35].



Figura 4.8 - Exposição das colunas de teste de *jet grouting* [46]



Figura 4.9 - Medição do diâmetro da coluna de teste de *jet grouting* [35]

São também recolhidos provetes (cilíndricos) das colunas de teste, sobre os quais são realizados ensaios laboratoriais para a verificação das características mecânicas dos elementos de *jet grouting*, tais como a resistência, deformabilidade ou permeabilidade, definidos em projeto.

Nos casos em que não é possível proceder à exposição dos elementos de *jet grouting*, a avaliação dos resultados pode ser feita pela realização de carotagem ou através de técnicas de medições indiretas, como os métodos geofísicos, tais como: *cross-hole*, tomografia sónica, métodos sísmicos, e a utilização de georadar [20, 23].

Etapa 5 – Dimensionamento

O dimensionamento de elementos de *jet grouting* realiza-se de forma idêntica a metodologia aplicada às fundações profundas por estacas ou microestacas. O mecanismo de transferência de carga entre o elemento estrutural e o terreno envolvente, ocorre maioritariamente por resistência lateral e parcialmente por resistência de ponta.

4.4 Dimensionamento

O dimensionamento de elementos de *jet grouting* é realizado através da verificação aos Estados Limite Últimos (E.L.U), estados limites de resistência estrutural (STR) ou de rotura do terreno (GEO), e aos Estados Limites de Serviço (E.L.S) relativamente aos assentamentos axiais e deslocamentos transversais.

No presente capítulo são apresentados modelos de cálculo para o dimensionamento de *jet grouting*, baseados em publicações de Bustamante (2012) [47] e em expressões da norma europeia EN 1997-1 (2010) para o projeto geotécnico e na norma EN 1994-1 (2004) [48] para o projeto de estruturas mistas aço-betão.

O método proposto por Bustamante o dimensionamento é realizado com base no método dos coeficientes globais de segurança e o método proposto pelo Eurocódigo 7 (2010) é baseado no método dos coeficientes parciais de segurança.

4.4.1 Dimensionamento geotécnico – E.L.U.

- **Método de Bustamante (2002)**

Bustamante (2002) apresentou um método simples para determinar a capacidade resistente de uma coluna de *jet grouting* submetida a cargas axiais de compressão ou tração, baseando-se em ensaios de carga estáticos.

Foram realizados vários ensaios à escala real em parceria com o LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), entre os anos de 1980 e 2000, em diferentes tipos de solos, permitindo a elaboração do método de cálculo proposto pelo autor. Com base no estudo efetuado o autor sustenta que a transferência de carga entre uma coluna de *jet grouting* e o terreno ocorre maioritariamente por atrito lateral e parcialmente por resistência de ponta, o que demonstra que uma coluna de *jet grouting* funciona de forma idêntica a uma fundação profunda [47].

1. Capacidade resistente do terreno para *jet grouting* a carregamento axial

A verificação da segurança em relação ao E.L.U. de colunas de *jet grouting* à compressão é verificada pela seguinte expressão, (4.1):

$$Q_{apl} \leq Q_{adm} \quad (4.1)$$

em que

Q_{apl} - carga aplicada

Q_{adm} - capacidade de carga admissível

A resistência última do terreno à compressão, Q_u , é definida pela soma de duas parcelas: i) resistência por atrito lateral $Q_{u,L}$; e ii) resistência de ponta $Q_{u,P}$. A capacidade de carga de uma coluna de *jet grouting* à compressão, é calculada pela seguinte expressão, (4.2):

$$Q_u = Q_{u,L} + Q_{u,P} \quad (4.2)$$

em que:

$Q_{u,L}$ - resistência por atrito lateral;

$Q_{u,P}$ - resistência na ponta.

Os parâmetros $Q_{u,L}$ e $Q_{u,P}$ são determinados pelas seguintes expressões, (4.3) e (4.4):

$$Q_{u,L} = \sum \pi \times D_i \times l_i \times q_{si} \quad (4.3)$$

$$Q_{u,P} = S_p \times k_s \times C_s \quad (4.4)$$

em que:

S_p - área da base da coluna;

k_s - fator de capacidade de carga na base;

C_s - compacidade do solo na base (obtido através de ensaios de PMT, CPT ou SPT);

D_i - diâmetro da coluna;

l_i - comprimento da coluna no estrato i ;

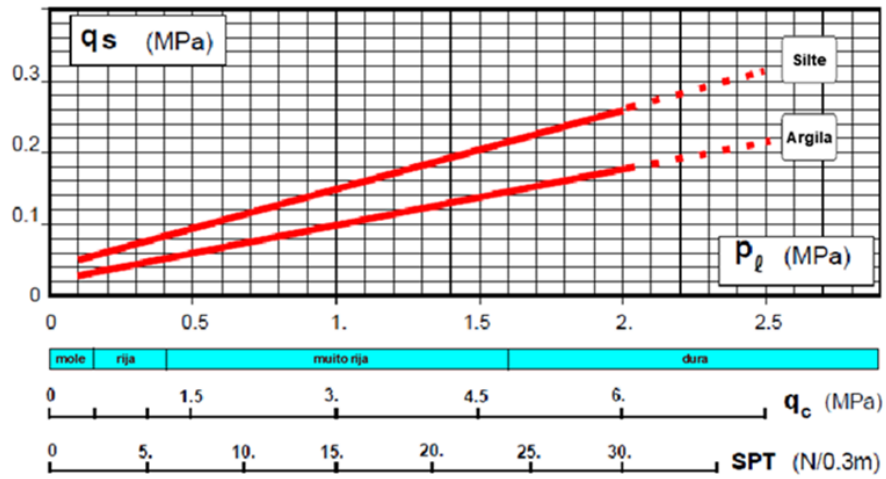
q_{si} - atrito lateral unitário entre a coluna e o solo, no estrato i .

O fator de capacidade de carga k_s , é um parâmetro empírico e adimensional, que depende do tipo de ensaio *in situ* utilizado, PMT, CPT ou SPT, sendo designado, respetivamente, de k_p , k_c e k_N . Para determinar os valores do fator de capacidade de carga k_s recorre-se ao Quadro 4.6, que relaciona este parâmetro com o tipo de solo e o tipo de ensaio efetuado *in situ*.

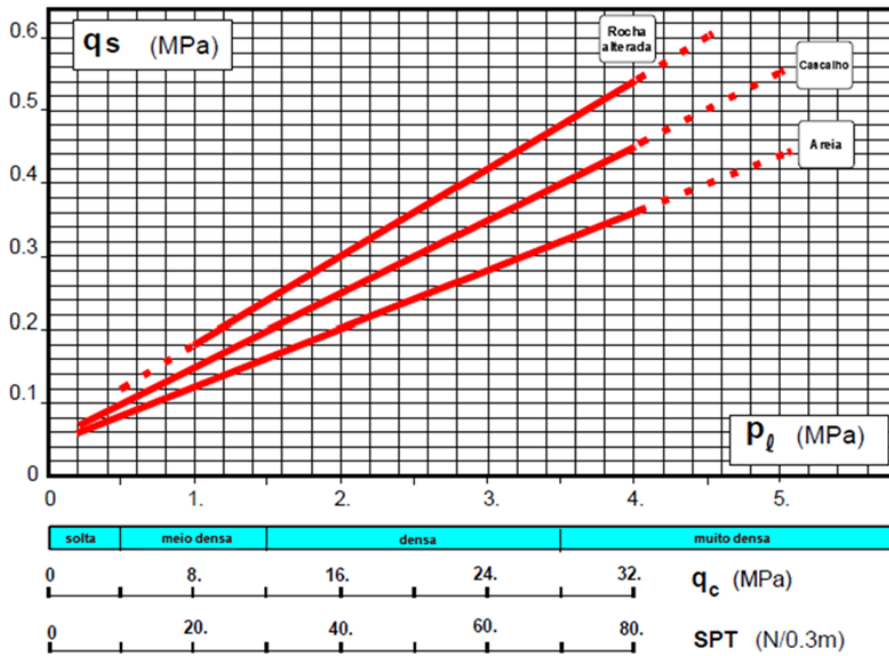
Quadro 4.6 – Fator de capacidade de carga (Adaptado [47])

Tipo de solo	k_p	k_c	k_N
Argila	1.6	0.4 – 0.6	0.1
Silte	1.4	0.3 – 0.5	0.1
Areia	1.2	0.15 – 0.3	0.06
Cascalho	1.2	0.25	0.06
Calcite	1.3	0.3 – 0.4	0.1 – 0.2
Marga	1.6	0.5	0.08
Calcário margoso	1.3	-	-
Rocha alterada	1.5	-	-

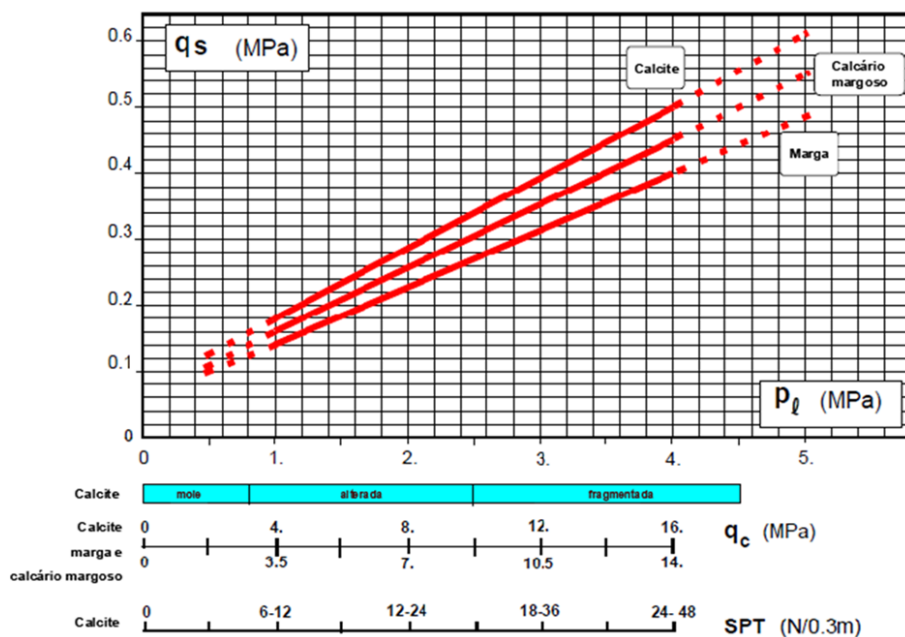
O valor do atrito lateral q_{si} , pode ser obtido por correlações empíricas com base nos resultados dos ensaios PMT, CPT ou SPT, em função do tipo de solo, como é ilustrado nos abacos da Figura 4.10.



a) Argila e silte (Adaptado [47])



b) Areia, cascalho e rocha alterada (Adaptado [47])



c) Calcite, calcário margoso e marga (Adaptado [47])

Figura 4.10 - Valores do atrito lateral, q_{si} , para vários tipos de terreno, de acordo com Bustamante (Adaptado [47])

2. Carga admissível

A carga admissível é obtida com a aplicação de coeficientes de segurança F_j em relação à resistência última, Q_u . São admitidos coeficientes de segurança diferentes para o atrito lateral e o de ponta. Obtêm-se a carga admissível do terreno, genericamente, pela seguinte expressão, (4.5):

$$Q_{adm} = \frac{Q_{u,P}}{F_{j,P}} + \frac{Q_{u,S}}{F_{j,S}} \quad (4.5)$$

em que, $F_{j,P}$, $F_{j,S}$ correspondem aos fatores de segurança parciais relativos à capacidade resistente de ponta e lateral, apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Coeficientes de segurança para as capacidades resistentes (Adaptado [47])

Capacidade resistente	Símbolo	Coefficiente de segurança
Ponta (compressão)	$F_{j,P}$	2
Lateral (compressão)	$F_{j,S}$	2.5 (até 3 m de profundidade)
		2.0 (> 3 m de profundidade)
Lateral (tração)	$F_{j,T}$	3.0 (até 3 m de profundidade)
		2.75 (> 3 m de profundidade)

- **Norma europeia NP EN 1997-1**

O Eurocódigo 7 (2010) apresenta prescrições para projetos de estruturas geotécnicas, de elementos geotécnicos sujeitos às ações geotécnicas ou que tenham uma relação com a resistência e com a deformabilidade do terreno. Não apresenta, no entanto, regras gerais para o dimensionamento para injeções. Com base nas prescrições desta norma para o dimensionamento de estacas é necessário fazer a verificação da segurança em relação aos estados limites de rotura geotécnica (capacidade resistente do terreno à compressão ou à tração) e de rotura estrutural. O dimensionamento aqui proposto é baseado nas prescrições para estacas propostas na norma europeia. Os coeficientes parciais e coeficientes de modelo a adotar no *jet grouting* serão diferentes dos propostos para estacas.

De acordo com o Anexo Nacional (NA) a Abordagem de Cálculo (AC) adotada é a AC 1, que inclui duas combinações de conjuntos de coeficientes parciais:

Combinação 1: A1 “+” M1 “+” R1

Combinação 2: A1 “+” (M1 ou M2) “+” R4

1. Capacidade resistente do terreno para colunas de *jet grouting* à compressão

A verificação da segurança em relação ao E.L.U. de colunas de *jet grouting* à compressão é verificada pela seguinte expressão (4.6):

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (4.6)$$

em que, $F_{c;d}$ corresponde ao valor de cálculo da carga axial de compressão e $R_{c;d}$ ao valor de cálculo da capacidade resistente à compressão do terreno.

a) Capacidade resistente à compressão obtida por ensaios de carga estática

O valor característico da capacidade do terreno para *jet grouting* à compressão, $R_{c;k}$, é determinado pela soma de duas parcelas correspondentes à resistência por atrito lateral, $R_{s;k}$ e a resistência na ponta $R_{b;k}$, e pode ser calculado pela seguinte expressão, (4.7):

$$R_{c;k} = R_{s;k} + R_{b;k} \quad (4.7)$$

O valor de cálculo da capacidade resistente do terreno, $R_{c;d}$, é obtido através de uma das seguintes expressões, (4.8) ou (4.9):

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (4.8)$$

em que, γ_t é o coeficiente de segurança parcial relativamente à capacidade resistente total da coluna de *jet grouting*.

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (4.9)$$

em que $R_{b;k}$ é o valor característico da capacidade resistente de ponta, $R_{s;k}$ é o valor característico da capacidade resistente lateral, e γ_b e γ_s são, respetivamente, os coeficientes parciais de segurança relativos às capacidades resistentes de ponta e lateral.

Tendo em conta a Abordagem de Cálculo 1, considera-se os seguintes coeficientes parciais para as capacidades resistentes, γ_R , que são propostos pelo EC7 para estacas e apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Coeficientes parciais para as capacidades resistentes [6][6]

Capacidade resistente	Símbolo	Coeficiente de segurança	
		R1	R4
Ponta	γ_b	1.1	1.6
Lateral (compressão)	γ_s	1.0	1.3
Lateral (tração)	$\gamma_{s;t}$	1.25	1.6

Tendo em conta os resultados dos ensaios de carga estática, o valor $R_{c;k}$ é determinado pela seguinte expressão, (4.10):

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(\mathbf{R}_{c;m})_{mean}}{\xi_1}, \frac{(\mathbf{R}_{c;m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (4.10)$$

em que ξ_1 e ξ_2 são coeficientes de correlação cujo valor depende do número de estacas ensaiadas e que são aplicados, respetivamente, ao valor médio $(\mathbf{R}_{c;m})_{mean}$ e ao valor mínimo $(\mathbf{R}_{c;m})_{min}$ de $\mathbf{R}_{c;m}$.

Os valores dos coeficientes de correlação, ξ_1 e ξ_2 , apresentados no Quadro 4.9 são para avaliar os resultados de ensaios de carga estática em estacas, no entanto, como referido

anteriormente, o Eurocódigo 7 (2010) não apresenta prescrições para o dimensionamento de técnicas de injeções, aplica-se esses coeficientes.

Quadro 4.9 - Coeficientes de correlação ξ para a determinação de valores característicos a partir dos ensaios de carga estática de estacas (n – número de estacas ensaiadas) [6]

ξ para n	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,35	1,33	1,31	1,30
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

b) Capacidade resistente à compressão obtida com base nos parâmetros resistentes do terreno

A capacidade resistente do terreno para *jet grouting* à compressão, R_c , é obtido por ensaios de caracterização do terreno. É utilizado um coeficiente de modelo, $\gamma_{R;d} = 1.5$, de modo a garantir que a capacidade resistente calculada seja suficientemente segura.

O valor de cálculo da capacidade resistente do terreno, $R_{c;d}$, é obtido através da seguinte expressão, (4.11):

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d} \quad (4.11)$$

em que o valor de cálculo das capacidades resistentes na ponta e lateral, $R_{b;d}$, e $R_{s;d}$ são obtidos através das seguintes expressões, (4.12) e (4.13):

$$R_{b;d} = \frac{R_{b;k}}{(\gamma_b; \gamma_{R;d})} \quad (4.12)$$

$$R_{s;d} = \frac{R_{s;k}}{(\gamma_s; \gamma_{R;d})} \quad (4.13)$$

Tendo em conta a Abordagem de Cálculo 1, considera-se os seguintes coeficientes parciais para as capacidades resistentes, γ_R , no Quadro 4.8 para o *jet grouting*, baseando-se nos valores dos coeficientes prescritos para as estacas:

Os valores característicos das capacidades resistentes na ponta e lateral, $R_{b;k}$ e $R_{s;k}$ são obtidos através de uma das seguintes expressões, (4.14) ou (4.15):

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{\text{médio}}}{\xi_3}; \frac{(R_{c;cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\} \quad (4.14)$$

em que ξ_3 e ξ_4 são coeficientes de correlação que dependem do número n de perfis de ensaios, aplicados, respetivamente aos:

valores médios $(R_{c;cal})_{\text{mean}} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{\text{mean}} = (R_{b;cal})_{\text{mean}} + (R_{s;cal})_{\text{mean}}$

valores mínimos $(R_{c;cal})_{\text{min}} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{\text{min}}$

Os valores dos coeficientes de correlação, ξ_3 e ξ_4 , apresentados no Quadro 4.10 são para determinar a capacidade resistente de estacas a partir de ensaios do terreno, uma vez que, como referido anteriormente, o Eurocódigo 7 (2010) não apresenta prescrições para o dimensionamento de técnicas de injeções.

Quadro 4.10 - Coeficientes de correlação ξ para a determinação de valores característicos a partir de ensaios do terreno (n – número de perfis ensaiadas) [6]

ξ para n	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
ξ_4	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

$$\begin{cases} R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k}; q_{b;k} = (c \cdot N_c + q \cdot N_q) \cdot A_b \\ R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \end{cases} \quad (4.15)$$

em que $q_{b;k}$ e $q_{s;i;k}$ são respetivamente os valores característicos da capacidade resistente na ponta e lateral, por unidade de área, no estrato i.

2. Capacidade resistente do terreno para colunas de *jet grouting* à tração

A verificação da segurança em relação ao E.L.U. de colunas de *jet grouting* à tração é verificada pela seguinte expressão, (4.16):

$$F_{t,d} \leq R_{t,d} \quad (4.16)$$

em que, $F_{t,d}$ corresponde ao valor de cálculo da carga axial de tração e $R_{t,d}$ ao valor de cálculo da capacidade resistente à tração do terreno.

a) Capacidade resistente à tração obtida por ensaios de carga estática

O valor de cálculo da capacidade resistente à tração, $R_{t,d}$, é obtido pela seguinte expressão, (4.17):

$$R_{t,d} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s;t}} \quad (4.17)$$

em que, $R_{t,k}$ corresponde ao valor característico da capacidade resistente à tração e $\gamma_{s;t}$ é o coeficiente de segurança parcial relativamente à capacidade resistente à tração.

Tendo em conta a Abordagem de Cálculo 1, considera-se os seguintes coeficientes parciais para as capacidades resistentes, γ_R , no Quadro 4.8 para o *jet grouting*, baseando-se nos valores dos coeficientes prescritos para as estacas:

O valor característico da capacidade resistente à tração, é obtida através da seguinte expressão, (4.18):

$$R_{t,k} = \min \left\{ \frac{(R_{t,m})_{mean}}{\xi_1}, \frac{(R_{t,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (4.18)$$

em que ξ_1 e ξ_2 são coeficientes de correlação cujo valor depende do número de estacas ensaiadas, n , aplicados respetivamente, ao valor médio $(R_{t,m})_{mean}$ e ao valor mínimo $(R_{t,m})_{min}$.

Os valores dos coeficientes de correlação, ξ_3 e ξ_4 , apresentados no Quadro 4.10 são para determinar a capacidade resistente de estacas a partir de ensaios do terreno, uma vez que, como referido anteriormente, o Eurocódigo 7 (2010) não apresenta prescrições para o dimensionamento de técnicas de injeções.

b) Capacidade resistente à tração obtida com base nos parâmetros resistentes do terreno

A capacidade resistente do terreno para *jet grouting* à tração, R_t , é obtido por ensaios de caracterização do terreno. É também aplicado um coeficiente de modelo, $\gamma_{R;d} = 1.5$.

O valor de cálculo da capacidade resistente do terreno, $R_{t;d}$, é obtido através da seguinte expressão, (4.19):

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{(\gamma_{s;t} \cdot \gamma_{R;d})} \quad (4.19)$$

em que:

$$R_{t;k} = R_{s;k} \quad (4.20)$$

E que o valor característico da capacidade resistente à tração, $R_{t;k}$ é obtido através de uma das seguintes expressões, (4.21) ou (4.22):

$$R_{t;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{s;cal})_{\text{médio}}}{\xi_3} ; \frac{(R_{s;cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\} \quad (4.21)$$

em que ξ_3 e ξ_4 são coeficientes de correlação que dependem do número de perfis de ensaios, n, e são aplicados, respetivamente, ao valor médio $(R_{s;cal})_{\text{mean}}$ e ao valor mínimo $(R_{s;cal})_{\text{min}}$.

$$R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \quad (4.22)$$

em que $q_{s;i;k}$ são os valores característicos da capacidade resistente lateral, por unidade de área, no estrato i.

De acordo com o relatório apresentado em 2016 pela instituição *Cellule Ingénierie Géotechnique* [49] referente a um projeto de reforço das fundações de um igreja com a utilização de *jet grouting* em que foi proposto um dimensionamento com base nas prescrições da norma francesa NF P 94-262 (2012) e do Eurocódigo 7. São propostos para os coeficientes parciais da resistência de ponta e de atrito lateral de 1.1, e de coeficientes de modelo $\gamma_{R;d} = 1.27$ (1.15x1.1). No entanto a mesma norma refere que no caso de microestacas deve ser utilizado um coeficiente de modelo de 2 tendo em conta a reduzida base de dados relativamente a ensaios realizados. Esta consideração pode ser também adotada para o caso do *jet grouting*. Neste contexto se forem adotados coeficientes de modelo de 2.0 e para os parâmetros de resistência do terreno de 1.1 para compressão e 1.4 para tração resultando em coeficientes globais de 2.2 para a compressão e 2.8 para tração, valores muito próximos dos coeficientes propostos por Bustamante e apresentados no Quadro 4.7 da secção anterior.

4.4.2 Dimensionamento estrutural – E.L.U.

Tal como referido anteriormente, as colunas de *jet grouting* apresentam baixa resistência à tração, sendo dimensionadas geralmente à compressão. No entanto, quando se prevê que a coluna vai ter que resistir à tração, a solução consiste na introdução de elementos de reforço metálicos (e.g. tubos, varões, perfis) logo após a fase de injeção.

- **Método de Bustamante (2002)**

A resistência estrutural à compressão da coluna de *jet grouting* é calculada pela seguinte expressão:

$$Q_{u,int} = S_p \times R_{c,j} \quad (4.15)$$

em que:

S_p - área da base da coluna;

$R_{c,j}$ - resistência à compressão de uma coluna de *jet grouting*.

A resistência à tração de coluna de *jet grouting* é calculada pela seguinte expressão:

$$T_u = Q_{u,s} \quad (4.16)$$

em que:

$Q_{u,S}$ - resistência por atrito lateral;

T_u - tração limite na cabeça da coluna de *jet grouting*.

A carga admissível da resistência estrutural da coluna de *jet grouting*, obtêm-se pelas seguintes expressões:

$$Q_{\text{int,adm}} \leq S_p \times \frac{R_{c,j}}{F_{j,\text{int}}} \quad (4.17)$$

$$T_{u,\text{adm}} = \frac{Q_{u,S}}{F_{j,T}} \quad (4.18)$$

em que, o fator de segurança $F_{j,\text{int}} = 3$, podendo admitir valores de 2.5 ou 2 se justificado por testes apropriados, e o $F_{j,T}$ corresponde aos fator de segurança parcial relativo à capacidade lateral, apresentados no Quadro 4.7.

- **Norma europeia NP EN 1997-1**

Resistência à compressão

A resistência à compressão de uma coluna de *jet grouting* pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$N_{\text{pl,Rd}} = 0.85 \times A_c \times f_{cd} + A_s \times f_{yd} \quad (4.19)$$

Resistência à tração

A resistência à tração de uma coluna de *jet grouting* é dada pela seguinte fórmula:

$$N_{t,Rd} = A_s \times f_{yd} \quad (4.20)$$

em que:

$N_{\text{pl,Rd}}$ - resistência plástica da secção à compressão;

A_c - área da secção da calda;

A_s - área da secção do tubo metálico;

f_{cd} - valor de cálculo da resistência à compressão da calda;

f_{yd} - valor de cálculo da resistência à tração do tubo metálico/ tensão resistente do betão e à tensão de cedência do aço.

4.4.3 Deformação axial – E.L.S.

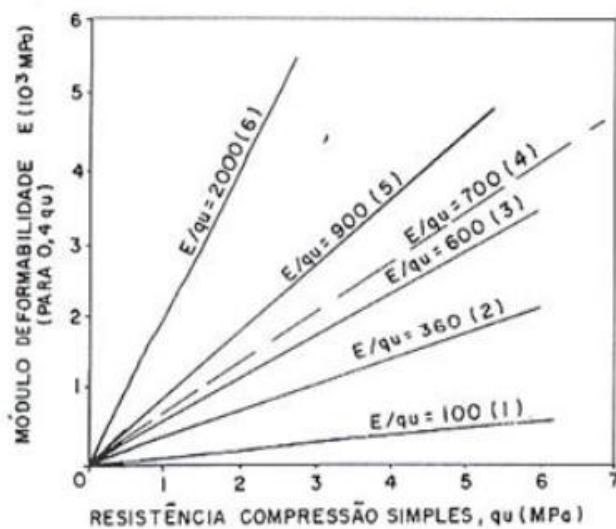
No que diz respeito à verificação aos estados limites últimos, as colunas de *jet grouting* são tratadas como estacas, considerando essencialmente a deformação axial elástica, determinada pela seguinte expressão:

$$\Delta_{el} = \frac{NL}{EA} \quad (4.21)$$

em que N corresponde ao carregamento axial atuante, L ao comprimento da coluna e EA a rigidez axial.

A deformabilidade dos elementos de *jet grouting* está intrinsecamente relacionada com a dosagem de cimento utilizada na mistura da calda, que por sua vez se relaciona com a resistência à compressão simples, conforme representado, anteriormente, na Figura 4.6.

O gráfico da Figura 4.11 apresenta algumas propostas de diferentes autores, que correlaciona a resistência à compressão com o módulo de deformabilidade das colunas de *jet grouting*.



- (1) Recomendação JJGA para todos os solos.
- (2) Lunordi, Mongilardi e Tornaghi -1986 areia fina e média (Ródio-Itália).
- (3) Paoli, et *all.*, 1989-solo tufo (Ródio-Itália).
- (4) Novatecna, 1994 -solo massapé (argila siltosa expansiva) - 2 provas de cargas na coluna (para carga limite).
- (5) Lunordi, Mongilardi e Tornaghi, 1986- cascalho com areia Ródio-Itália.)
- (6) Novatecna, 1994 -solo massapé (argila siltosa expansiva) - 2 provas de cargas na coluna (para 0,4 de carga limite).

Figura 4.11 – Relação entre o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples [44].

4.4.4 Notas Finais

O dimensionamento de colunas de *jet grouting* tem de ter em conta os parâmetros de controlo definidos na secção 3.3 deste trabalho. Os parâmetros fundamentais a definir são o diâmetro das colunas ou da geometria de outros elementos executados com *jet grouting* (ex. paredes) e a sua resistência à compressão ou à tração.

O dimensionamento e a verificação da segurança aos Estados Limites podem ser feitos com base nos resultados de ensaios ou a partir dos parâmetros de resistência do terreno, método preconizado pelo Eurocódigo 7 (2010), ou no caso do método proposto por Bustamante a partir de correlações empíricas obtidas do registo e análise de resultados de vários casos de obras executadas, ou da instrumentação, com a técnica do *jet grouting*.

O método que tem sido mais utilizado é o Método de Bustamante já validado num número significativo de obras. Atualmente não existem prescrições para o dimensionamento nas normas europeias. Apenas a norma EN 12716 (2001) estabelece princípios de execução, testes e monitorização dos trabalhos de *jet grouting*, mas mais focada no processo de execução destes elementos.

No método proposto por Bustamante são considerados coeficientes de segurança para ter em conta a variabilidade do método e no número de ensaios realizados. Os coeficientes variam desde 2, para a resistência de ponta, a 3 para a resistência por atrito lateral em elementos tracionados. No caso do Eurocódigo 7, e para a Abordagem de Cálculo 1 adotada por Portugal, são propostos coeficientes de segurança para os valores médios da resistência obtida em ensaios de carga estáticos e coeficientes de segurança para a resistência de ponta ($\gamma_{b;d} = 1.1 - 1.6$) e para a resistência por atrito lateral ($\gamma_{s;d} = 1.0 - 1.6$) quando a resistência é obtida com base nos resultados de ensaios ou com base nos parâmetros de resistência do terreno. Nesta última situação também é proposto um coeficiente de modelo ($\gamma_{R;d} = 1.5$). Considerando estes dois coeficientes teríamos um coeficiente global a variar entre 1.65 e 2.4. Estes valores são inferiores aos do método proposto por Bustamante.

No entanto, independentemente do método utilizado é necessário a realização de ensaios teste. As colunas de ensaio devem ter as mesmas características das colunas a executar e serem executadas no mesmo estrato. Com base nos resultados obtidos nos ensaios é possível avaliar os parâmetros fundamentais e validar ou retificar o dimensionamento realizado em fase de projeto.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Síntese das Principais Conclusões

No presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo deste estudo, e são ainda apresentadas sugestões de futuros trabalhos de investigação a desenvolver.

Foi abordada na presente dissertação a temática das técnicas de injeção de melhoramento dos solos, focando-se no estudo do *jet grouting*,

Como referido no decorrer da elaboração do trabalho, o *jet grouting* trata-se de uma técnica muito versátil e competitiva, aplicável a uma extensa gama de solos, podendo ser integrada numa grande diversidade de situações de aplicação, em diferentes contextos geotécnicos e locais de intervenção. No entanto, o processo de execução da técnica exige um controlo de execução rigoroso, garantido assim, que se alcance os resultados esperados.

No que toca ao dimensionamento da técnica, e conforme foi possível observar ao longo do trabalho, é muitas vezes elaborado com bases empíricas, derivadas de experiências anteriores, uma vez que, a regulamentação atual não apresenta regras para o respetivo dimensionamento. São muitas vezes adotados modelos de cálculo que se baseiam na execução de ensaios de carga, como é o caso do método de Bustamante (2012), referido no trabalho, ou então, cabe aos projetistas adequar as metodologias existentes na regulamentação, aos elementos de *jet grouting*. Sendo o método de Bustamante é um dos modelos de dimensionamento mais divulgados por ser validado por resultados de vários ensaios de carga

Foi proposto, anteriormente, o dimensionamento de elementos de *jet grouting* com base nas prescrições do Eurocódigo 7 (2001) para as estacas, onde procurou-se efetuar a verificação de segurança aos respetivos Estados Limites. Não há no Eurocódigo 7 (2001) prescrições para técnicas injeção devendo ser incluídos coeficientes parciais.

É também importante referir que a realização de ensaios de carga é de extrema importância para comprovar o desempenho das colunas de *jet grouting*, verificar sua capacidade resistente e assegurar que se adequam as soluções para as quais são executadas.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se o estudo mais aprofundado do dimensionamento de *jet grouting*, no que diz respeito à modelação numérica, permitido assim averiguar a interação entre o elemento de *jet* e o terreno.

Criar uma base de dados mais alargada que permita a definição de coeficientes parciais e de modelo a serem utilizados no dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 7.

Bibliografia

- [1] A. Ribeiro, “Técnica de tratamento de solos – Jet Grouting,” Instituto Superior Técnico, 2010.
- [2] D. Rodrigues, “Jet Grouting - Controlo de Qualidade em Terrenos do Miocénico de Lisboa,” Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [3] J. Carreto, “Jet Grouting. Uma Técnica em Desenvolvimento,” *VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000, pp. 1043–1054.
- [4] J. Tinoco, A. Correia, e P. Cortez, “Previsão do comportamento mecânico de formulações laboratoriais de solo- cimento para colunas de jet grouting com recurso a máquina de vetores de suporte,” *Engenharia Civil: Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho*, vol. 42, pp. 43–55, 2012.
- [5] B. Standard, *BS EN 12716: 2001 - Execution of special geotechnical works — Jet grouting*. British, 2001.
- [6] NP - ENV 1997-1, “Norma Portuguesa - Eurocódigo 7 – Projecto geotécnico Parte 1: Regras gerais NP EN 1997-1 2010,” 2010.
- [7] H. Rahmani, “Estimation of Grout Distribution in a Fractured Rock By Numerical Modeling,” University of British Columbia, 2009.
- [8] A. E. C. Van Der Stoel, “Grouting for Pile Foundation Improvment,” Technische University Delft, 2001.
- [9] W. M. Rawlings, C. G., Hellawell, E. E., Kilkenny, *Grouting for ground engineering*, CIRIA C514. London, 2000.
- [10] J. Brito, “Técnicas de Melhoramento dos Solos,” *Slides da disciplina Construção de Edifícios - Mestrado Avançado em Construção e Reabilitação*. Instituto Superior Técnico, 2002.
- [11] FHWA, *Ground Modification Methods Reference Manual*, Volume II, FHWA-NHI-16-028, 2017. .
- [12] V. Manassero, “An Overview on Grouting Techniques,” 2003.
- [13] P. E. Warner, James, *Practical Handbook of Grouting: soil, rock and structures.*, First

- Edit. New Jersey and Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004.
- [14] “Foundation Professionals of Florida,” 2018. [Online]. Available: <http://www.foundationprofl.com/permeation-grouting.php>. [Accessed: 12-Jan-2018].
- [15] C. C. E. Muñoz, “Avaliação numérica da técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa,” Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.
- [16] Mainmark, “Permeation Grouting - Stabilising Soil Prior to Excavation or Construction.” .
- [17] H. Fang, *The Foundation Engineering Handbook*, First Edit. CRC Press, 2006.
- [18] H. Baker, “Compaction Grouting.” 2011.
- [19] M. C. Ronald, D. Andrus, Rileys, “Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines,” 1995.
- [20] F. M. W. Carletto, “Jet Grouting (Sistema Monofluido): Um Método Teórico simplificado para a Previsão do Diâmetro das Colunas.,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [21] J. De Brito, “Micro-estacas MICRO-ESTACAS Jorge de Brito,” no. September, 2015.
- [22] M. Croce, Paolo, Flora, Alessandro, Giuseppe, *Jet Grouting Technology, Design and Control*, First Edit. CRC Press, 2014.
- [23] C. S. N. dos Santos, “Reforço de fundações em solos margosos,” Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [24] “Temeltek.” [Online]. Available: <http://www.temeltek.com.tr/en/ground-improvement/jet-grout/>.
- [25] J. N. D. Correia, “Reforço de fundações de edifícios,” Instituto Superior Técnico, 2014.
- [26] “Jet Grouting,” *Hayward Baker Inc.* Hayward Baker Inc., pp. 1–8, 2011.
- [27] R. C. D. D’Oliveira, “Avaliação do Desempenho de Jet Grouting para Reforço de Estrutura Portuária,” Instituto Militar de Engenharia, 2010.
- [28] D. Xanthakos, P., Abramson, L., Bruce, *Ground Control and Improvement*. New

- York: Wiley-Interscience, 1994.
- [29] B. Nikbakhtan, “Development of Thermal-Insulating Soilcrete using Laboratory Jet Grouting Setup,” University of Alberta, 2015.
- [30] J. A. B. Tinoco, “Application of Data Mining Techniques to Jet Grouting Columns Design,” Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2012.
- [31] Trevi, “Jet Grouting.” p. 12.
- [32] Y. H. Wang, Z.F., Shen, S.L., Ho, C.E., Kim, “Jet Grouting Practice : an Overview Jet,” 2013.
- [33] K. Moseley, M. P., Kirsch, Ed., *Ground Improvement*, Second Edi. CRC Press, 2004.
- [34] M. J. N. Neves, “Técnicas de Recalçamento e Reforço de Fundações,” Instituto Superior Técnico, 2010.
- [35] T. Kimpritis, “The control of column diameter and strength in Jet Grouting processes and the influence of ground conditions.,” Imperial College London, 2013.
- [36] “Bauer Jet Grouting.” 2017.
- [37] J. G. P. Calatróia, “Execução de ensecadeiras com recurso a cortinas de injeções e colunas de Jet Grouting,” Instituto Superior Técnico, 2016.
- [38] S. M. Croce Paolo, Flora Alessandro, Lirer Stefania, Manassero Vittorio, Modoni Giuseppe, *JET GROUTING RACCOMANDAZIONI*, Edizione p. Italiana, Associazione Geotecnica, 2012.
- [39] structuralia, “Tratamientos de mejora del terreno: diseño, ejecución y control.” .
- [40] F. M. S. Franco, “Previsão De Capacidade Resistente De Estacas Em Compressão Tendo Por Base Resultados Em Verdadeira Grandeza Que Não Atingiram A Rotura,” Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [41] J. Bzowka, “Analysis of Bearing Capacity and Settlement of Jet Grouting Columns,” pp. 41–54, 2012.
- [42] J. Geotecnia and S. Engenharia, “Aterro Da Doca Do Terreiro Do Trigo Sobre Aluviões Lodosas Tratadas Com Colunas De Jet Grouting Fill of the ‘ Terreiro Do Trigo ’ Dockyard Over Alluvial Soils.”
- [43] J. G. Guideline, “Geo-Institute of Asce Grouting Committee Jet Grouting Task

- Force,” no. June. pp. 1–29, 2009.
- [44] IST, “Estruturas de Edifícios de BA - Fundações por Microestacas e Jet Grouting.” pp. 1–24.
- [45] I. Gladkov, A. Malinin, and A. Zhemchugov, “Strength and deformation characteristics of soil-concrete as a function of jet-grouting parameters,” *Geotech. Eng. New Horizons*, pp. 1–4, 2011.
- [46] G. G. Kashevarova, O. Makovetsky, and I. Khusainov, “Experience in Application of " JET Grouting " for Installation of Substructures of Estates,” *Front. Geotech. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 23–27, 2013.
- [47] M. Bustamante, “Les colonnes de jet grouting: dimensionnement et contrôle,” 2002.
- [48] “NP ENV 2004-1 2004. “Norma Portuguesa - Eurocódigo 4 – Projecto de estruturas mistas aço-betão Parte 1: Regras gerais e regras pa edifícios NP EN 1997-1 2010,” 2010.
- [49] E. Saint, E. Bar, and S. U. R. Seine, “Etude géotechnique de conception phase projet G2 PRO Reprise en sous-œuvre d ’ une église,” 2016.
- [50] NF P 94-262 (2012) Norme géotechnique - Fondations profondes