



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

**Métodos Tradicionais de Sondagem e Construção de  
Captações de Água Subterrânea em Países em Vias de  
Desenvolvimento**

**Jorge Miguel Camacho Afonseca**

Orientador:

António Alberto Chambel Gonçalves Pedro

Co-orientador

Emiliano Almansa Rodríguez

**Mestrado em Engenharia Geológica**

Dissertação

Évora, 2016

Departamento de Geociências da Universidade de Évora

MÉTODOS TRADICIONAIS DE SONDAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA EM PAÍSES EM VIAS DE DESENVOLVIMENTO

**Jorge Miguel Camacho Afonseca**

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica**

Orientador: Prof. Dr. António Alberto Chambel Gonçalves Pedro

Co-Orientador: Prof. Dr. Emiliano Almansa Rodríguez

2016

أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ

*“Are the disbelievers not aware that the heavens and the earth used to be joined together and that We ripped them apart, that We made every living thing from water? Will they not believe?”*

*AYAT al-Anbiya` 21:30, Corão*

## Resumo

Neste trabalho avaliam-se e comparam-se metodologias tradicionais de prospeção e construção de captações de água subterrânea em países em vias de desenvolvimento, neste caso do Sul da Ásia (Butão, Bangladeche, Índia, Nepal e Paquistão). Faz-se uma análise às metodologias do ponto de vista geológico (diversos tipos de aquífero, litologias, graus de fracturação e alteração), mecânico (técnica das metodologias de perfuração e construção das captações), e económico (comparação dos tempos de avanço das sondagens, dos tempos de construção das captações, da produtividade das mesmas e seus custos).

Conclui-se que as metodologias de prospeção *low cost* e tradicionais são semelhantes em âmbito e em cenário de aplicação, e que, ainda que as segundas sejam mais caras, têm custos muito menores em comparação com as convencionais. Conclui-se ainda que as metodologias convencionais de construção de captações estão pensadas para metodologias convencionais de prospeção, e que as *low cost* são muito semelhantes entre si.

*Palavras chave: escassez de água; países em via de desenvolvimento; prospeção tradicional; Subcontinente Indiano; construção de captações de água subterrânea*

# Traditional drilling and construction methods for groundwater abstraction in developing countries

## *Abstract*

The present work evaluates and compares traditional methods of borehole drilling and construction for water abstraction in developing countries, particularly South Asia (Bhutan, Bangladesh, India, Nepal and Pakistan). The methods are analyzed in regards to geology (types of aquifers, lithologies, massif fractures and weathering), mechanic (borehole drilling and abstraction technologies), and economic (comparing the progression in drilling and construction of boreholes, productivity and its costs) factors.

It is concluded that the traditional drilling methods are similar in scope and application set, and that, though the latter are more expensive, they cost less than conventional methods. It is also concluded that conventional borehole construction is based in conventional drilling methods, and that the diverse low cost methodologies are very similar between them.

*Keywords: Underground Water; Indian Subcontinent; Developing Countries; Water Scarcity; Traditional Borehole Drilling; Groundwater Abstraction*

## Agradecimentos

Aos meus mestres, a quem tudo devo e a quem devo nada.

Ao professor Carlos Alexandre, que me empregou de forma providencial e em termos económicos, permitiu o intercâmbio no Brasil.

Ao pessoal que tão bem me recebeu na UFMG, professora Sônia Denise, coordenadora de curso da licenciatura em Engenharia de Minas da UFMG, que me abriu as portas a um Natal com calor humano e, um pai quase, professor Cláudio Lúcio Pinto, diretor do Laboratório de Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, muito grato de o ter conhecido e ter privado com ele.

Aos meus pacientes orientadores, Prof Chambel e Emiliano

Aos meus pais e avós Dionildo e Salomé

Ao José Figueira e à Bouchra Zidaoui.

# Índice

Resumo.....	iv
<i>Abstract</i> .....	v
Agradecimentos .....	vi
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Gráficos .....	xii
Abreviaturas e Símbolos .....	xiii
Objetivos .....	1
Introdução .....	2
1. Estatuto da água .....	4
1.1.  Bangladeche .....	5
1.2.  Butão .....	6
1.3.  Índia.....	6
1.4.  Nepal .....	7
1.5.  Paquistão .....	8
1.6.  Súmula dos aspetos relativos ao estatuto da água na Península Indiana .....	9
2. Geografia, Geologia e Tectónica.....	11
2.1. Geografia.....	11
2.1.1. Bangladeche .....	11
2.1.2. Butão .....	12
2.1.3. Índia .....	13
2.1.4. Nepal .....	14
2.1.5. Paquistão .....	15
2.2. Geologia e Tectónica.....	17
2.2.1 Bangladeche .....	18
2.2.2. Butão .....	20
2.2.3. Índia .....	22
2.2.4. Nepal .....	24
2.2.5. Paquistão .....	26
3. Províncias de águas subterrâneas .....	30
3.1. Bangladeche .....	32
3.2. Butão .....	32
3.3. Índia .....	33
3.4. Nepal .....	35
3.5. Paquistão .....	35

4. Métodos de Prospeção e Construção de Captações de Água Subterrânea.....	37
4.1. Métodos de prospeção mecânicos e manuais.....	39
4.1.1. Convencionais/correntes .....	40
4.1.2. Perfuração por métodos tradicionais.....	47
4.1.3. <i>Low cost</i> .....	49
4.1.4. Comparação entre métodos .....	60
4.2. Métodos de construção .....	61
4.2.1. Convencionais/correntes .....	63
4.2.2. Tradicionais.....	68
4.2.3. <i>Low cost</i> .....	72
5. Conclusão.....	80
Referências bibliográficas.....	81
Anexos .....	88
Mapa Geológico do Bangladeche .....	88
Mapa Geológico do Butão .....	89
<i>Sludging</i> de Bengala.....	90
Método de escolha de tubagem.....	92
Perdas de Carga.....	93
Escolha do maciço drenante.....	95

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Mapa do Bangladeche (ONU, 2014).....	11
<b>Figura 2:</b> Mapa Administrativo do Butão (FAO, 2011).....	12
<b>Figura 3:</b> Mapa Administrativo da Índia (FAO, 2011).....	13
<b>Figura 4:</b> Mapa Administrativo do Nepal (FAO, 2011).....	14
<b>Figura 5:</b> Mapa Administrativo do Paquistão (FAO, 2011).....	15
<b>Figura 6:</b> A deriva progressiva das placas continentais Indiana e Euroasiática uma contra a outra (Benn, 2001).....	17
<b>Figura 7:</b> Esquemática da Tectónica na cordilheira dos Himalaias (adaptado de Jessup, 2013).....	17
<b>Figura 8:</b> Imagem de satélite da parte oriental do Subcontinente Indiano denotando as unidades geomorfotectónicas da Bacia de Bengala (Roy e Chatterjee, 2015).....	18
<b>Figura 9:</b> Tectónica da Bacia de Bengala - as linhas descontínuas representam os limites dos domínios tectónicos (adaptado de Roy e Chatterjee, 2015).....	20
<b>Figura 10:</b> Geologia simplificada do Butão (Tobgay <i>et al.</i> , 2012).....	21
<b>Figura 11:</b> Mapa das Zonas principais do Nepal. De referir a presença do Klípe de Dadelhdhura (KD) e o Cavalgamento de Ramgargh (CR) (adaptado de Larson, 2012).....	24
<b>Figura 12:</b> Esquema representativo das Zonas no Himalaias Nepalês (adaptado de Dahal, 2006).....	26
<b>Figura 13:</b> Tectónica do Norte do Paquistão (adaptado de Ali, 2010).....	26
<b>Figura 14:</b> Placas Euroasiática (Eurasian Plate), Arábica (Arabian Plate) e Indiana (Indian Plate) no Paquistão (Pakistan) (adaptado de Brumfiel, 2006).....	26
<b>Figura 15:</b> A - Inserção do Paquistão no Sul da Ásia; B - Estruturas geológicas significativas (Khan e Clyde, 2013); C - Principais Bacias do Paquistão (Ali, 2010).....	27
<b>Figura 16:</b> Breve geologia da Bacia do Indus (adaptado de Wandrey <i>et al.</i> , 2007).....	28
<b>Figura 17:</b> Natureza dos aquíferos do Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee <i>et al.</i> , 2015).....	30
<b>Figura 18:</b> Distribuição espacial da capacidade de recarga dos aquíferos do Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee <i>et al.</i> , 2015). Não se encontra à escala.....	31
<b>Figura 19:</b> Presença de contaminantes em águas subterrâneas no Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee <i>et al.</i> , 2015) (não se encontra à escala; para fins indicativos).....	34
<b>Figura 20:</b> Equipamento Circulação Direta (Ferreira <i>et al.</i> , 2012).....	43
<b>Figura 21:</b> Perfuração por circulação inversa (Ferreira <i>et al.</i> , 2012).....	45
<b>Figura 22:</b> Método de Roto-percussão (Ferreira <i>et al.</i> , 2012).....	46
<b>Figura 23:</b> Para sondagem: a = 0,9-1,5 m e b = 0,5 m; para limpeza: a = 1,6 m e b = 0,5 m (adaptado de Danert e Ball, 1999).....	49

<b>Figura 24:</b> Funcionamento do Auger ligeiro e de tipos de trado (Danert, 2009).....	50
<b>Figura 25:</b> Elementos do Vonder Rig (adaptado de Blair Research Laboratory, 1988).....	50
<b>Figura 26:</b> Equipamento ligeiro de percussão (Danert, 2009).....	51
<b>Figura 27:</b> Equipamento pesado de percussão (adaptado de Danert, 2009).....	51
<b>Figura 28:</b> Operação de sondagem (Waller, 2008).....	52
<b>Figura 29:</b> Esquema do reservatório e circulação do fluido de sondagem. ....	52
<b>Figura 30:</b> Bits de sondagem, à esquerda, o bit Baptista (Waller, 2008).....	53
<b>Figura 31:</b> Sondador a efetuar sondagem de teste (Carter, 2001).....	54
<b>Figura 32:</b> Peças desenhadas do equipamento (adaptado de Ball e Carter 2000).....	54
<b>Figura 33:</b> Diagrama da execução de sondagem (Williams, 2014).....	55
<b>Figura 34:</b> Sondagem Método Rota Sludge (Practica, 2014).....	56
<b>Figura 35:</b> Bit de sondagem usado pela metodologia jetting (Danert, 2009).....	57
<b>Figura 36:</b> Esquema com elementos relevantes ao funcionamento do método de jetting (adaptado de Carter, 1985).....	57
<b>Figura 37:</b> Tubo de sondagem de aço com 50 mm de diâmetro por 3 m de comprimento, com pegas que servem para elevar e baixar durante a sondagem, no topo um cotovelo de 180° (Carter, 1985).....	57
<b>Figura 38:</b> Bit de sondagem método EMAS (Danert, 2009).....	58
<b>Figura 39:</b> Método de prospeção EMAS com uso de roldana (Buchner, 2010c).....	58
<b>Figura 40:</b> Torre de sondagem do método EMAS (Buchner, 2010c).....	59
<b>Figura 41:</b> Sondagem EMAS com uso do princípio da alavanca (Buchner, 2010c).....	59
<b>Figura 42:</b> Esquema simplificado de um furo parcialmente sem revestimento, em “Open hole”(Graça, 2012).....	62
<b>Figura 43:</b> Tubos de PVC e de aço, esquerda e direita respetivamente (Graça, 2012).....	63
<b>Figura 44:</b> Esquema do dispositivo para a soldadura TIG (soldadura a arco elétrico com ponta de tungsténio em atmosfera de gás inerte, argon) entre dois segmentos de tubagens de revestimento final, em aço inox (retirado de Graça, 2012).....	65
<b>Figura 45:</b> Tipos de tubos ralos (Ferreira et al., 2012).....	66
<b>Figura 46:</b> Diferentes tipos de centralizadores usados em construções convencionais de furos (Graça, 2012).....	67
<b>Figura 47:</b> Exemplo de um esquema genérico relativo à sequência de construção das fases principais de um furo com redução de diâmetro de perfuração (Ferreira et al., 2012).....	68
<b>Figura 48:</b> Corte das varas de bambu (Ball e Danert, 1999).....	69
<b>Figura 49:</b> Corte das seções anelares de bambu (Ball e Danert, 1999).....	69
<b>Figura 50:</b> Amarrar das varas de bambu cortadas em volta das seções anelares (Ball e Danert, 1999).....	70

<b>Figura 51:</b> Envolver a tubagem contruída na Figura anterior com rede mosquiteira (Ball e Danert, 1999) .....	70
<b>Figura 52:</b> Ferramenta de corte das varas de bambu (Ball e Danert, 1999).....	71
<b>Figura 53:</b> Limpeza das varas de bambu para que possam ser usadas na construção da captação (Ball e Danert, 1999).....	72
<b>Figura 54:</b> Corte de seção de PVC in situ (Buchner, 2010a) .....	73
<b>Figura 55:</b> Aquecimento do tubo de forma flexibilizar o PVC (Buchner, 2010a) .....	74
<b>Figura 56:</b> Encaixe forçado com uma peça fria, transformando o topo numa nova forma fêmea (Buchner, 2010a).....	74
<b>Figura 57:</b> É aplicada água para esfriar o tubo de forma, a partir daqui o encaixe está moldado (Buchner, 2010a).....	75
<b>Figura 58:</b> Marcação das ranhuras a serem cortadas por serra manual (Buchner, 2010b).....	75
<b>Figura 59:</b> Execução do corte das ranhuras previamente assinaladas (Buchner, 2010b).....	76
<b>Figura 60:</b> Aquecimento do tubo (Buchner, 2010b) .....	76
<b>Figura 61:</b> Dobramento da ponta (Buchner, 2010b) .....	77
<b>Figura 62:</b> Arrefecimento do tubo (Buchner, 2010b).....	77
<b>Figura 63:</b> Aplicação de cola nos topos macho e fêmea (Buchner, 2010b) .....	77
<b>Figura 64:</b> Encaixe final de tampas de base de coluna (Buchner, 2010b) .....	78
<b>Figura 65:</b> Aplicação da manga de poliéster no tubo ralo e colagem ao tubo (Buchner, 2010b) .....	78
<b>Figura 66:</b> Corte do excesso de manga (Buchner, 2010b) .....	79
<b>Figura 67:</b> Aplicação de cola e isolamento do fim da manga de nylon (Buchner, 2010b) .....	79

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Diferentes documentos jurídicos adoptados pelos países abordados (Adaptado de Gawel e Ahsan, 2014 com dados de Aryal, 2011; Bandaragoda, 1995; Cullet, 2007; Kansakar, 2011; Koonan e Bhullar, 2012; Qureshi et al., 2010; BWA, 2013 e NWMP, 2001). .....	10
<b>Tabela 2:</b> Resumo do procedimento de seleção do método de perfuração para captações hidrogeológicas (adaptado de Herrera e Castilla, 2012) .....	47
<b>Tabela 3:</b> Comparação dos métodos de prospeção (adaptado de Danert, 2009) .....	60
<b>Tabela 4:</b> Comparação entre tubulações definitivas de PVC e aço (adaptado de Graça, 2012).....	63
<b>Tabela 5:</b> Cálculo de resistência de tubagem em PVC com coluna de furo constituída por areia saturada .....	92

## Lista de Gráficos

<b>Gráfico 1:</b> Força necessária, em N, aplicar para sondar, em m, tem como base os valores tidos por Danert e Ball, 1999 para a sondagem a 10m (108N). A azul está representada para uma razão de distâncias de a para b de 2 para 1 e a cor de laranja para uma razão de 3 para 1. ....	90
<b>Gráfico 2:</b> Condições em que os tubos de PVC operam (Politejo, 2012) .....	93
<b>Gráfico 3:</b> Ábaco usado para calcular a perda de carga de tubos do modelo PN 25 da série BI-OROC (adaptado de Sotra, 2015) .....	94
<b>Gráfico 4:</b> Uso prático do ábaco para determinar perda de carga modelo PN 16 da série BI-OROC (adaptado de Sotra, 2015) .....	95
<b>Gráfico 5:</b> Exemplo de uma curva granulométrica projetada de um material a aplicar num furo a partir de análise granulométrica do material sondado (Graça, 2012). ....	96

## Abreviaturas e Símbolos

### Lista de Abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

° C	graus centígrados
Ga	giga anos – $10^9$ anos
ha	hectares
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IGB	Indus-Ganges-Brahmaputra
l	litros
<i>low-cost</i>	baixo custo
Ma	mega anos – $10^6$ anos
mca	metros de coluna de água
mMm <sup>3</sup>	milhar de milhão de metro cúbico
mm	milímetro
m	metro
WHO – OMS	Organização Mundial de Saúde
ONG	Organização Não Governamental
ONU - UN	Organização das Nações Unidas
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

## Objetivos

Na elaboração da presente dissertação foram traçados os seguintes objetivos:

- Valorizar a importância do recurso hídrico para a vida no planeta e especificamente para o ser humano;
- Compreender a realidade dos recursos hídricos no Sul da Ásia, no seu conjunto, e em cada país especificamente;
- Valorizar as exigências que os cidadãos têm de cumprir para aceder à água;
- Identificar as zonas hídricas com potencial produtivo no espaço considerado para uso humano e as suscetibilidades a que estes estão sujeitos;
- Identificar metodologias de prospeção, perfuração e captação de água subterrânea em zonas do globo, Sul da Ásia, em vias de desenvolvimento;
- Perceber, até que ponto, os valores envolvidos neste tipo de prospeção, e os tempos de execução, podem justificar a sua utilização, ou não, nos cenários considerados.

## Introdução

*“The world is not “running out of water,” but it is not always available when and where people need it. Climate, normal seasonal variations, droughts and floods can all contribute to local extreme conditions.”*

in Facts and Trends Water, World Business Council for Sustainable Development

As questões que rodeiam o acesso à água, isto é, a facilidade, democraticidade e responsabilidade, constituem requisito essencial para o avanço das condições sociais globais de uma população. A OMS considera um mínimo de 20 litros de água para um consumo humano razoável (OMS, 2002 após OMS e UNICEF, 2000) “a disponibilidade de, pelo menos 20 litros por pessoa por dia de uma fonte até um quilómetro de distância da habitação do utilizador” partindo desse princípio, a ONU estima que por volta de “1,1 mil milhões de pessoas em países em vias de desenvolvimento têm dificuldades no acesso a água” (ONU, 2006) em termos de percentagem de população, 45% da África Subsariana, pouco mais de 20 % na Ásia Oriental e Pacífico e 15% do Sul da Ásia (ONU, 2006), onde se encontra o Subcontinente Indiano com aproximadamente 1,65 mil milhões de pessoas onde habitam cerca de 1,65 mil milhões de pessoas numa área equivalente a metade da dos Estados Unidos da América (CIA, 2016).

O relatório de UNESCO acerca da Gestão da Água em Incerteza e Risco afirma que “Aos utilizadores dos recursos hídricos, em todo o mundo, consegue ser assegurado que terão acesso à água de forma ininterrupta” (UNESCO, 2012) seja para que fim for. Essa será a tónica para nos enquadrar, agora e sempre, num clima de preocupação saudável acerca do cuidado que o consumo desse recurso deve instar.

Assim, deverá haver um esforço concertado por parte de instituições nacionais e supranacionais, seja de organizações governamentais ou não-governamentais, para acesso aos recursos hídricos.

O espaço territorial considerado nesta dissertação é o do subcontinente indiano, e abrange: Índia, Paquistão, Bangladesh, Butão e Nepal, e corresponde a uma das áreas com maior fragilidade do ponto de vista de acesso a direitos fundamentais, entre eles o direito à água. Esse condicionamento surge da baixa possibilidade económica, de uma forma geral e, no caso específico do Paquistão, por meio de violência e terrorismo.

Neste trabalho abordar-se-á um pouco da geologia da região e, do ordenamento legal presente nos territórios considerados. Serão abordadas as metodologias convencionais, as tradicionais e as *low*

*cost* de prospecção e exploração de águas subterrâneas.

## 1. Estatuto da água

De acordo com o Comité dos Direitos Económicos, Sociais e Culturais das Nações Unidas em comentário expresso em Novembro de 2002 e reforçado com a Resolução 64/292 de 28 de Julho de 2010 o direito ao acesso à água é o pré-requisito essencial para o gozo dos demais direitos<sup>1</sup>. “Dá a vida e é insubstituível” (ONU, 2003).

No que diz respeito à água propriamente dita, o primeiro princípio da Declaração de Dublin (ONU, 1992) refere-a como sendo “(...) um recurso finito, vulnerável e essencial que deverá ser gerido de forma integrada”<sup>2</sup>. Com base nesses pressupostos, o conceito de recurso comum<sup>3</sup> aplica-se e define-se como “recurso natural (...) onde a exclusão de utilizadores acontece a um custo elevado.” (Hess, 2006).

Partindo de uma análise institucionalista, em que os diferentes atores/*stakeholders* são objeto de estudo, o conceito da gestão integrada é fundamental, estando a par da questão tecnológica, sendo necessária uma sofisticação burocrática de forma a conseguir lidar com os desafios em termos locais, regionais, nacionais e supranacionais (Cunha, 2009).

Convém também distinguir o direito à água dos direitos de uso da água. A primeira define o direito do acesso ao objeto em causa na formulação mais básica do direito do Homem, ou seja, consumo sem o qual a vida humana não seria possível elaborando, a partir daí um conjunto de pressupostos, o segundo conceito vem dos pressupostos propriamente ditos, mais precisamente das necessidades não básicas *e.g.* rega agrícola e pastorícia (Aryal, 2011).

Do ponto de vista legal, cada um dos países envolvidos tem estatuto próprio definido quanto à natureza e ao uso da água. Existem, no entanto, elementos comuns a cada um dos países, nomeadamente a hierarquia das leis. Quer com isto dizer que a água se rege por normas internacionais (tratados de cariz internacional/transfronteiriço), federais e estaduais. Para além disso encontram-se em campo elementos normativos informais, que dizem respeito a costumes e à tradição que é comum aos países aqui referidos.

---

<sup>1</sup>- Article I.1 "The human right to water is indispensable for leading a life in human dignity. It is a prerequisite for the realization of other human rights" General Comment No. 15. The right to water. UN Committee on Economic, Social and Cultural Rights, novembro 2002

<sup>2</sup>- “water is a finite, vulnerable and essential resource, which should be managed in an integrated manner”

<sup>3</sup>- *common-pool resource*

Cada um dos países abordados acabou por adotar um conjunto normativo para definir estratégias integradas de gestão dos recursos hídricos.

Referem-se então como direitos definidos de várias e distintas formas (Aryal, 2011):

- Acesso: Poder chegar ao recurso;
- Extração: Autoridade para extrair ou retirar o recurso do espaço geográfico-geológico envolvente;
- Gestão: Autoridade para tomar decisões acerca de como deverá ser usado;
- Exclusão: Autoridade para definir quem chega ao recurso;
- Transferência: Autoridade para vender, arrendar ou doar o recurso.

Estes direitos são exercidos de forma variada de acordo com o espaço geográfico, institucional e cultural nos diversos países considerados.

### 1.1. Bangladeche

A legislação do Bangladeche começa a ser escrita por iniciativa do Raj Britânico no século XIX como forma de gerir a distribuição da água para campos agrícolas e prossegue com a independência primeiro enquanto parte da União Indiana e posteriormente do Paquistão. O Governo do Bangladeche, em legislação específica publicada em 2013, afirma e garante o direito da população à extração e uso de água, desde que esteja em causa o consumo individual ou a prática de atividades religiosas (BWA, 2013).

O Ato da Água do Bangladeche (Bangladesh Water Act) está inserido numa estratégia mais ampla definida pelo *National Water Management Plan* (NWMP) publicado em dezembro de 2001 previsto para uma janela temporal que vai de 2000 a 2050. Este plano contabiliza os cenários previstos, quer de ocupação urbana como de ocupação rural e, perspetiva o uso da água e de ambientes aquáticos e tem como objetivos: o desenvolvimento de todas as formas de gestão assim como de extração de água subterrânea, de forma eficiente e equitativa.

Ainda segundo o NWMP, pretende-se assegurar a acessibilidade da água a todos os membros da sociedade, principalmente mulheres e crianças assim como elementos da sociedade economicamente desprivilegiados. Acelerar o desenvolvimento de políticas de distribuição públicas e privadas sustentáveis de acesso à água mediante a aplicação de medidas financeiras e legais para o efeito. Efetuar mudanças institucionais que ajudem a descentralizar a gestão dos recursos hídricos e melhorar o papel das mulheres na gestão da água para que seja mais equitativo o processo de tomada de decisão. Desenvolver um ambiente legal e regulatório que ajude o processo de descentralização e de gestão do meio ambiente e desenvolvimento do estado da arte que permita capacitar

infraestruturas. Elaboração de planos de gestão adequados à participação pública, assim como à promoção da igualdade de género e consciencialização ambiental, de forma a promover uma ampla participação pública (NWMP, 2001).

## 1.2. Butão

De acordo com a constituição Butanesa, os recursos hídricos são tidos como propriedade do estado, da mesma forma que o são os Recursos Minerais e os Naturais. Gozam de plena proteção dentro do quadro legal que reconhece o papel da defesa desses recursos. No entanto é a forma com que a sociedade do Butão vê a natureza partindo da religião budista que considera o planeta como um complexo sistema da qual todos comungamos (Gawel e Ahsan, 2014).

O ordenamento jurídico coloca as decisões para gestão da água no âmbito do Ato Nacional de Proteção do Ambiente (NEPA), sendo dele consequente, o Conselho Nacional do Ambiente (NEC). Este órgão produz as políticas, planos e programas, trata de consciencialização social relativamente ao ambiente, procura introduzir a questão ambiental nos processos de planeamento ambiental, assim como a institucionalização dos procedimentos de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA). É também responsável pela monitorização dos padrões de qualidade do meio ambiente pelos meios tecnológicos apropriados, em fazer e promover investigação, a recolha de dados e indicadores ambientais, divulgando *à posteriori* os resultados e conclusões a cada 5 anos. Caberá também ao NEC coordenar e facilitar o estabelecimento de políticas ambientais quer provenham de acordos, convenções, tratados ou declarações, multi ou bilaterais (Gawel e Ahsan, 2014).

Assim, o processo de decisão acerca das questões da água prima pela descentralização, ou seja, as tomadas de decisão procuram oferecer um acesso equilibrado dos *stakeholders* aos recursos hídricos, partindo do paradigma da gestão integrada, em que a partilha de responsabilidades é a linha da frente de combate às alterações climáticas. Em todas as decisões que digam respeito ao uso da água, a comunidade é convidada a participar da discussão, quer por via das Associações de Utilizadores da Água (AUA), seja pela Federação de AUA, da consulta a ONGs, a operadores de recreação e turismo, através da consulta de comunidades tradicionais e de governos locais (Parlamento do Butão, 2011). No que diz respeito ao direito de usufruto do pequeno utilizador, seja individual ou de uma AUA, o mesmo encontra-se isento do processo de AIA sendo apenas necessário, que enquanto indivíduo consiga a extração do recurso (Parlamento do Butão, 2011).

## 1.3. Índia

O conjunto da legislação escrita que hoje existe parte do estabelecido no período colonial britânico para rega datando de 1873, o *Northern India Canal and Drainage Act*, assumindo depois uma redação mais abrangente em 1931, o *Madhya Pradesh Irrigation Act*, que se mantém relevante

até aos dias de hoje reforçado pelo Ato Regulatório pós colonial de 1949, *Regulation of Waters Act*, e mais recentemente pela Lei de Rega de Bihar de 1997, *Bihar Irrigation Act*, que lida com a questão das águas superficiais (Cullet, 2007). A constituição consagra, porém, uma descentralização da questão hídrica, que segue do período colonial, com exceção de cursos de água que sirvam de navegação, águas interiores, cursos de água de relevo que sejam trans-estaduais, artigo 262 da Constituição Indiana. No caso de existirem conflitos com cursos de água trans-estaduais, a legislação utilizada para a resolução é a Lei de Disputas Inter-Estaduais de 1956 (*Inter-State Water Disputes Act*) (Cullet, 2007).

Quanto às questões de poluição, gestão e prevenção, estas encontram-se cobertas pela Lei da Água de 1974 (*Water Act*) (Cullet, 2007).

Do ponto de vista da elaboração e alterações de legislação, a partir de uma conceção ripariana do direito à água<sup>4</sup>, existem conselhos consultivos que minoram e medeiam conflitos que surjam na gestão hídrica. Do ponto de vista comunitário, os conselhos populares têm sido alvo, mais recentemente, de uma reapreciação em termos de políticas públicas, passando a WUA<sup>5</sup> (Associação de Utilizadores de Água).

O conjunto de reformas vem sido introduzida de maneira gradual, seguindo as indicações da Declaração de Dublin, e reforçadas pelo resultado do caso *Subhash Kumar vs State of Bihar*, em que o Supremo Tribunal reconheceu que no direito à vida, se “(...) inclui o direito a usufruir, para uma vida plena, de água e ar livres de poluição<sup>6</sup>”.

#### 1.4. Nepal

De forma semelhante ao Butão, existe uma sociedade orientada por preceitos Budistas que se caracteriza pela simbiose com a natureza e por consequência com os recursos hídricos. Os recursos hídricos estão definidos pela constituição como direitos, no entanto na caracterização legal posterior não há distinção entre água de superfície e água subterrânea. Estas são nomeadas quanto à sua natureza, fugitiva e CPR (*Common Pool Resources*) respetivamente (Kansakar, 2011).

Pequenos utilizadores e grupos de utilizadores estão isentos de licença para extração de água subterrânea, nos restantes casos as licenças atribuídas podem ser transferidas. A emissão de licenças é da responsabilidade do Comité Distrital de Recursos Hídricos do distrito onde se pretende extrair,

---

<sup>4</sup>Lei Ripariana – Direito que pertence ao proprietário do terreno por onde corre um curso de água para livre usufruto; parte de um conceito do direito comum de origem anglo-saxónica. *Riparian Rights. (n.d.) West's Encyclopedia of American Law, 2ª edição. (2008)*

<sup>5</sup>WUA – *Water Users Association*, associação cooperativa de utilizadores de água que serve para fazer valer pretensões sobre o uso da água em relação a autoridades oficiais (Chandrasekaran et al., S/D).

<sup>6</sup>‘includes the right of enjoyment of pollution free water and air for full enjoyment of life’ parágrafo 7 *Subhash Kumar v. State of Bihar*, AIR 1991 seção 420

ou em conjunto com outros distritos quando o aquífero ultrapassa a área dos mesmos. O Ato de Empresas Industriais (*Industrial Enterprises Act*) de 1992 prevê que o estado apresente a garantia de existência de infraestruturas necessárias à condução da atividade industrial, quando tal não sucede a lei prevê, como contrapartida, a ausência de necessidade de uma licença de extração de águas subterrâneas (Kansakar, 2011).

Sumariamente podemos então colocar o direito à água da seguinte forma (Aryal, 2011):

- Direito natural, para o qual não é requerido licenciamento algum, limitado quanto ao propósito do uso;
- Direitos adquiridos por licenciamento, limitados ao propósito para o qual foram licenciados, pode, contudo, exercer o seu direito enquanto proprietário.
- Direitos riparianos reconhecidos segundo os quais aquele que se situa a montante do fluxo tem prioridade sobre o que se encontra a jusante.
- Direitos do uso e direito de apropriação prévia foram reconhecidos em dois sentidos. Nenhum canal de rega pode ser construído a montante de um preexistente se isso implicar uma redução de caudal do primeiro.
- Um indivíduo que obtém a água de forma tradicional, não deverá ser impedido nem levado a deixar a sua terra sem cultivo.

Naturalmente a esses direitos acresce o poder discricionário das autoridades competentes para o cumprimento desses direitos.

### 1.5. Paquistão

De forma semelhante aos casos supramencionados, o Paquistão apresenta uma tradição relativamente à gestão dos recursos hídricos, assente em regras informais, com base no conceito de propriedade comum e partilha, tendencialmente equitativa. Assim como, de uma aceitação do controlo social com base nos princípios islâmicos, profundamente enraizada no conceito da escassez de água.

Desses princípios islâmicos e da observação por parte do império britânico dos sistemas de partilha e uso da água na península ibérica, surge o *pucca warabandi*. Conceito que vem expresso no Ato de Drenagem do Norte da Índia de 1873, introduzido pelo império britânico (Bandaragoda e Rehman, 1995), que consiste na distribuição da água de canais por turnos (Bandaragoda, 1995).

Historicamente falando, a extração de águas subterrâneas em grande escala começa na década de 60 do século passado. Com a eletrificação das zonas rurais do Paquistão, com tarifas fortemente subsidiadas, o uso de bombas elétricas aumenta e complementam a água de canal na rega de culturas com grande necessidade de água. Consequentemente, houve um aumento de procura de água, o que

originou legislação quanto ao licenciamento de extração de águas subterrâneas nos anos 80, culminando, mais recentemente, no Ato de Drenagem e dos Canais, 1991 (Qureshi *et al.*, 2010) legislação que rege a exploração de águas subterrâneas.

Do ponto de vista de leis específicas, os artigos 9º, 14º, 25º, 155º e 184º da Constituição dizem respeito à segurança, inviolabilidade da dignidade e igualdade dos cidadãos, assim como, respetivamente, à segurança no acesso à água. Na esfera federal, as leis que protegem a água estão inscritas no Ato de Proteção do Ambiente (*Environmental Protection Act*) de 1997, nos artigos 14º, que diz respeito à emissão de efluentes e resíduos, e 20º, relativo a água potável, assim como a provisão de um Conselho de Investigação dos Recursos Hídricos, previsto no Ato do Conselho de Investigação dos Recursos Hídricos do Paquistão (*Pakistan Council of Research in Water Resources Act*) de 2007, para assessorar, através de estudos científicos de diversa ordem, a qualidade da água em todas as suas vertentes, por forma a auxiliar a elaboração de modelos de decisão políticos (Shah, 2011).

Como no caso de países anteriormente referidos, os WUA assumem particular importância, uma vez que podem, coletivamente, promover melhorias de diversa ordem na rede de abastecimento e arbitrar conflitos entre utilizadores, com base no documento *On Farm Water Management & Water Users Association Ordinance [Act]-1981* (Amended 2001) (Directorate General Agriculture, n/d).

Relativamente à atribuição do licenciamento para abstração de águas subterrâneas, o documento de referência é o *West Pakistan Land and Water Development Board (Control over Underground Waters) Rules* de 1965, que vem retificar aspetos do *Soil Reclamation Act* de 1952 e atualizar outros presentes no *Canal and Drainage Act* de 1873. No caso de se tratar de utilizador individual, desde que seja para consumo doméstico ou apascentamento de gado, está isento de licença para extração de águas subterrâneas, parte B, ponto 3, apêndice 79 (Governo do Paquistão Ocidental, 1965). Uma licença emitida poderá ser revogada caso se verifique impacte significativo 6 meses após o início da atividade extrativa, ou com qualquer violação do disposto no processo de licenciamento (Governo do Paquistão Ocidental, 1965).

#### 1.6. Súmula dos aspetos relativos ao estatuto da água na Península Indiana

Cada um destes países procurou um caminho para enquadrar as políticas públicas de água optando por privilegiar os valores sociais no ordenamento jurídico-legal. O que os distingue é a disseminação de competências relativamente à questão de água e a forma como atua a fiscalização. Sintetizando legalmente os documentos mencionados ao longo do capítulo, apresentam-se os resultados na seguinte tabela:

**Tabela 1:** Diferentes documentos jurídicos adoptados pelos países abordados (Adaptado de Gawel e Ahsan, 2014 com dados de Aryal, 2011; Bandaragoda, 1995; Cullet, 2007; Kansakar, 2011; Koonan e Bhullar, 2012; Qureshi et al., 2010; BWA, 2013 e NWMP, 2001).

País	Política/estratégia	Atos	Legislação
Bangladeche	National Water Policy, 1999	Bangladesh Water Act, 2013; Water Resources Planning Act, 1992	Water Pollution Control Ordinance, 1970; Environmental Pollution Control Ordinance, 1977; Environmental Conservation Act and Rules, 1997
Butão	Water Policy, 2003	Water Act of Bhutan, 2011	Water Regulation, 2012 (rascunho)
Índia	National Water Policy, 2002; Andhra Pradesh State Water Policy, 2008; Maharashtra State Water Policy, 2003; Orissa State Water Policy, 2007; West Bengal State Water Policy, 2011	Water (Control and Prevention of Pollution) Act, 1974	Kerala State Water Resources Regulatory Authority Ordinance, 2012; Gujarat Water Regulatory Authority Notification, 2012;
Nepal	Irrigation Policy 1992 (Revisto-1997); New Irrigation Policy, 2003; National Water Supply Sector Policy 1998; Water Resources Strategy-2002; National Water Plan, 2005	Water Tax Act, 1966; Water Resources Act, 1992; Water Supply Management Board Act, 2006	Water Resources Regulation, 1993; Irrigation Regulation, 2000; Electricity Regulation, 2000; Electricity Tariff Fixation Regulation, 2000
Paquistão	National Drinking Water Policy, 2009;	Pakistan Safe Drinking Water Act (rascunho)	West Pakistan Land and Water Development Board (Control over Underground Waters) Rules, 1965;

Foi possível aferir que a legislação do Butão é, apesar de recente, concisa e precisa no tratamento dos recursos hídricos. Relativamente ao Nepal existe uma vasta legislação, contudo conflituante, que resulta numa difícil definição de uma postura institucional coerente. O mesmo se aplica à Índia, só que de forma proporcional à sua dimensão. O Paquistão apresenta leis avulsas e datadas que dificultam a abordagem aos desafios atuais e uma administração pública sem capacidade para promover uma estratégia para os recursos hídricos (Qureshi e Sayed, 2014).

## 2. Geografia, Geologia e Tectónica

### 2.1. Geografia

#### 2.1.1. Bangladeche

A denominada República Popular do Bangladeche situa-se no sul da Ásia (Figura 1), tem como fronteiras a Índia, a Oeste, a Norte e a Este, fazendo fronteira a Sudeste com Myanmar (Birmânia) e a Sul com o oceano Índico. Em termos cartográficos encontra-se entre as coordenadas 26° 37' e 20° 41' Norte, e 88° e 92° 40' Este (Google, 2015). Pode-se assinalar o Ganges e o Jamuna como os cursos de água mais relevantes, que desembocam em Rajbari para formarem o grande Ganges (Padma), sendo ainda de relevo o Meghna, que vem do Nordeste a entrar pela região de Sylhet, encontrando-se com o Padma na capital Dacca. A sul surge a grande planície deltaica que



Figura 1: Mapa do Bangladeche (ONU, 2014)

corresponde, junto com o Sundarbans, a grande parte da costa do país.

Quanto à parte humana, é um país com cerca de 147 mil km<sup>2</sup>, cuja área coberta por água é de 7%. Com uma população estimada em 150 milhões é o 11º país mais povoado do mundo,

apresentando uma densidade populacional que ronda os 1000 habitantes por km<sup>2</sup> (CIA, 2016).

### 2.1.2. Butão

Denominado oficialmente por Reino do Butão, tem como fronteira ao sul a Índia e a norte a República Popular da China (Figura 2), entre as coordenadas 28° 15' e 26° 40' N, 88° 47' e 92° 10' E (Google, 2015), com cerca de 38 394 km<sup>2</sup> (CIA, 2016).



Figura 2: Mapa Administrativo do Butão (FAO, 2011)

A grande maioria dos vales apresenta cursos de água de caudal variado, alimentados pela neve que cai a maior altitude, pela monção de verão e/ou por ambos. À exceção de um pequeno rio no extremo norte, que corre para norte, os restantes cursos de água e bacias hidrográficas orientam-se de Norte para Sul com sentido concomitante, de oeste para este. Cursos de água relevantes são os rios, Jaldhaka, Amo (Torsa), Wang (Raidak), Mo, Puna Tsang (Sankosh), Mao Khola/Aie, Manas

(Lhobrak) e a bacia oriental, composta pelos rios Bada e Dhansiri (FAO, 2011).

Quanto a população, por estimativas da CIA (2016) de 2015, situa-se nos 741 mil habitantes (165° mundial) com uma densidade populacional de cerca de 20 habitantes por km<sup>2</sup>.

### 2.1.3. Índia

Oficialmente denominada de República da Índia, localiza-se na ponta Sul do subcontinente asiático, confrontada a Sul com o Oceano Índico, a Noroeste com o Paquistão, a Norte com a China, Nepal e Butão, a Este com Bangladeche e Mianmar (Figura 3), tendo por coordenadas geográficas 8° e 3' e 37° Norte, e entre 68° e 97° e 30' Este (Google Earth, 2016).

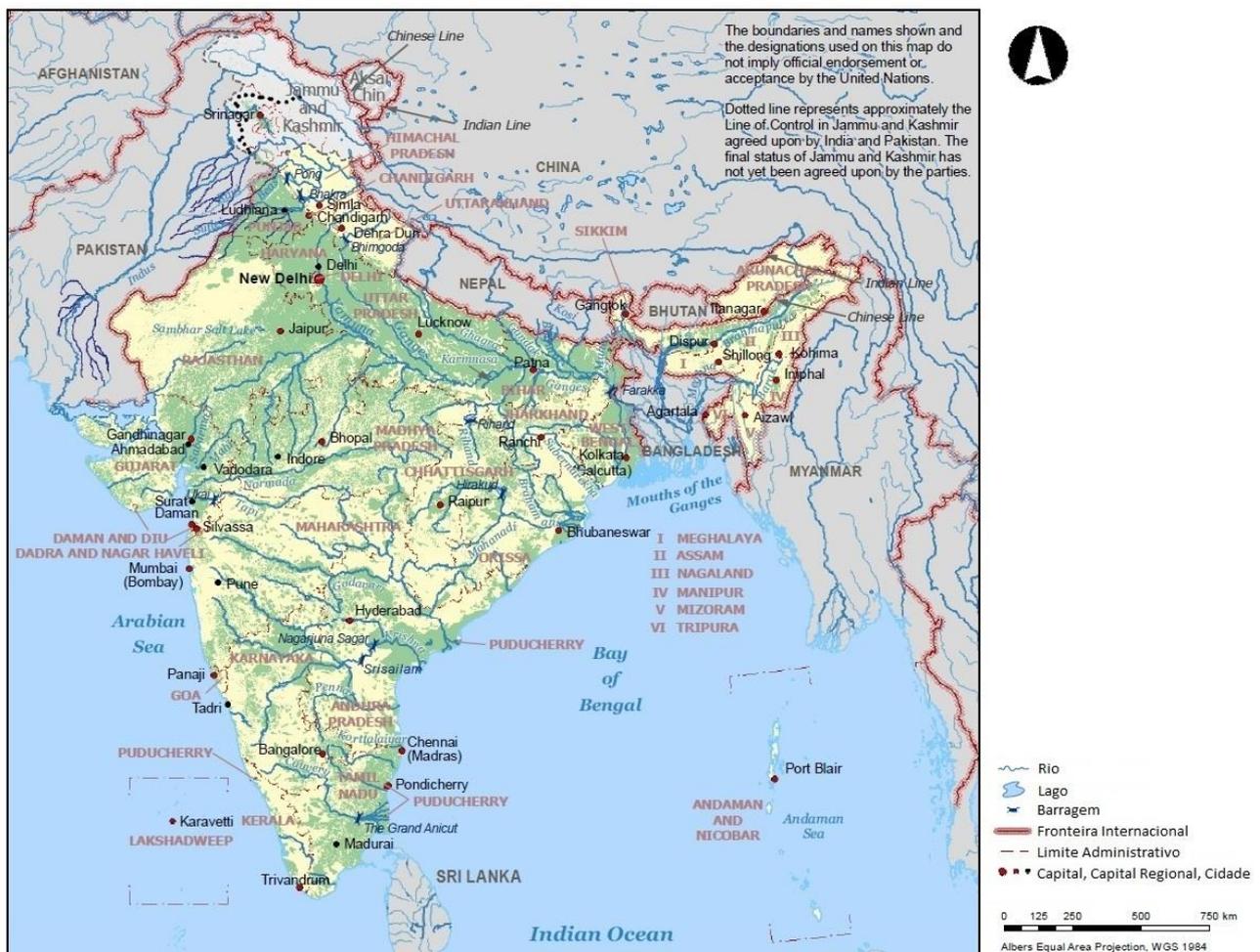


Figura 3: Mapa Administrativo da Índia (FAO, 2011)

Apresenta uma área de cerca de 3,3 milhões de km<sup>2</sup> (CIA, 2016) com 3 regiões principais, a Índia peninsular, a Sul das cadeias montanhosas Vindhya e Satpura, as planícies dos rios Indus (a Noroeste) e Ganges (a Norte e Nordeste) e no extremo norte os Himalaias. Conta ainda com 3 arquipélagos, Laquedivas, no mar Arábico e, no Golfo de Bengala, Andamão e Nicobar. Administrativamente, é composta por 28 estados e 7 territórios de união (FAO, 2011).

Em termos de clima é o típico de um regime de monções, que correspondem a cerca de 70 a

95% da precipitação anual que, no seu todo, ronda os 1170 mm, que, no entanto, são variáveis ao longo do país (FAO, 2011).

A população é estimada em cerca de 1,25 mil milhões de habitantes, com uma densidade populacional por volta de 381 habitantes por km<sup>2</sup> (CIA, 2016).

#### 2.1.4. Nepal

Inteiramente localizada na bacia hidrográfica do Ganges, a República Federal Democrática do Nepal faz fronteira a Norte-Nordeste com a China e a Sul-Sudoeste com a Índia (Figura 4). Localiza-se entre as coordenadas 30° 30' e 26° 15' Norte e, 80° e 88° 15' Este (Google Earth, 2016), com uma área de aproximadamente 147 mil km<sup>2</sup>, e pode ser dividido fisiograficamente em 3 partes: os cumes do Himalaias a Norte, as encumeadas e Himalaias médios e baixos *Siwalik* mais a Sul e, a fazer fronteira com a Índia, a região com cotas mais baixas, abaixo dos 300 m de altitude, *terai*. Administrativamente encontra-se dividida em 5 regiões de desenvolvimento e 75 distritos (FAO, 2011).

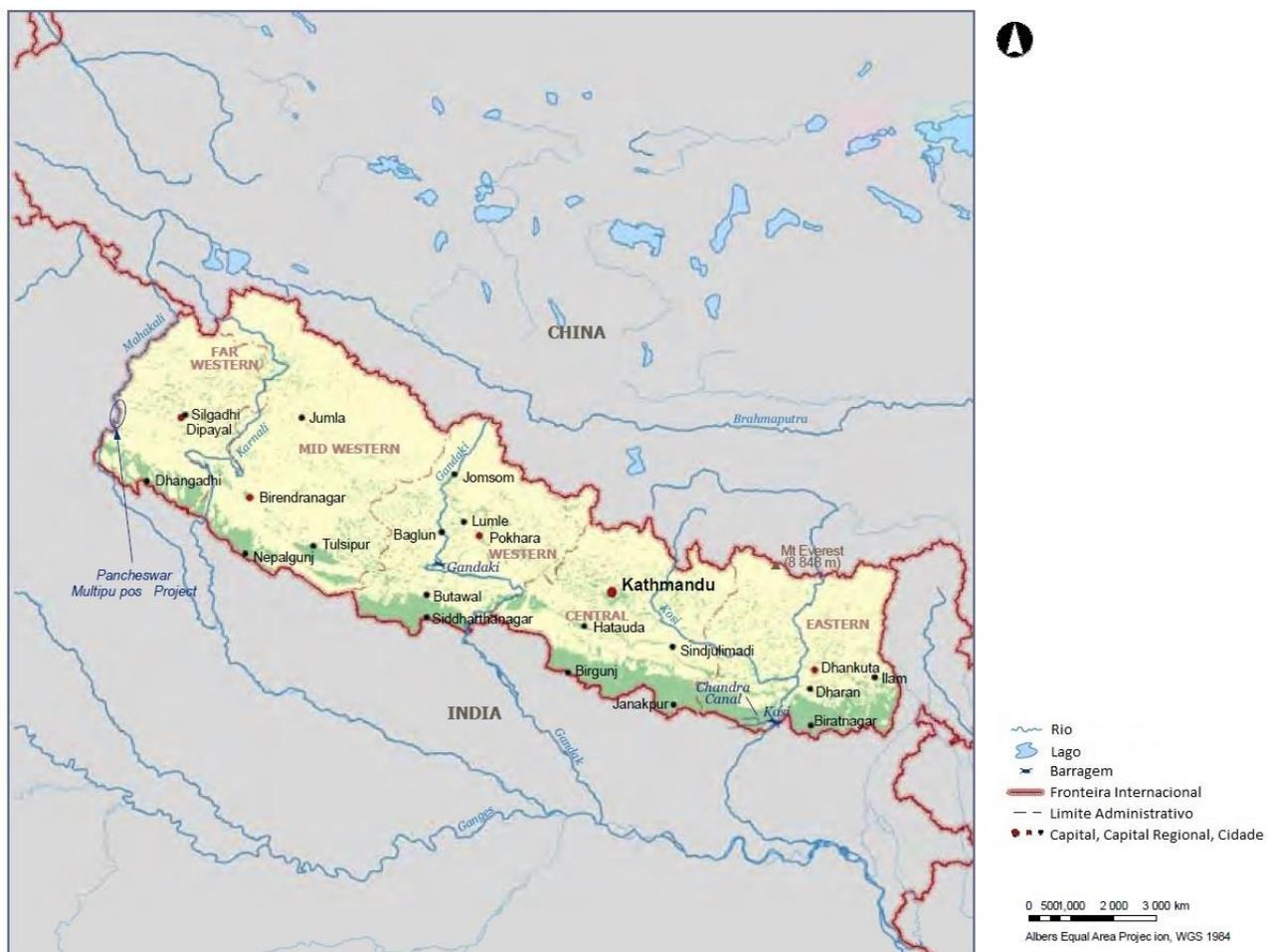


Figura 4: Mapa Administrativo do Nepal (FAO, 2011)

Com um clima variado que vai do tropical à tundra, apresenta uma pluviosidade anual média de 1500 mm, apresenta duas épocas de monções, no verão, de junho a setembro, que corresponde a

75% do total da pluviosidade. O período de inverno, de dezembro a fevereiro, representa os restantes 25%. Demograficamente estimam-se 33,5 milhões de habitantes com densidade populacional de cerca 230 habitantes por km<sup>2</sup> (CIA, 2016).

### 2.1.5. Paquistão

A República Islâmica do Paquistão tem como fronteira o Mar Árabe a Sul, Índia a Este, a Oeste o Irão, a Noroeste o Afeganistão e a Nordeste a Região de Caxemira (Figura 5). Situa-se entre as coordenadas 37° 15' e 23° 30' Norte e 61° 30' e 75° 30' Este (Google Earth, 2016), com uma área de aproximadamente 796 mil km<sup>2</sup>. Divide-se em quatro províncias administrativas: do Baluchistão e do Sindh, costeiras ao Sul, Província da Fronteira Noroeste e o Punjab, centro do país. O ordenamento

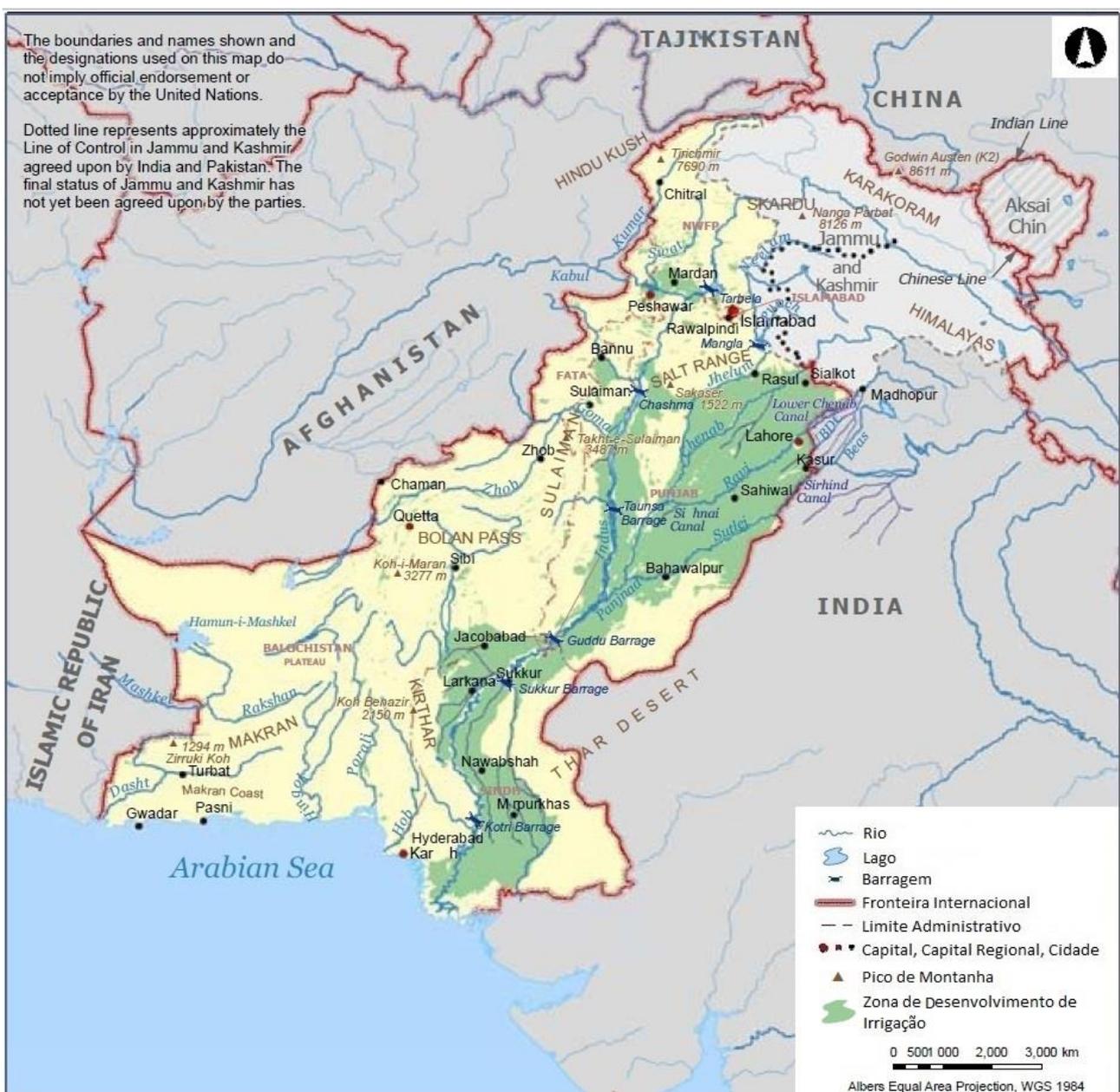


Figura 5: Mapa Administrativo do Paquistão (FAO, 2011)

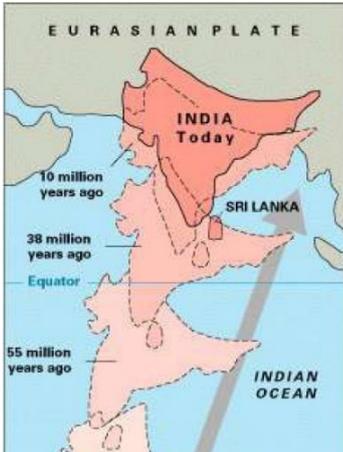
do país admite dois territórios, Território da Capital, Islamabad, e Território Federal das Áreas Tribais no centro do país. São considerados territórios disputados os de Caxemira, administrado pelo Paquistão, Caxemira Livre e Gilgit-Baltistão ao Norte. Em termos geográficos definem-se 4 grandes áreas:

- a) As Terras Altas do Norte, que incluem as cordilheiras do Indocuche, Caracoram e Himalaias com cumes para lá dos 6500 m;
- b) O Planalto de Potohar, limitado a Oeste pelo rio Indus e a Norte pela cadeia montanhosa de Kala Chitta (altitude média 450-900 m, extensão de 72 km) e pelas montanhas Margalla, a Este pelo rio Jhelum e a Sul pelas montanhas do Sal;
- c) A planície do Indus, que constitui o vale do Rio Indus, limitado a Norte pelas planícies do Sal e a Este pelo deserto do Thar, com uma extensão de cerca de 1000 km, com 350 km de abertura ao longo do Punjab e 200 km no Sindh;
- d) O Planalto do Balochistão, no Sudoeste do país, extremo Oriental do planalto Iraniano, com cerca de 347 mil km<sup>2</sup> e corresponde a cerca de metade da área do Paquistão, com uma altitude média de 600 m. A Noroeste pelo deserto e a Sul, a região do Macrão, com os cumes do Suleimão a Nordeste (FAO, 2011).

Do ponto de vista do clima, define-se como subtropical árido, onde se pode encontrar o subtropical continental, nas terras baixas, terras altas e planaltos, e ainda marinho tropical costeiro ao longo da costa. Relativamente à pluviosidade, esta é tremendamente desigual, vai de menos de 50 mm no Sindh e Baluchistão aos 1500 mm no Norte montanhoso do Punjab e do Quiber, para uma média do país de 494 mm (FAO, 2011).

O Paquistão tem cerca de 200 milhões de habitantes, com uma densidade populacional de aproximadamente 250 habitantes por km<sup>2</sup> (CIA, 2016).

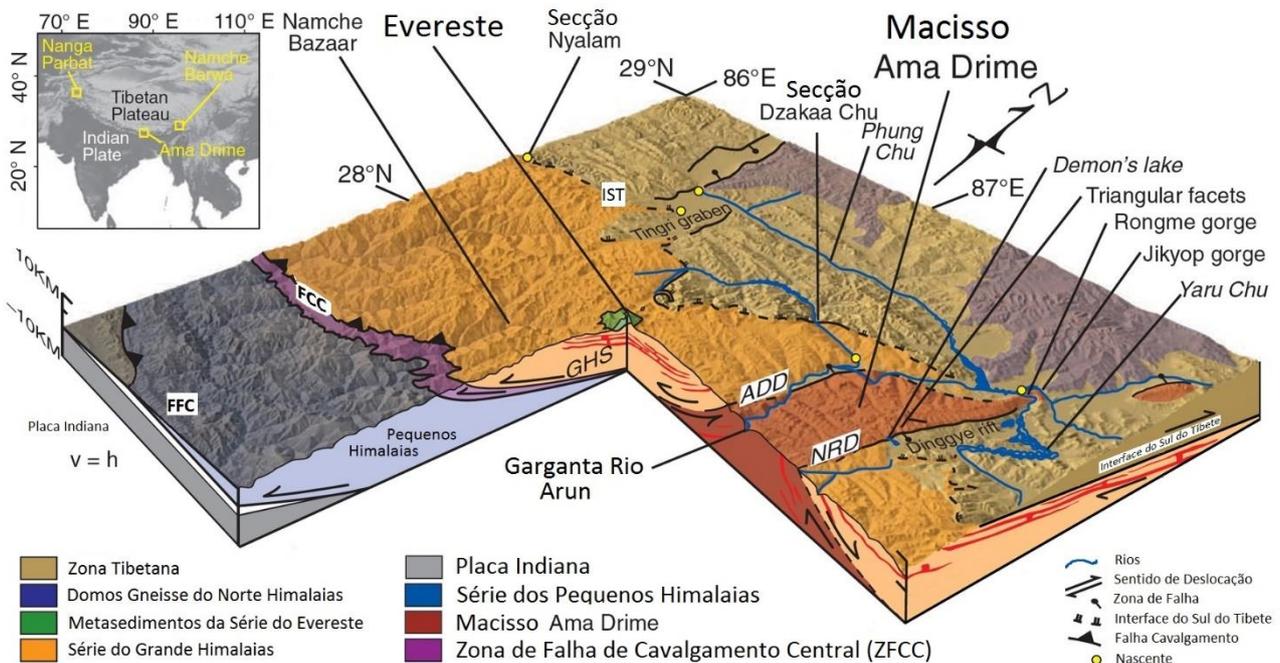
## 2.2. Geologia e Tectónica



**Figura 6:** A deriva progressiva das placas continentais Indiana e Euroasiática uma contra a outra (Benn, 2001)

Há cerca de 225 milhões de anos, o supercontinente Pangeia separa-se. Dele resultam a Laurásia (América do Norte e Eurásia) e Gondwana (América do Sul, África, Índia, Austrália e Antártica). Posteriormente, durante o Triásico, a Placa Indiana separa-se de Gondwana e começa a deslocar-se em direção ao Norte (Benn, 2001).

À medida que a placa Indiana convergia para a Asiática (Figura 6), desenvolveu-se uma zona de subducção entre as ambas, em que a crosta oceânica a Norte da Índia foi subductada debaixo da placa Asiática a um ritmo de 10-20 cm ano. Às zonas de subducção estão comumente associados fenómenos de vulcanismo que formou o que é



**Figura 7:** Esquemática da Tectónica na cordilheira dos Himalaias (adaptado de Jessup, 2013)

agora o Tibete, originado pelo material subductado durante a aproximação das duas placas continentais. Há cerca de 55-40 milhões de anos as placas Indiana e Euroasiática entraram em contacto, a partir daí a velocidade de convergência entre as placas foi se reduzindo até aos atuais 5 cm/ano. A crosta debaixo do plano de falha (Falha Central de Cavalcamento, FCC) continuou a deslocar-se para Norte, subductando a Ásia, enquanto o material por cima do plano de falha cavalgava rumo a Sul, em direção à Índia. Ao cavalcamento associaram-se dobramentos do material rochoso sobrejacente, que foi comprimido e levado, até que há 20-10 milhões de anos a FCC se tornou inativa. Uma segunda falha, Falha de Fronteira Central (FFC), desenvolveu-se a maior profundidade (Figura 7), ao longo

da movimentação que continua a elevar os Himalaias. O ritmo a que se elevam os Himalaias varia entre 1 e 10 mm por ano, no entanto, devido aos fenómenos severos de erosão que ocorrem à aquela altitude (fenómenos de gelo-degelo, sismicidade e avalanches) (Benn, 2001).

Sismicamente ativos, os Himalaias, têm um processo que não é contínuo, sendo marcado por períodos de ausência de movimento em que o *stress* vai aumentando de forma gradual até que se liberta a energia. Os últimos eventos de grande relevo foram os sismos de abril e maio de 2015 e atingiram o Nepal (principalmente), Bangladesh e Índia e tiveram no total cerca de 8800 vítimas mortais, 8600 e 200 respetivamente (Hayes, 2015).

### 2.2.1 Bangladeche

Do ponto de vista da tectónica divide-se em duas unidades principais e uma de importância secundária, que são, respetivamente, a Plataforma Continental, do Pré-Câmbrico a Noroeste (Placa Continental Indiana) e a Bacia Geosinclinal a Sudeste. Sendo que a unidade de importância secundária é a Quebra de Plataforma do Eocénico (QPE) que separa as duas unidades principais.

A geomorfologia é marcada por deltas, de Bengala e o do Ganges-Brahmaputra, que se dividem em bacias que originam depósitos aluvionares. A Bacia de Bengala vai desde, a Norte, a FCC, passando depois pelo Planalto de Shillong, com a Depressão de Sylhet, até à Bacia de Bengala. Em termos laterais é limitada pela margem do Escudo Peninsular Indiano (EPI) que segue pela Falha Marginal Ocidental (FMO) na direção SSW – NNE, sentido Norte, até à Falha Malda – Kishengargh (FMK), a Oeste e pela Faixa de Dobramento Chittagong-Tripura (FDCT) e, mais a Norte, pela Falha de Jamuna (FJ), situada no flanco esquerdo da Cadeia Montanhosa Indo-Burmanesa (CMIB) a Sudeste e a Este (Roy e Chatterjee, 2015) (Figura 8).



**Figura 8:** Imagem de satélite da parte oriental do Subcontinente Indiano denotando as unidades geomorfotectónicas da Bacia de Bengala (Roy e Chatterjee, 2015)

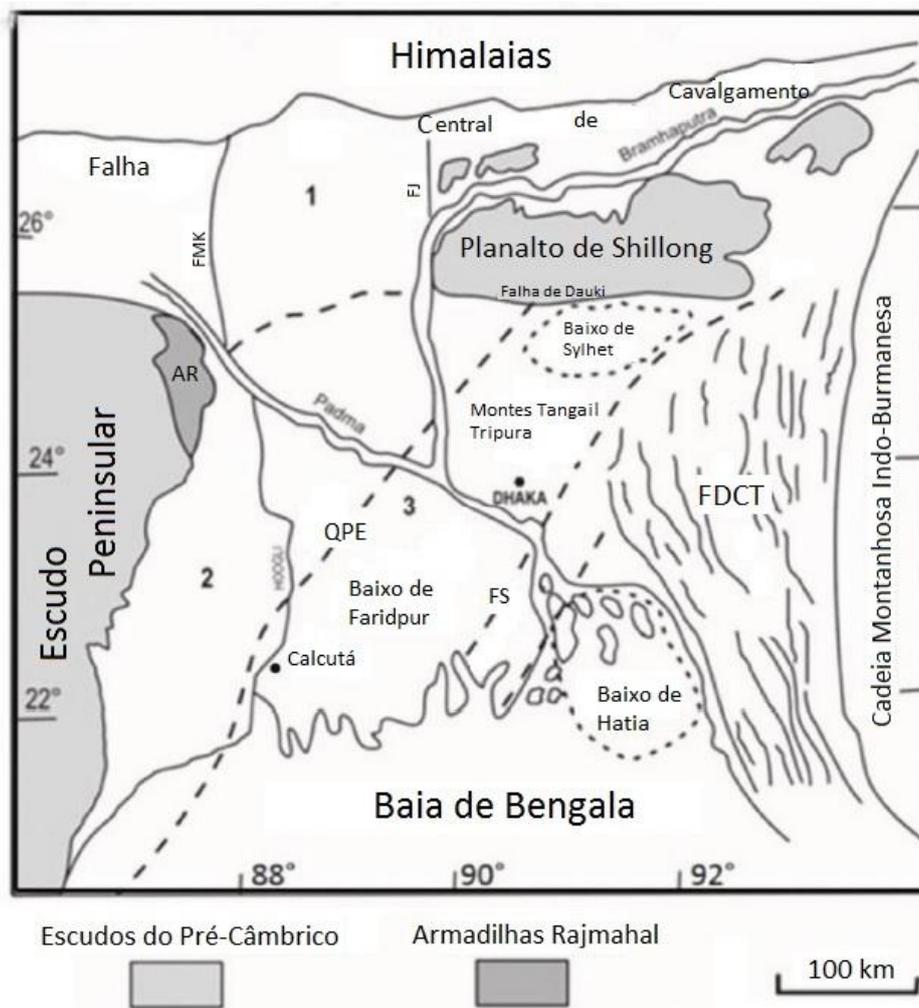
Podemos dividir a Bacia de Bengala em três subunidades, que serão as seguintes sub-bacias (Figura 9):

Sub-bacia Norte (1) – Encontra-se entre a FCC a Norte e o ponto de “sela” do Intervalo Garo-Rajmahal ao Sul, e a FMK a Oeste e a FJ a Este. Os sedimentos que a constituem são do período do Neogénico com espessura que varia entre os 128 (ao Sul) e os 1160 m, depositados sobre o Pré-câmbrico e o maciço-*rift* do Gondwana Fanerozoico.

Sub-bacia Ocidental (2) – Definida a Norte pela Sub-bacia Norte e pela Falha de Dauki, a Sudeste pela QPE e a Oeste-Sudoeste pelo EPI. Os sedimentos apresentam uma variação de espessura que vai dos 500 (próximo à margem ocidental) aos 6500 m (em Calcutá). Essencialmente constituída por solos lateríticos e laterites que vão desde o Cretáceo Inferior até ao Holocénico. Na sub-bacia ocidental identificam-se duas partes, a Norte-Centro e a Sudoeste, que se distinguem pelo número de sequências sedimentares e pela presença de basaltos na parte Sudoeste (Roy e Chatterjee, 2015).

Sub-bacia Sudeste (3) – Situada entre a QPE a Oeste, a margem mais oriental da CMIB e a Falha de Dauki e a Depressão de Sylhet a Norte, com espessura de sedimentos entre 10 e 18 km. Na base rochosa desta parte da bacia encontra-se basalto de Crusta Continental-Oceânica que se estende para ocidente, onde se podem identificar cinco domínios tectónicos, a Depressão de Sylhet, os Montes de Tangail-Tripura, a Depressão de Faridpur, os Montes de Barisal Chandpur e os Baixos de Hatia. Embora toda a Baía de Bengala esteja em subsidência, é nos Baixos que mais se nota. De facto, dados de geofísica apontam para uma zona de subsidência mais acentuada em duas zonas baixas, do Faridpur e do Hatia, separados pelos Montes Barisal-Chandpur. Podemos dividir a sub-bacia Sudeste

em três províncias geotectônicas: plataforma estável, bacia profunda e a FDCT.



**Figura 9:** Tectônica da Bacia de Bengala - as linhas descontinuas representam os limites dos domínios tectônicos (adaptado de Roy e Chatterjee, 2015)

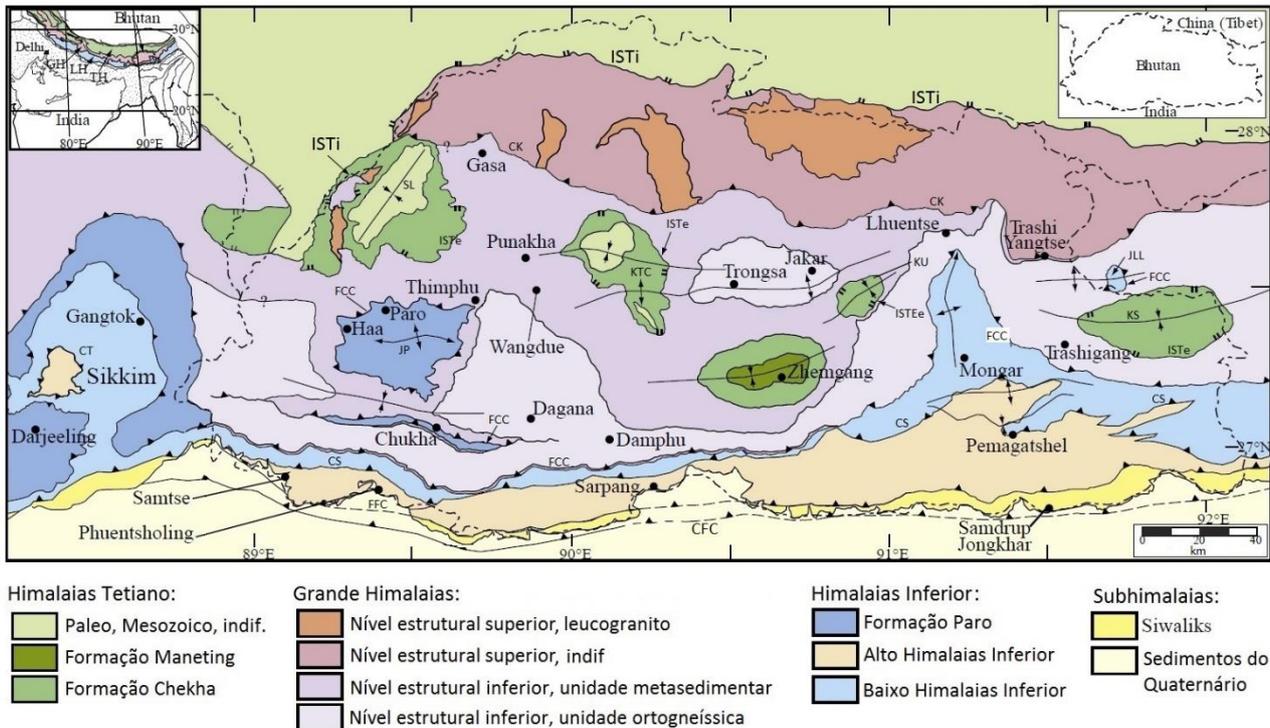
Em termos litológicos conta-se com a presença de solos com predominância de argilas e siltes. Ocasionalmente ocorrem rochas sedimentares, arenitos com cimento ferruginoso, argilitos e siltitos. De notar nas camadas mais próximas da rocha mãe a presença de basalto e andesito na Sub-bacia Ocidental, Armadilhas Rajmahal do Cretáceo Superior, nos Baixos de Sylhet, calcários de Sylhet de entre o Paleocénico e o Eocénico, com uma espessura de 250 m (Roy e Chatterjee, 2015).

*(para mais informações relativamente à geologia do Bangladeche vide Anexos 1)*

### 2.2.2. Butão

Encontra-se no seguimento das faixas de dobramento, em sequência, de Sul para Norte, o Cavalgamento Frontal Central (CFC), FFC, a uma distância variável, a Norte mais próxima que a Sul, o Cavalgamento de Shumar (CS), a FCC, para lá desta formação surgem as janelas e os klippes, de Oeste para Este, a Janela de Paro (JP) e os Klippes de Tang Chu, Sakteng e de Ura (KTC, KS e KU), a Noroeste ainda o Sinclinal de Lingshi (SL). Segue então o Cavalgamento de Kakhtang (CK),

terminando no Interface do Sul do Tibete interior (ISTI) (Figura 10).



**Figura 10:** Geologia simplificada do Butão (Tobgay et al., 2012)

Relativamente à composição de cada uma das formações, começando de Sul para Norte, nos Subhimalaias é possível encontrar sedimentos que vão do Quaternário, bem ao Sul, até aos depósitos da Formação de Siwalik, sinorogénicos com o período do Mio ao Pliocénico, até ao CFC, constituídos por rochas sedimentares, arenitos conglomeráticos grosseiros que vão, quanto ao grão, do burgau ao cascalho, e siltitos a xistos finos de espessura de camada variável, podendo atingir os 2900 m, estando predominantemente distribuídas pelo Sudeste próximo da fronteira com a Índia (Long et al., 2011b).

O Himalaias Inferiores estão subdivididos em Baixo e Alto Himalaias, que vão do Paleo-Proterozóico, Neoproterozóico-Paleozóico, constituídos por rochas metasedimentares clásticas e carbonatadas.

O Baixo Himalaias Inferior consiste na Formação Shumar, formada por quartzitos alternados com xistos e filitos de granulometria fina a média, e a Formação Daling, que consiste em xistos e filitos verdes intercalados com quartzitos, que coletivamente formam o Grupo Daling-Shumar (Tobgay et al., 2012). O Baixo Himalaias Superior é formado pelo Grupo Baxa, e pelas Formações Jaishidanda e Paro. O Grupo Baxa consiste em ardósia cinzento-escuro a preto e filito, dolomite, mármore de tonalidade branca a rosa e quartzitos de grão médio a fino, e está separada da subjacente Formação Siwalik pela FCC, a Formação Jaishidanda com espessura variável (entre 500 a 1000 m) de quartzitos ricos em biotite de cor cinzento-clara intercalada com granada que se encontra debaixo da FCC, e a Formação de Paro é quartzítica, xisto-granado-quartzítica, com mármore e, em menor

número, constituídas por rochas calco-silicatadas, intruídas mico-granadas ortognaissicas, que são, o equivalente a norte, da Formação Jaishidanda (Tobgay *et al.*, 2012).

O Grande Himalaias, no ocidente do Butão, consiste em unidades metassedimentares e ortognaissicas inferior e uma unidade superior, metassedimentar, a descoberto apenas nas áreas a Norte e a Este do mapa (Tobgay *et al.*, 2012). A unidade metassedimentar inferior é do Neoproterozóico-Câmbrico e consiste em paragnaisses com estaurolite, kianite e silimanite, xisto moscovítico-biotítico-granatífero, e quartzito que, no Butão ocidental, apresenta espessura entre os 5 e os 6 km. Domina a paisagem dos afloramentos, e está dissociada das Formações Jaishidanda, a Sul, e Paro, a Norte, junto à FCC. A unidade ortognaissica é de composição Cambro-Ordovícica granítica que instruiu protólitos sedimentares do Grande Himalaias.

A zona do Himalaias Tetiano está separada da do Grande Himalaias pela ISTe. A ISTe é uma zona de cisalhamento dúctil com sentido de rutura sentido Norte que se encontra mais próximo da frente orogénica, mais ao Sul que a ISTi ao longo dos picos do Himalaias.

O Himalaias Tetiano consiste em rochas sedimentares do Neoproterozoico ao Mesozoico depositados mais distantemente da margem Norte Indiana, de Oeste para Este, o SL é a formação mais variada com unidades, começando pela cota inferior, de mármore com filito cinza e quartzito filítico cinzento do Ordovícico ou mais recente. Em seguida, e em direção a norte, silte cinzento bandado, calcário fossilífero e diamictite clástica da dimensão de seixos, unidade do Paleozoico, seguidamente e mais a norte, xisto cinzento-escuro, fino e alterado com cerca de 2 km de espessura do Triásico-Jurássico, por fim e bem na zona de charneira do sinclinal coincidente com o rio Lingshi Chu, xisto carbonáceo cinzento-escuro a negro e arenito castanho do Cretáceo (Garzanti, 1999). O KTC que consiste em unidades que, em altitude, são formadas por xisto biotítico-moscovítico-granatífero intercalado com mármore verde a branco do Ordovícico, arenito quartzítico cinzento a castanho de grão fino (Formação Deschilling), xisto argiloso cinzento-escuro (Formação Maneting) e arenito cinzento de granulometria fina (Formação Quartzito) do Câmbrico. O Sinclinal de Zhemgang, com espessura entre 2 e 4 km, é formado por quartzito micáceo de grão médio a fino com camadas espessas de cor bronze a cinzenta, com presença de fácies xistosas verdes, e ao longo da zona de charneira, a Formação Maneting, o KU (Pzc). O KS é constituído pela Formação Chekha (Long *et al.*, 2011a).

*(para mais informações relativamente à geologia do Butão vide Anexos 2)*

### 2.2.3. Índia

Ao contrário dos outros países do Sul da Ásia, a Índia possui, no seu espaço territorial, toda a litologia que diz respeito ao choque entre a Plataforma Continental Indiana e a Euroasiática, com

formações desde os cratões do Pré-Câmbrico até às bacias sedimentares do Quaternário.

A Norte, na fronteira com a China, surge a continuação da sequência de colisão de placas (Figura 7) que dá para a grande Bacia Sedimentar Indo-Gangética que atravessa a Índia de Oeste a Este, de origem tectónica e climatérica em diversos graus e níveis (Kumar *et al.*, 2007), é alimentada pelos sedimentos provenientes dos Himalaias e começa a Norte na zona Siwalik (Miocénico médio ao Plistocénico tardio) até à Falha Frontal Himalaia (FFH). A partir daí entra o domínio dos cones aluvionares do Quaternário que se dividem em superior, médio e inferior, classificados a partir das taxas de sedimentação e subsidência, e que, respetivamente, se definem pelas seguintes características: rios incisivos a cotas mais altas, constituídas por solos moderada a bem desenvolvidos, com eflorescência de sal e solos calcários. A segunda, com elevado nível de subsidência e a presença de mega cones aluvionares, composta por sedimentos fraca a moderadamente desenvolvidos. A terceira é essencialmente sedimentação deltaica (Pati *et al.*, 2015). Na orla da BSIG a Oeste (Figura 11) encontram-se como estruturas relevantes, a Armadilha de Deccan principal, situada entre os Cratões de Aravalli e Bundelkhand a Norte; o *Rift* de Mahanadi a Este; o Golfo do Cutch a Oeste e a Sul os Cratões de Baster e de Dharwar e, atravessados pelo *Rift* de Narmada, a Península de Kathiawar é ela toda um cratão, tendo, no seu litoral, formações aluvionares.

Surgem, associados aos limites do corpo principal da Armadilha de Deccan, diques ultramáficos (Figura 12). O vulcanismo de Deccan começou há entre 67 a 69 Ma e estendeu-se até ao 61 Ma, constituído por dilúvios basálticos que nos Ghats Ocidentais vai dos 100 m de espessura na orla oriental até aos 3 km na zona em que se encontram os diques (Ju *et al.*, 2013).

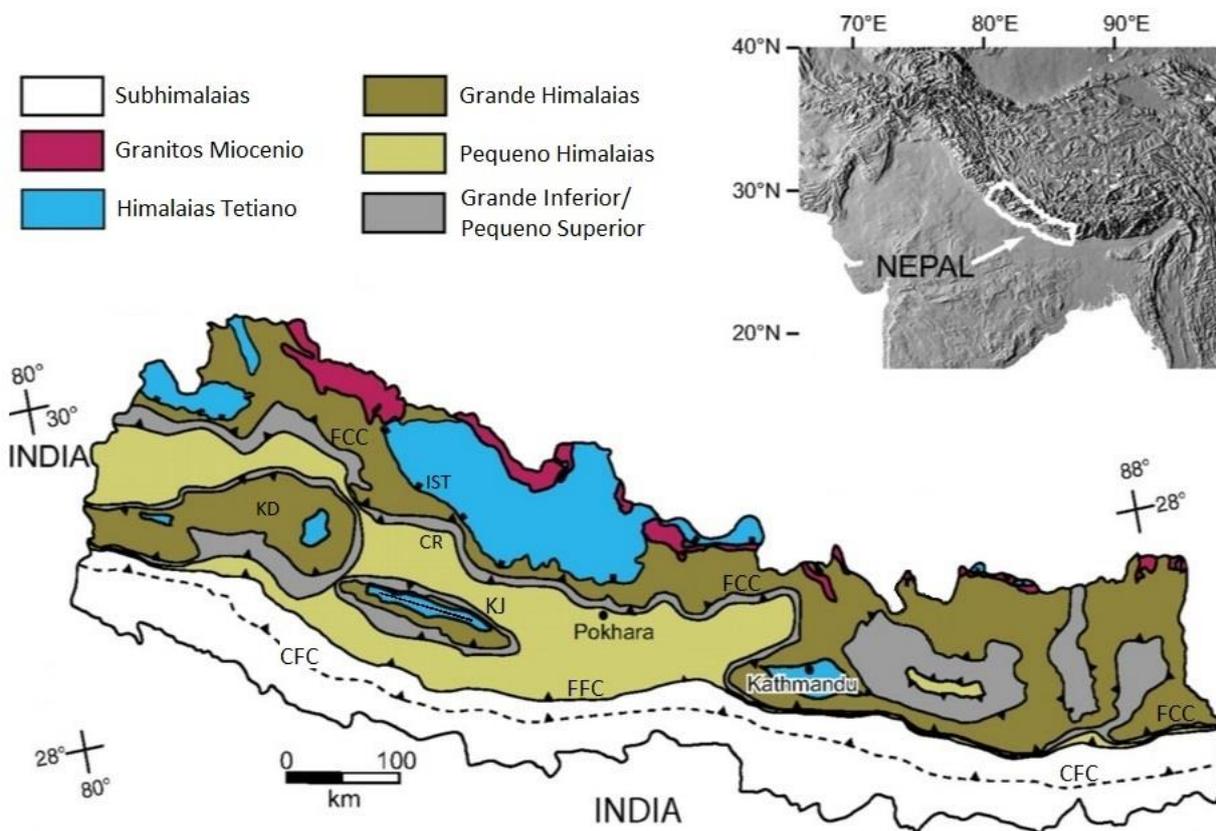
Relativamente ao Escudo Indiano, está dividido em 2 blocos proto-continentais (Figura 11), o Bloco Sul Indiano (BSI, Cratão Dharwar-Bastar-Singhbhum) e o Bloco Norte Indiano (BNI, Cratão Aravalli-Bundelkhand) do Proterozoico, ocorrendo a sua junção no Arqueano e Proterozoico, por processos proto tectónicos de placas (Ju *et al.*, 2013), que evoluíram para uma formação singular há cerca de 1,9 a 1,6 Ga durante o evento de amalgamento Columbia ao longo da Zona Tectónica Centro Indiana (ZTCI) que se estende por mais de 700 km com orientação E-W (Ozha *et al.*, 2016). São constituídos por associações gnáissicas com idades entre os 3,4 a 2,4 Ga, que fazem fronteira em zonas de cisalhamento deformadas e metamorfizadas, ou sistemas de falhas principais (Ju *et al.*, 2013). A Sul situam-se os Terraços Granulíticos do Sul (TGS) do Arqueano tardio a Neoproterozoico, compostos por blocos de elevado grau de metamorfismo, intercaladas por séries, nas de zonas de cisalhamento, do Neoproterozoico (Ju *et al.*, 2013).

Ao longo da costa Este surge, ao longo de 600 km no sentido NE-SW, a Cintura do Ghats Oriental (CGO), que data do Proterozoico, onde se podem encontrar formações de natureza: granítica-gnáissica; séries charnoquíticas; séries khondalíticas e séries de granitos. Os granitos

gnáissicos são constituídos por gnaisses graníticos de granada, gnaisses graníticos cinzentos e gnaisses graníticos porfiríticos. A série charnoquítica apresenta granitos, dioritos, gabros, noritos, anfíbolitos e piroxenitos. A série khondalite consiste em gneisses, xistos, quartzitos e granulitos, metamorfoseados de sedimentos argilosos, arenosos e calcáreos. Quanto aos granitos, incluem granitos rosa e pegmatitos (Sriramadadas, 1967).

#### 2.2.4. Nepal

No seguimento da formação Himalaia, com cerca de 800 km começando no rio Mahakali a Oeste até ao rio Tista a Este, o Himalaias Nepalês (Figura 13) apresenta a maior divisão da formação (Dahal, 2006).



**Figura 11:** Mapa das Zonas principais do Nepal. De referir a presença do Klípe de Dadeldhura (KD) e o Cavalgamento de Ramgargh (CR) (adaptado de Larson, 2012)

O Himalaias Nepalês tem como principais zonas geológicas (Figura 14) a Zona de Terai, que faz parte da área mais a norte da Planície Gangética, formação essencialmente sedimentar, que vai desde o EI, ao Sul, até ao Subhimalaias, ao Norte (Siwalik). Encontra-se a uma cota cerca de 200 m acima do nível do mar com uma espessura por volta dos 1500 m e consiste em sedimentos da dimensão de burgaus, cascalho, silte e argila. Com extensão que varia entre os 10 a 15 km, forma uma cintura quase contínua de Este a Oeste, interrompida pela formação Siwalik nos vales Chitwan e Rapti. É constituída por sedimentos originados por picos na parte Norte, separada da formação

Siwalik pela CFC, sendo que em certos locais a Siwalik se encontra sobre sedimentos recentes da Terai. O Norte da Zona Terai (Zona Bhabar) é constituída por matações, blocos e seixos resultantes de formações areníticas, e a Zona Terai Média (pantanosa) é constituída por sedimentos da granulometria de seixos castanho a cinzentos e areias, não consolidados com parcelas de argila, de cor cinzento-escuro, intercalados com camadas de areias de cor castanha. A Zona Sul Terai, que faz fronteira com a Índia, é constituída por sedimentos de granulometria fina, areias, siltes e argilas (Dahal, 2006).

A Zona Subhimalaia (ou Siwalik), limitada a Sul pela CFC e a Norte pela FCC, consiste em depósitos fluviais do Neogénico e estende-se pela Cordilheira Himalaia, com largura entre 8 a 50 km, em que o Himalaias Inferior cavalga em direção e sentido a Sul para o Siwalik, tendo concomitantemente cavalgado no sentido Este-Oeste; encontra-se dividida em 3 zonas. O Baixo Siwalik, constituído por camadas de arenitos, siltitos, e lamitos de grão fino com camadas espessas que variam do vermelho, ao violeta e cinzento. O Siwalik Médio, constituído por camadas alternadas e de espessura variada (1 a 45 m) de lamitos e arenitos grosseiros, encontrando-se na parte superior arenitos de grão mais grosseiro. O Siwalik Superior, que consiste em conglomerados e camadas de blocos alternados com camadas de areias e siltes acompanhadas por lamitos de camadas espessas com fósseis de invertebrados. A parte superior da sequência apresenta camadas de conglomerados de grão de dimensão de blocos e seixos sub-angulares com origem no Himalaias Inferior (Dahal, 2006).

A Zona do Himalaias Inferior é limitada a Norte pela FCC e a Sul pela FFC, apresenta sequências alóctones, trazidas por cavalgamento do Norte, constituídas por rochas metamórficas de alto grau, gneisses e xistos, e autóctones, constituídas por rochas de baixo grau de metamorfismo, xistos. Apresentam formações sedimentares e meta sedimentares, são compostos por xistos argilosos, quartzitos, calcários e dolomitos, com origem que vai do Pré-câmbrico ao Eocénico. A serra de Mahabharat por sua vez é formada por granitos, e encontra-se na orla proximal ao Himalaias Superior, e acessoriamente, por mármore e gnaisses (Dahal, 2006).

A Zona do Himalaias Superior, limitada a Sul pela FCC e a Norte pelo sistema de IST, consiste em formações altamente metamorfizadas de grão grosseiro, de espessura que pode chegar aos 10 km, apresenta gneisses com cianite e silimanite, xistos e mármore (Dahal, 2006).

A Zona do Himalaias Tetiano do Tibete é a que se encontra mais a Norte, começa na IST e vai até ao Tibete, é caracterizada pela presença acentuada de fósseis nas formações rochosas das áreas de Mustang, Manang e Dolpa. Encontra-se presente nos picos do Himalaias, Annapurna, Manaslu e Dhaulagiri, e cume do Evereste, e é constituído por rochas sedimentares, xistos argilosos, calcário e

arenitos, que vão do período Câmbrio ao Eocénico (Dahal, 2006).

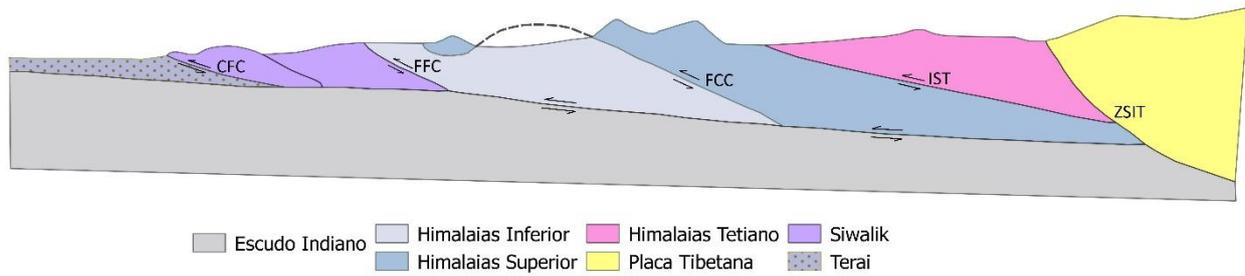


Figura 12: Esquema representativo das Zonas no Himalaias Nepalês (adaptado de Dahal, 2006)

### 2.2.5. Paquistão



Figura 14: Placas Euroasiática (Eurasian Plate), Arábica (Arabian Plate) e Indiana (Indian Plate) no Paquistão (Pakistan) (adaptado de Brumfiel, 2006)

A geologia do Sul da Ásia é marcada pela bacia sedimentar Indo-Gangética que vai da Índia até ao Paquistão. Na parte paquistanesa termina na fronteira de placas entre a Placa Indiana e a Euroasiática, com a mesma sequência de estruturas concomitantes à convergência de placas, semelhante à verificada na cordilheira Himalaia, sendo que mais a Sul surge a placa Arábica (Figura 15). Tais estruturas são, de Norte para Sul, o Bloco Karakorum (BK), formações sedimentares, metassedimentares e ígneas fortemente deformadas que colidiu com o Arco Ilha de Kohistão (AIK) ao longo do Cavalgamento Principal de Karakoram (CPK), do

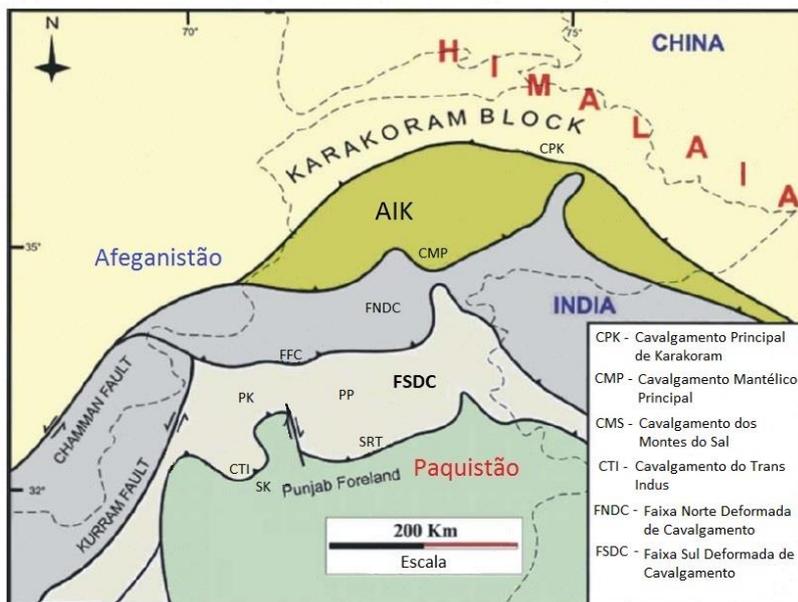
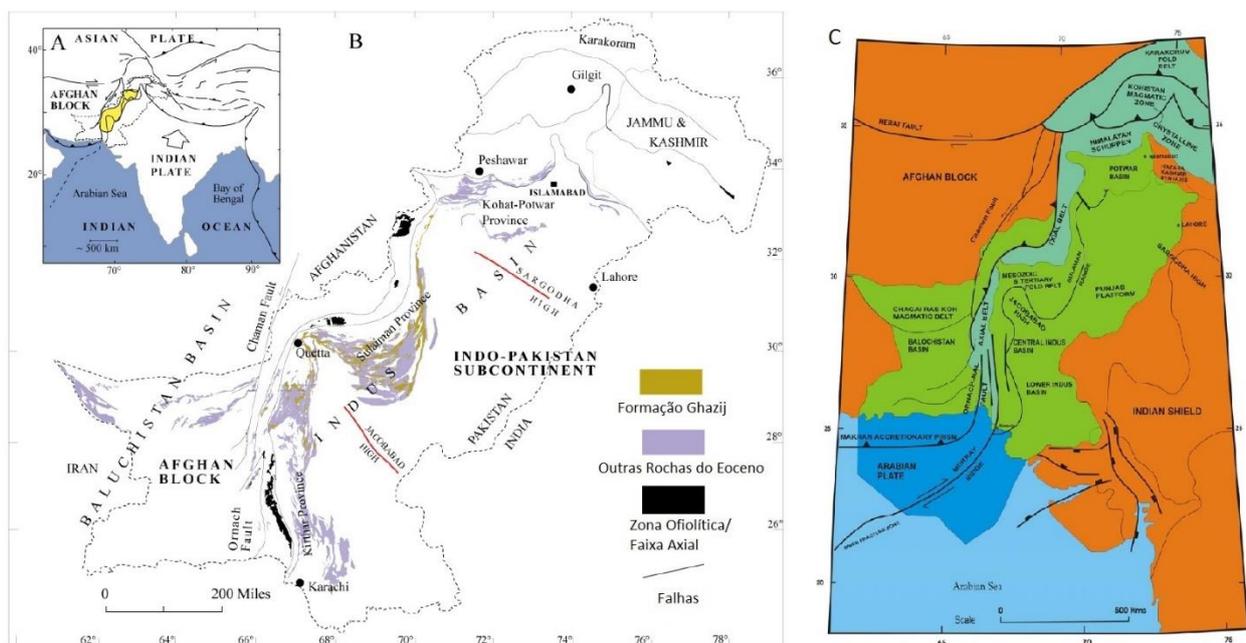


Figura 13: Tectónica do Norte do Paquistão (adaptado de Ali, 2010)

Cretácico tardio, que constitui o limite Sul do BK. Entre o CPK e o Cavalgamento Mantélico Principal (CMP), que resulta da obdução, fica o AIK, originado pela subducção do Neo-Tétis pela Placa Asiática durante o Jurássico tardio ao Cretácico com a colisão a ocorrer há cerca de 50 a 55 Ma, é constituída por rochas ígneas, plutónicas e vulcânicas, máficas, ultra-máficas e calco-alcalinas,

com cerca de 40 km de espessura. Entre a CMP, a Norte, e a FFC, a Sul, localiza-se a Faixa Norte Deformada de Cavalgamento, preenchida por formações sedimentares, meta-sedimentares e ígneas, que vai da área de Kurram, a Oeste, até à Bacia de Cachemira, a Este. A Sul da FFC e a Norte do Cavalgamento da Serra do Sal (CSS), a Este e a Oeste no Cavalgamento do Trans Indus (CTI), fica a Faixa Sul Deformada de Cavalgamento (FSDC), orientada Este-Oeste, depósito dos sedimentos sinorogénicos fluviais que começaram no Miocénico e pode ser dividido em duas províncias tectónicas, o Planalto de Kohat e Planalto de Potwar (PP), sendo que o PP, assim como a Serra do Sal, resultam de blocos alóctones de calcário, acompanhados por faixas evaporíticas do Eo-Câmbrico, sobre formações metamorfoseadas (Ali, 2010).



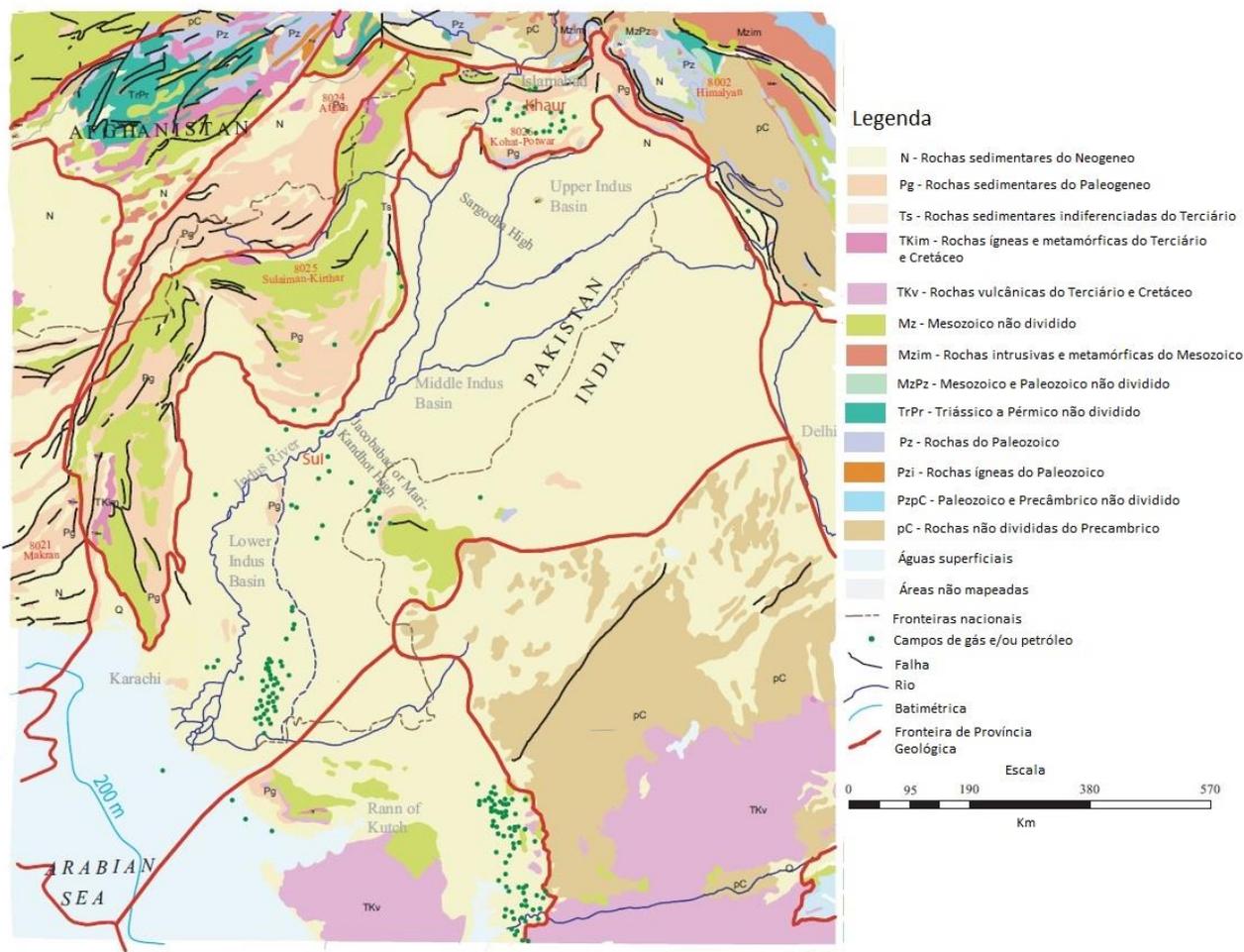
**Figura 15:** A - Inserção do Paquistão no Sul da Ásia; B - Estruturas geológicas significativas (Khan e Clyde, 2013); C - Principais Bacias do Paquistão (Ali, 2010)

A Bacia do Indus é o elemento geomorfológico dominante da geologia do Paquistão, representando dois terços da área do País. É limitada a Norte pela FFC, ao Sul pela costa, a Este pela Serra de Murray e a Oeste pela Faixa de Dobramento de Kirthar, e divide-se em três partes (Saleem, 2013) (Figura 15):

- O Indus Superior, ou Bacia Kohat-Potwar, vai da Falha Parachinar-Muree a Norte até às Formações da Serra do Sal e de Surghar, a Este, pela Falha de Jehlum e, a Oeste, pela Falha Kurram (Asif, 2010).

Divide-se em 2 estruturas principais, a Formação de Kohat e a de Potwar, fazia parte de uma plataforma continental de pouca profundidade onde se depositaram carbonatos, siltes-argilas e areias ao longo do Jurássico tardio, como resultado surgem camadas alternadas de xistos argilosos e carbonatos da Formação Springwar do Grupo Sulaiman, este último do Jurássico Médio e Superior.

Apresentam-se formações areníticas e xisto-argilosas com seqüências de flysch, assim como de evaporitos, gesso e anidrite na Formação do Sal (Wandrey *et al.*, 2007).



**Figura 16:** Breve geologia da Bacia do Indus (adaptado de Wandrey *et al.*, 2007)

- O Indus Médio, entre os Montes Sargodha e a Margem Sudoeste dos Montes Jacobabad, é constituído por uma espessa camada aluvionar (PPIS, 2010a) conhecida por Molassos do Indus, Formação do Indus ou Formação Kargil, carbonatos, xistos argilosos, arenitos (Henderson *et al.*, 2010) em seqüências que se vão afastando do Rio Indus. Tanto no seu trajeto, como no dos tributários, encontram-se sedimentos aluvionares do Quaternário, surgindo então flysch e molasso do Neogénico, com presenças de depósitos fluviais do Pleistocénico. No meio do deserto de Thar surgem formações do Jurássico, principalmente, ao Paleocénico, em menor expressão (Haghipour *et al.*, 2009);

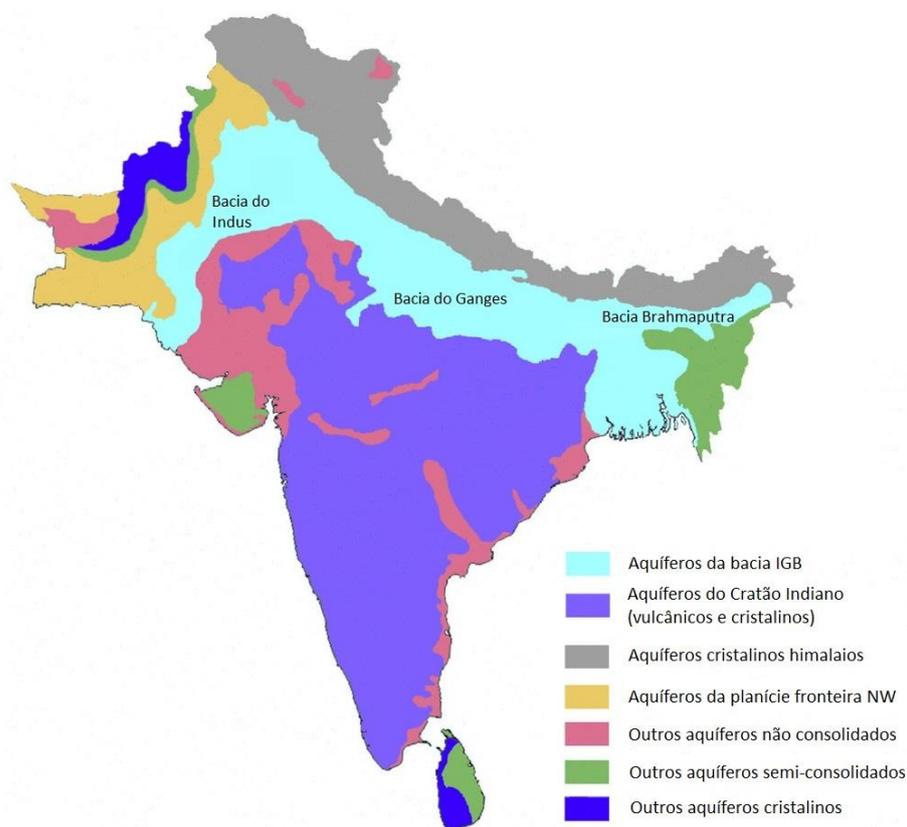
- O Indus Inferior, encontra-se limitado a Norte pela Bacia do Indus Médio, a Noroeste pela Bacia da Faixa de Dobramento de Sulaiman e a Sudoeste pela Bacia da Faixa de Dobramento de Kirthar, com ocasional presença de depósitos de vulcanismo por *hotspot*, falhas transformantes esquerdas concomitantes à seqüência de afastamento da Placa Indiana da ilha de Madagáscar no Cretácico-Terciário. Representa o fim do trajeto do Indus, e é constituída pelas mesmas formações do

Índus médio, exceto no extremo Sudeste, onde aflora a base Pré-Câmbrica (PPIS, 2010b);

Na costa do Índico, Sul-Sudoeste do país, situa-se o Bloco Afegão da parte paquistanesa, que vai desde a Falha de Ornach-Nal ao Sul e a Este pela Faixa Axial e da qual faz parte a Bacia do Balochistão que é caracterizada por formações calcárias, areníticas, lamíticas e vulcânicas do Cretácico tardio e Terciário (PPIS, 2010c).

### 3. Províncias de águas subterrâneas

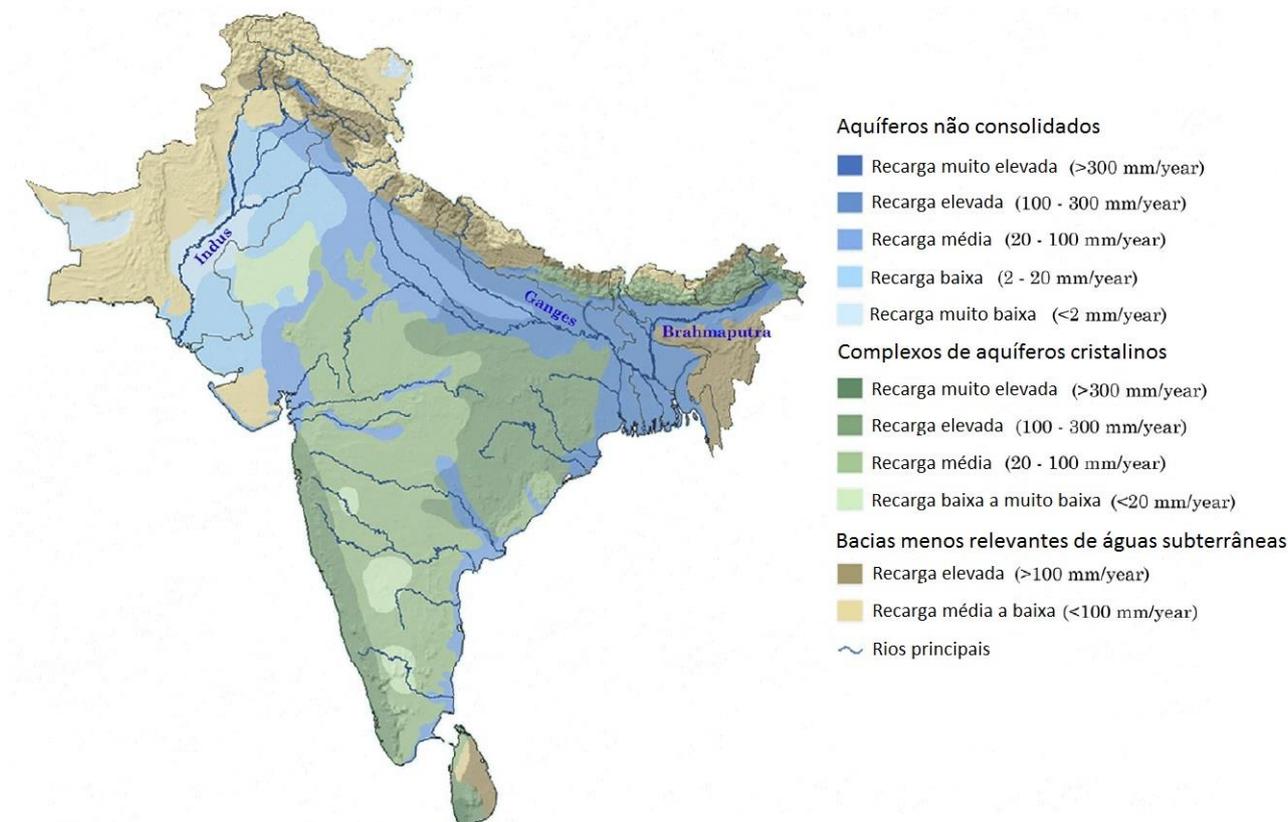
A Ásia é o maior e mais populoso continente do planeta (Zaisheng e Hao, 2006) que representa cerca de 3,2% da área do planeta e por volta de 23,2% da população mundial (FAO, 2013) com valores de precipitação que vão dos 2600 mm/ano (Bangladeche) aos 494 mm/ano (Paquistão). Como bacia dominante do Sul da Ásia, temos a formada pela drenagem dos rios Indus, Ganges e Brahmaputra, que formam a grande Bacia Indo-Gangética, a qual apresenta alguns dos aquíferos mais produtivos do mundo. Estamos a falar de uma grande bacia que é transfronteiriça, a Bacia do Indus (Figura 19) atravessa a Índia até ao Paquistão, e a Bacia do Ganges e Brahmaputra, Índia e Bangladesh, que recebe, a cada ano hidrológico, mais de 4000 mil milhões de metros cúbicos ( $mMm^3$ ) de água, sendo que quase metade se perde por um fraco entendimento dos processos e sua quantificação (*e.g.* escoamento superficial, entrada nos rios para o oceano, intrusão salina, evaporação, evapotranspiração, etc.) (Mukherjee *et al.*, 2015).



**Figura 17:** Natureza dos aquíferos do Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee *et al.*, 2015)

Estima-se que na região do subcontinente indiano exista uma extração de cerca de  $340 mMm^3$  de águas subterrâneas que corresponde ao maior volume explorado numa região no mundo (FAO, 2013). Está a sofrer aumento da procura de água subterrânea por via da mudança dos padrões de consumo que advêm da crescente urbanização das populações, assim como de estilos de vida. Por outro lado, o hábito tem sido o de usar as águas superficiais como espaço de esgoto, o que a torna

inutilizável para consumo humano. O consumo acaba então por incidir em águas subterrâneas e de precipitação. As águas subterrâneas representam 60 a 80 % do consumo doméstico e mais de 85 % da extração de águas para rega agrícola, sendo que a incidência de consumo é maior na parte gangética (Mukherjee *et al.*, 2015).



**Figura 18:** Distribuição espacial da capacidade de recarga dos aquíferos do Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee *et al.*, 2015). Não se encontra à escala.

Uma questão que surge como preocupante é a presença de contaminantes naturais, arsénio (As), flúor (F) e salinização. No caso do Bangladesh a questão do arsénio é tida como sendo “o mais grave caso de envenenamento em massa da humanidade” (Smith *et al.*, 2000). Por outro lado surgem contaminantes de origem antrópica, como nitratos, pesticidas, antibióticos, sendo os aquíferos do Ganges vulneráveis à poluição por pesticidas sintéticos e fertilizantes químicos, associado ao crescimento da prática de agricultura intensiva (Mukherjee *et al.*, 2015).

A extração para agricultura nos aquíferos, quer aluvionares do Indo-Ganges-Brahmaputra (IGB), quer nos cristalinos poucos produtivos do Cratão Indiano, à qual se junta um cenário de contaminação por agentes não antrópicos, coloca a generalidade do Sul da Ásia com áreas de *stress* hídrico. A isso acresce ainda a redução dos níveis de precipitação entre 1979 e 2005 que, juntando às perspetivas de aumento populacional, levam a pensar num cenário de declínio acentuado da disponibilidade hídrica, se não for gerido de forma adequada. Torna-se ainda mais problemático ao contabilizar os efeitos do aquecimento global. Os aquíferos principais são alimentados pelo fluxo

resultante do degelo dos glaciares (Mukherjee *et al.*, 2015).

### 3.1. Bangladesh

De entre os países do subcontinente Indiano é o que apresenta maior precipitação, com cerca de 80% da precipitação anual a ocorrer entre junho e setembro, no tempo das monções. Por sua vez, a topografia de grande parte do país e o regime de descarga do sistema de rios Ganges-Brahmaputra-Megna (GBM), forma a maior planície deltaica do mundo, englobando o Centro e Sul do país. Para além destes grandes rios, possui ainda por volta de 230 cursos de água, muitos deles tributários ou distributários do GBM. Estas circunstâncias fazem com que, estimados 80 % da área terrestre seja de sedimentos aluvionares férteis, que se traduz em mais de 50 % dos espaços agrícolas a terem duas ou mais safras (FAO, 2015). O que faz com que, associado à possibilidade de encontrar águas subterrâneas a profundidades de 5 m em boa parte do território, cerca de 79 % da extração de água seja para rega (FAO, 2015). Este ritmo leva a um *stress* que conduziu a uma queda de capacidade de armazenamento entre 0,5 a 0,8 km<sup>3</sup>/ ano entre 2003 e 2007, tendo sido verificado um declínio acentuado nas cotas piezométricas em torno da capital, Daca (Mukherjee *et al.*, 2015).

O fluxo dos aquíferos ocorre de Norte para Sul, com variações particulares na vizinhança de cursos de água relevantes, e tem-se alterado por via da exploração extensiva, com consequência no aumento das taxas de recarga dos aquíferos e da capacidade de armazenamento (Mukherjee *et al.*, 2015). Às questões da extração de recursos hídricos, juntam-se as ambientais, disseminadas um pouco por todas as cotas piezométricas, e relacionadas principalmente com arsénio. Fenómeno com incidência na zona costeira, cada vez mais suscetível, é o da intrusão salina associada à subida do nível do mar (Mukherjee *et al.*, 2011).

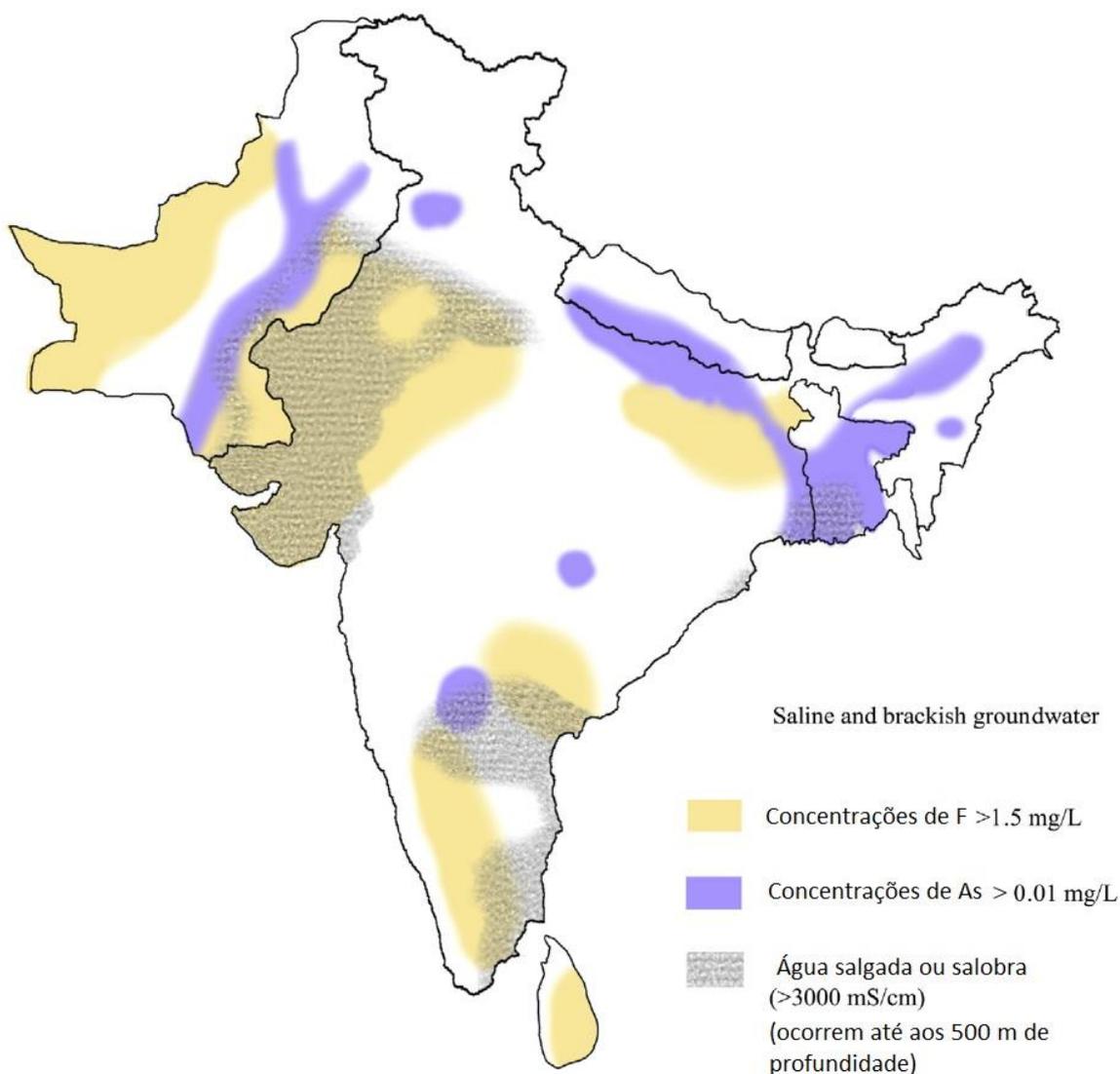
### 3.2. Butão

É o menor país considerado em termos de área territorial e de população, apresenta as suas grandes características geomorfológicas ligadas ao Himalaias e, da mesma forma, os aquíferos que o compõem são de formações cristalinas fraturadas, têm uma disponibilidade muito limitada, produtividade igualmente variada e estão dependentes da fraturação originada pela tectónica do Himalaias (Mukherjee *et al.*, 2015). O padrão anual de precipitação é altamente variável, entre os 477 e os 20461 mm (FAO, 2015), em que as monções vão de junho a setembro, onde ocorre entre 60 a 90 % do total da precipitação, e são a principal fonte de recarga dos aquíferos que constituem, a par da escorrência de águas superficiais, o sustento da população (Mukherjee *et al.*, 2015).

### 3.3. India

O maior país de entre os analisados em termos de extensão territorial e número de habitantes. Grande parte do país tem valores de precipitação, entre 750 e 1500 mm/ano sendo esta mais baixa nas regiões ocidentais (<150 mm/ano) e com os maiores valores para as áreas a Nordeste (>2500 mm/ano). A precipitação ocorre maioritariamente durante a monção Sudoeste, que vai de junho a setembro.

Os aquíferos estão ligados às bacias dos maiores rios que drenam o país. Estes podem-se dividir em 20 grandes bacias, que por sua vez se subdividem em 4 grupos, de acordo com padrões de fluxo e origem: os rios Himalaias (Ganges, Brahmaputra e Indus), com origem nos glaciares e neve em altitude, que são perenes ao longo do ano hidrológico; os rios do cratão Indiano (Mahanadi, Godavari, Krishna, Pennar, Cauvery, Narmada and Tapi), maioritariamente alimentados por água das chuvas e por escoamento base; os rios costeiros, não perenes; e os rios dos desertos ocidentais circunscritos a pequenas bacias fluvio-eólicas alimentadas por água das chuvas e, desconexas dos sistemas de águas subterrâneas (FAO, 2015).



**Figura 19:** Presença de contaminantes em águas subterrâneas no Sul da Ásia (adaptado de Mukherjee *et al.*, 2015) (não se encontra à escala; para fins indicativos)

A bacia hidrográfica do Ganges é o maior sistema fluvial do país com uma área de aprovisionamento de cerca de 61,1 milhões de hectares. A bacia do IGB drena as planícies do Norte da Índia, formando um sistema regional de aquíferos aluviais, tido como um dos mais produtivos do mundo. Em contraste, o restante do país apresenta disponibilidade hídrica reduzida. Os aquíferos ao Norte apresentam-se porosos e permeáveis, e podem ser do tipo sedimentar aluvial, tanto não consolidados, como semi-consolidados. Os aquíferos fraturados são essencialmente constituídos por rochas cristalinas do Pré-Cenozoico, formações sedimentares consolidadas e fluxos basálticos de múltiplas camadas do cratão Indiano (Mukherjee *et al.*, 2015).

Ao longo do IGB ocorre intensa atividade de rega, derivada da ocupação humana, a mais elevada do país, assim como da fertilidade dos sedimentos da bacia. Os recursos de água renováveis estimam-se em 433 mMm<sup>3</sup> com extração de cerca de 246 mMm<sup>3</sup> em 2011, dos quais 223 mMm<sup>3</sup> (~90 %) para rega e os restantes 23 mMm<sup>3</sup> para uso doméstico e industrial (Mukherjee *et al.*, 2015).

O aumento da procura de bens agrícolas levou a que entre 1950 e 2000 a produção desses bens quadruplicasse (50 para 204 milhões de toneladas). Tal pressão provocou uma perda acentuada da capacidade de armazenamento dos aquíferos ao longo do Sul da Ásia, onde se verifica um declínio de mais de 4 m em termos de média década a década. Identificados em oitenta e seis distritos de dez estados indianos, a essa questão adiciona-se a da poluição, agravada pelo regime extensivo de exploração (Mukherjee *et al.*, 2015).

Como no Bangladeche, apresenta aquíferos com elevadas concentrações de As, assim como outros com concentrações elevadas de F, associados a aquíferos cristalinos em dezanove estados, de ferro (Fe) e nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Igualmente preocupante é o fenómeno da intrusão salina nas zonas costeiras do Mar Árábico e da Baía de Bengala. A salinização de aquíferos ocorre também por dissolução de formações minerais ou por poluição agrícola (Figura 19) (Mukherjee *et al.*, 2015).

### 3.4. Nepal

Os aquíferos do Nepal são, na sua maioria, fraturados, formados por rochas cristalinas. Encontram-se por todo país, com exceção à zona sul do país, a zona de Terai, que faz parte das formações Siwalik, de natureza sedimentar fluvial, e que datam do Quaternário. Estes formam cones aluvionares, aos quais se associam aquíferos com camadas de aproximadamente 300 m de espessura. Por sua vez, a região de Terai contribui com sedimentos e elementos dissolvidos, que alimentam os rios do Norte da Índia (Mukherjee *et al.*, 2015).

A população encontra-se sobretudo (90 %) nas zonas mais a Sul do país, aproveitando os aquíferos não confinados altamente produtivos. Por outro lado, esta é também uma área fortemente poluída por As até à base dos mesmos (Mukherjee *et al.*, 2015). Cerca de 98 % da água extraída está associada a rega (FAO, 2013).

### 3.5. Paquistão

O Indus é o principal rio e constitui o maior sistema fluvial do país, flui de Norte para Sul, e é alimentado por cinco grandes rios tributários (Jhelum, Chenab, Ravi, Beas e Sutlej). A bacia do Indus cobre por volta de 65 % do território do país (FAO, 2015). Os aquíferos das províncias do Sindh e do Punjab estão em formações aluviais do Quaternário em tudo semelhantes aos do sistema aluvial do Ganges presentes na Índia e Bangladeche, e provêm dos Himalaias Ocidentais. Originam aquíferos não confinados. Têm como grandes diferenças o facto de ser uma zona mais árida e de ter maior proporção de aquíferos do Pleistocénico, recebendo cerca de dois terços do total da precipitação entre julho e setembro (Mukherjee *et al.*, 2015).

Em termos de clima, o Paquistão varia entre o semiárido e árido, com valores anuais de precipitação que variam entre o baixo e o muito baixo. Na planície do baixo Indus a média anual é de 100 mm enquanto no Indus superior no sopé das montanhas ao Norte, é de 750 mm (Mukherjee *et al.*, 2015).

No que diz respeito à ocupação agrícola, no ano de 2009 estavam cultivados 20 milhões de ha (FAO, 2015). Do ponto de vista da exploração, as águas subterrâneas contabilizavam 94% do total usado para rega. Um cenário que se nota pelas mais de 500 mil tubulações em todo o país.

No que diz respeito a questões ambientais, a província fronteira Noroeste apresenta aumento da salinidade, assim como um declínio das cotas piezométricas, devido à sobre-exploração. Os aquíferos da bacia do Indus, por oposição aos do Ganges-Brahmaputra, são aeróbicos e apresentam nitratos e patógenos em volta das grandes cidades (Karachi, Lahore, Rawalpindi e Islamabad). Ocorre ainda flúor no Punjab, no Sind e no Balochistão; nos aquíferos do delta do Indus, no Punjab e no Sindh, ocorre contaminação por As (Mukherjee *et al.*, 2015).

## 4. Métodos de Prospeção e Construção de Captações de Água Subterrânea

Apesar da distinção natural que é necessário fazer para projetos de captação de águas subterrâneas em países desenvolvidos em relação aos utilizados em países em vias de desenvolvimento, os pressupostos são os mesmos. Assim, na necessidade da execução de uma obra de sondagem é necessária a aplicação de critérios que são (Herrera e Castilla, 2012):

- Profundidade a atingir;

A profundidade a alcançar por uma cavidade vertical (seja poço ou furo) é um dado fundamental e define-se pelas características da formação a explorar: localização do aquífero objetivo, níveis piezométricos e transmissividade do sistema.

A profundidade da captação deve ser tal que permita interceptar toda a espessura do aquífero alvo, e não ultrapassar o material impermeável na qual jaz.

Nível piezométrico, se se trata de um aquífero livre é necessário garantir que a sondagem atravessa o nível freático e que, durante a exploração, o esta não se esgotará, tendo em conta que durante a extração de água o nível do furo em estático irá baixar até uma posição dinâmica, de acordo com o caudal e o rendimento específico. No caso de um aquífero confinado, ao atingir o teto do mesmo, irá interceptar a zona saturada, sendo válido o indicado para os níveis dinâmicos. Por uma questão de boas práticas, é necessário prever descidas ao nível regional ao longo da vida útil da captação (para Herrera e Castilla, 2012, 10 anos, para Ferreira *et al.*, 2012, 25 anos).

Transmissividade do aquífero é um parâmetro hidrodinâmico que estabelece o potencial do mesmo. Define-se como “(...) o produto da condutividade hidráulica horizontal pela espessura do aquífero. Se a condutividade varia ao longo do perfil do aquífero de espessura  $b$ , a transmissividade será dada por:

$$T = \int_a^b K dz$$

sendo  $K$  a condutividade horizontal,  $a$  a cota da base e  $b$  a cota do teto do aquífero. O conceito de transmissividade pode ser generalizada aos aquíferos livres considerando-se neste caso a espessura igual à espessura saturada. As dimensões da transmissividade são  $[L^2T^{-1}]$ ” (Almeida *et al.*, 2000). Em condições ideais, a captação deveria atravessar toda a espessura do aquífero, porém nem sempre é possível e, em muitas ocasiões, os poços são parcialmente penetrantes. Sob estas condições, a transmissividade efetiva para os períodos de bombeamento habituais, corresponde ao produto da permeabilidade pela espessura da parte da camada atravessada, pelo que o desenvolvimento da obra em profundidade resulta num maior rendimento da captação.

Ao perfurar-se um aquífero livre, deverá ter-se em conta que o interesse é alcançar a camada impermeabilizante inferior, salvo se os caudais desejados, os condicionantes económicos do furo ou

uma profundidade excessiva da dita camada, deixem como aceitável uma solução de penetração parcial. No caso de se tratar de um aquífero confinado, convém que seja atravessado por razões de hidráulica subterrânea, principalmente para evitar fluxos verticais dentro do aquífero.

- Diâmetro:
  - Do furo;
  - Da tubagem do furo;

Os elementos principais da execução de uma sondagem são a estrutura do poço, que se caracteriza por diâmetros de perfuração, diâmetros e as profundidades de entubação e as aplicações de areão calibrado como filtro e de cimento ou outro material isolante nas zonas não produtivas. O diâmetro de perfuração do poço está diretamente relacionado com a quantidade de água que se espera obter da captação, visto que se tem de admitir a instalação de uma bomba com diâmetro adequado para a capacidade de bombagem prevista. Consequentemente, e para isso, terá de ser escolhido equipamento devidamente dimensionado às características esperadas da captação.

Por outro lado, os diâmetros empregues na tubagem serão em função do método de perfuração e do acondicionamento previsto, que se refletirá nos esquemas de construção.

- Método de sondagem;

A seleção do método de perfuração está relacionada com a profundidade alvo e o diâmetro de perfuração, assim como com a litologia do terreno a perfurar. Da mesma forma que a profundidade de perfuração, algumas características litológicas do terreno a atravessar são dados que se conhecem à partida na fase de estudo hidrogeológico prévio. Corresponde a pesquisa bibliográfica de mapas geológicos e de ensaios que tenham sido feitos que possibilitem inferência que forneça informação revelante.

A litologia do subsolo não determina somente as possibilidades hidrogeológicas relativamente à presença, ou não, de aquíferos com capacidades de exploração para captação de água subterrânea, condiciona também o método a usar na operação de perfuração, visto que o método deriva das características físicas das rochas, entre as quais, a resistência mecânica da formação, dureza, fracturação, carsificação, coerência, etc.

Relativamente aos parâmetros geomecânicos que proporcionam informação sobre a perfurabilidade de um terreno, o mais representativo é o da sua resistência mecânica, determinada por meio de ensaio de compressão simples. A informação da litologia e estrutura do terreno, para além de incidir no processo de seleção do sistema de perfuração, também permite planificar, na fase de projeto, os tipos de entubação e as reduções de diâmetro necessárias para alcançar a profundidade

pensada para que se possa instalar o equipamento de extração adequado.

- Material da tubagem;

Como foi anteriormente referido, a litologia e o tipo de cavidade que se pretende, irão determinar a natureza e o diâmetro da tubagem, que pode ir desde a alvenaria, para um poço, até ao PVC ou aço inoxidável em furos, o primeiro mais usado em rochas duras e o segundo em rochas não agregadas.

- Tubos-ralo e filtros;

São usadas para estabilizar o fluxo de extração e manter a integridade estrutural da camada produtiva.

- Desenvolvimento;

Conjunto de ações que otimizam a extração do recurso, limpeza de furo e estabilização do entorno da cavidade, em toda a extensão onde se dá a extração.

- Proteção sanitária;

A proteção sanitária serve para impedir que haja entrada de contaminantes à boca do furo, é executada com uma área que será definida caso a caso, e em material impermeável, normalmente através de cimentação em redor da boca do furo.

No âmbito da conclusão da obra, as boas práticas são de implementar medidas de controlo e vigilância de obra que deverão englobar:

- Eficiência da captação;
- Inspeção;
- Controlo da execução da obra;
- Controlo orçamental;
- Controlo de medições.

#### 4.1. Métodos de prospeção mecânicos e manuais

Existem vários métodos de perfuração para a construção de furos de captação de águas subterrâneas. A seleção do melhor método depende da finalidade, da profundidade que se pretende atingir, das formações geológicas a perfurar e de fatores económicos (Ferreira *et al.*, 2012).

Podem dividir-se pela forma com que transmitem a energia ao fundo de furo:

1. Percussão (o desgaste no fundo do furo ocorre por impacto);
2. Rotação (o desgaste no fundo do furo ocorre por abrasão);
3. Roto-percussão (o desgaste no fundo de furo ocorre por impacto e abrasão)

As metodologias que se seguem estarão divididas de acordo com parâmetros tecnológicos e económicos em convencionais/correntes, tradicionais e *low cost*.

Por outro lado, Carter (2005) assume outra divisão de métodos de prospeção com base na dimensão e complexidade de uso dos equipamentos:

1. Escavação manual;
2. Métodos de força braçal;
3. Equipamentos convencionais de perfuração de pequeno porte;
4. Equipamentos convencionais de perfuração de grande porte.

Em que os primeiros 2 incluem métodos tradicionais e métodos *low cost* (“melhorados”).

#### 4.1.1. Convencionais/correntes

Definem-se como os métodos comumente usados que derivam de tecnologia produzida em meio industrial e em massa, ou seja, sujeita a um fabrico estandardizado (Herrera e Castilla, 2012).

#### Perfuração por percussão mecânica

A perfuração por percussão baseia-se na trituração/esmagamento do material geológico por impacto de um trépano suspenso por um cabo, sendo o seu movimento de descida e subida controlado por um balancim. O material desagregado vai sendo retirado progressivamente através de uma limpadeira.

Vantagens do método:

- Eficácia em formações geológicas com algum grau de consolidação;
- Permite amostrar o material geológico de modo bastante representativo;
- Permite a execução de ensaios de produtividade durante a perfuração;
- Baixo consumo de água;
- Baixo consumo de combustível;
- Dimensões do estaleiro reduzidas;
- Desvios muito pequenos na direção do furo;
- As sondas de percussão são baratas, pelo que os custos horários de perfuração deverão ser

menores.

Desvantagens do método:

- Requer revestimentos provisórios no caso de formações geológicas não consolidadas;
- Baixa velocidade de avanço da perfuração;
- Apresenta custos adicionais resultantes do tempo despendido em manobras de descida e subida;
- O diâmetro de perfuração vai sofrendo reduções com a profundidade;
- O furo terá de ser vertical.

Perfuração por rotação

Este método, também designado “rotary” (terminologia inglesa), consiste em triturar e desgastar as formações litológicas, reduzindo-as a pequenas partículas através da utilização de um trépano giratório. Os movimentos rotativos do trépano podem, ou não (*Auger/trado*), ser acompanhados pela circulação de um fluido, usualmente “lamas” constituídas por misturas mais ou menos estáveis densas e viscosas à base de bentonite e de outras substâncias com água, cuja função é remover e trazer os detritos da perfuração até à superfície, evitar o desmoronamento das paredes da perfuração, lubrificar e arrefecer as ferramentas cortantes.

A perfuração por rotação pode ser realizada com circulação direta ou com circulação inversa. O conjunto de equipamentos pode ser montado em caminhões, fazendo parte da sua estrutura, ou pode ser montado *in situ*.

Perfuração por rotação com circulação direta

No caso da circulação direta, por ação de uma bomba de alta pressão, as “lamas” são injetadas pelo interior da cabeça da sonda, saindo no fundo do furo por orifícios do trépano (trépano de roletes ou trialeta).

De seguida, as “lamas” ascendem pelo espaço compreendido entre a parede exterior das varas de perfuração e as paredes da sondagem, arrastando consigo os detritos da formação perfurada até à superfície.

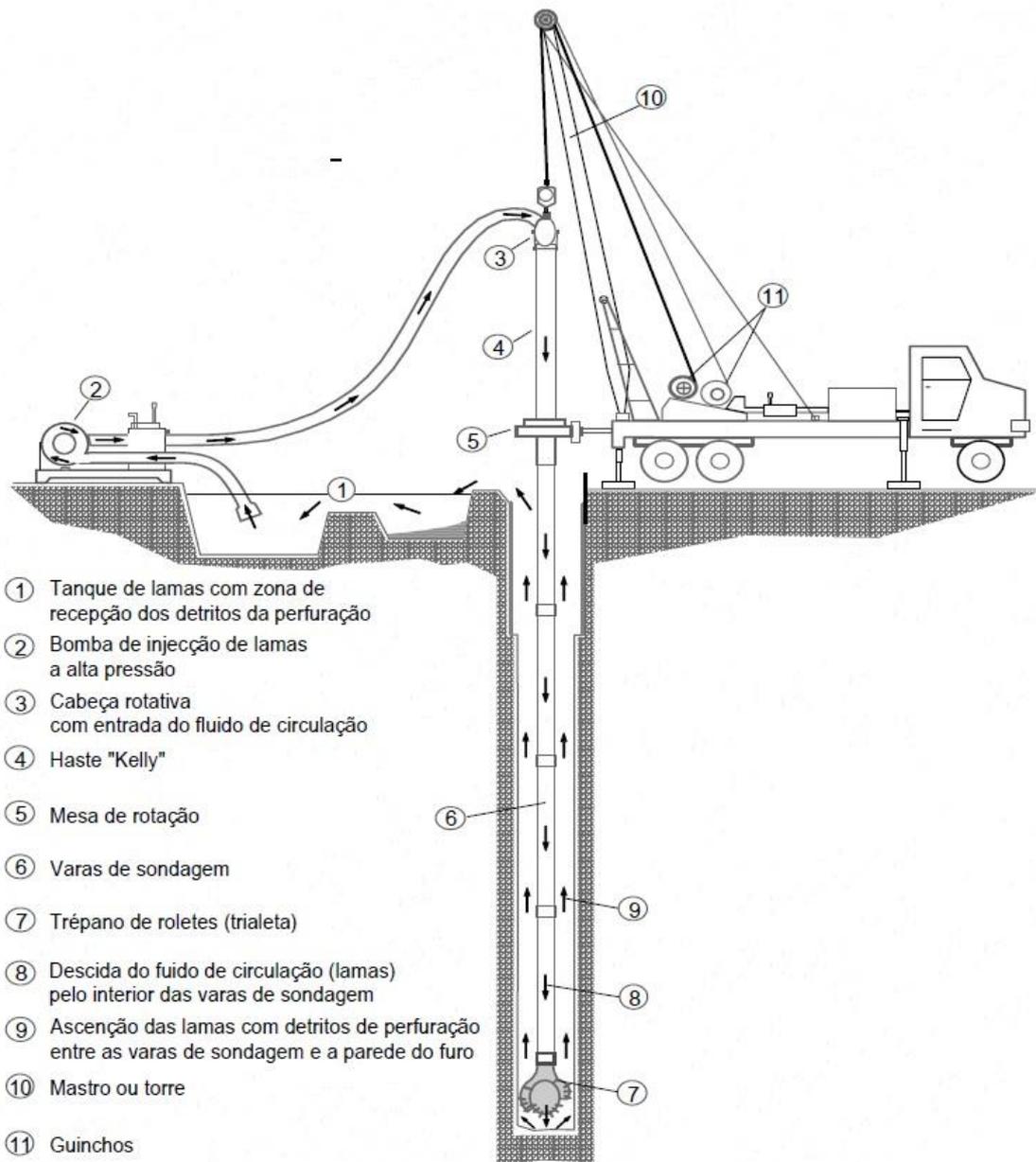
Vantagens do método:

- Eficácia em formações geológicas não consolidadas, acompanhada de um pequeno risco de colapso do furo, evitando-se muitas vezes a utilização de revestimentos provisórios;

- Permite avanços relativamente rápidos;
- Perdas de fluido de circulação controláveis;
- Maior facilidade de controlo das propriedades das lamas bentoníticas (e.g. viscosidade e peso específico).

Desvantagens do método:

- Equipamento dispendioso;
- Apresenta custos adicionais resultantes do tempo despendido em manobras de descida e subida;
- Caracterização da amostragem de formações geológicas dificultada pelo remeximento e pelo atraso em relação ao avanço da perfuração, o que pode conduzir a medições deficientes das profundidades de posicionamento dos tubos-ralo;
- Pode induzir a impermeabilização e a contaminação das formações produtivas;
- Alguma dificuldade em manter constante a direção de perfuração, sendo requerida uma boa técnica de execução.



**Figura 20:** Equipamento Circulação Direta (Ferreira et al., 2012)

### Perfuração por rotação com circulação inversa

Na circulação inversa (Figura 22), as “lamas” descem diretamente do respetivo tanque até ao fundo do furo através do espaço compreendido entre a parede exterior das varas de perfuração e as paredes da sondagem.

Posteriormente, a ascensão das “lamas” e dos detritos efetua-se pelo interior das varas que constituem a coluna de perfuração, com ajuda de ar comprimido, formando-se uma emulsão ar-lamas de menor densidade.

Durante a perfuração, esta ascensão da mistura de lamas, ar e detritos das formações

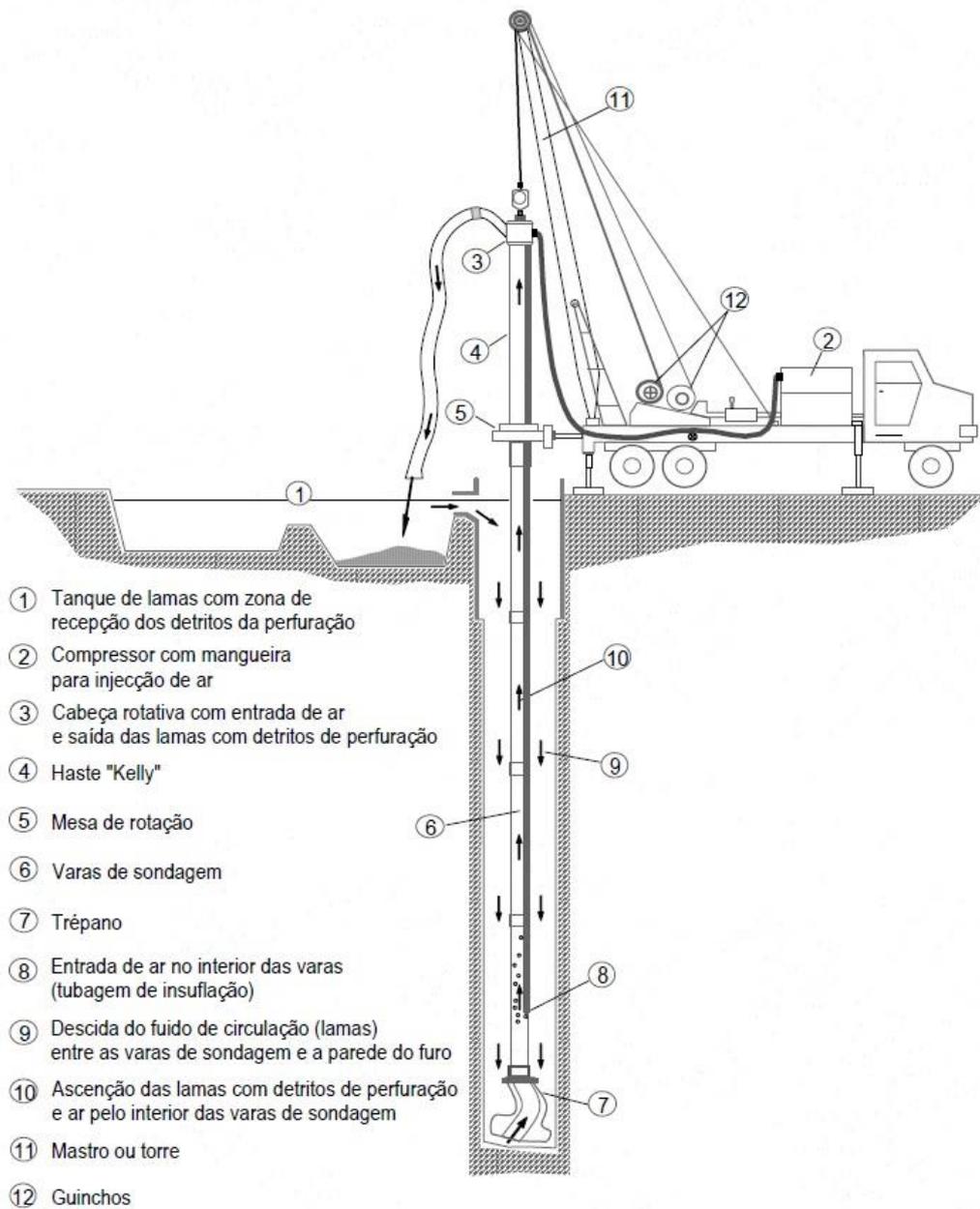
perfuradas é mantida em equilíbrio com o volume de lamas do tanque. Este método apresenta, relativamente à rotação direta, as seguintes vantagens e desvantagens principais:

Vantagens do método:

- Permite a execução de furos de maior diâmetro e geralmente mais produtivos;
- Elevada capacidade de remoção dos detritos de perfuração, o que permite avanços mais rápidos;
- Boa qualidade da amostragem (boa representatividade da amostra relativamente à profundidade de perfuração).

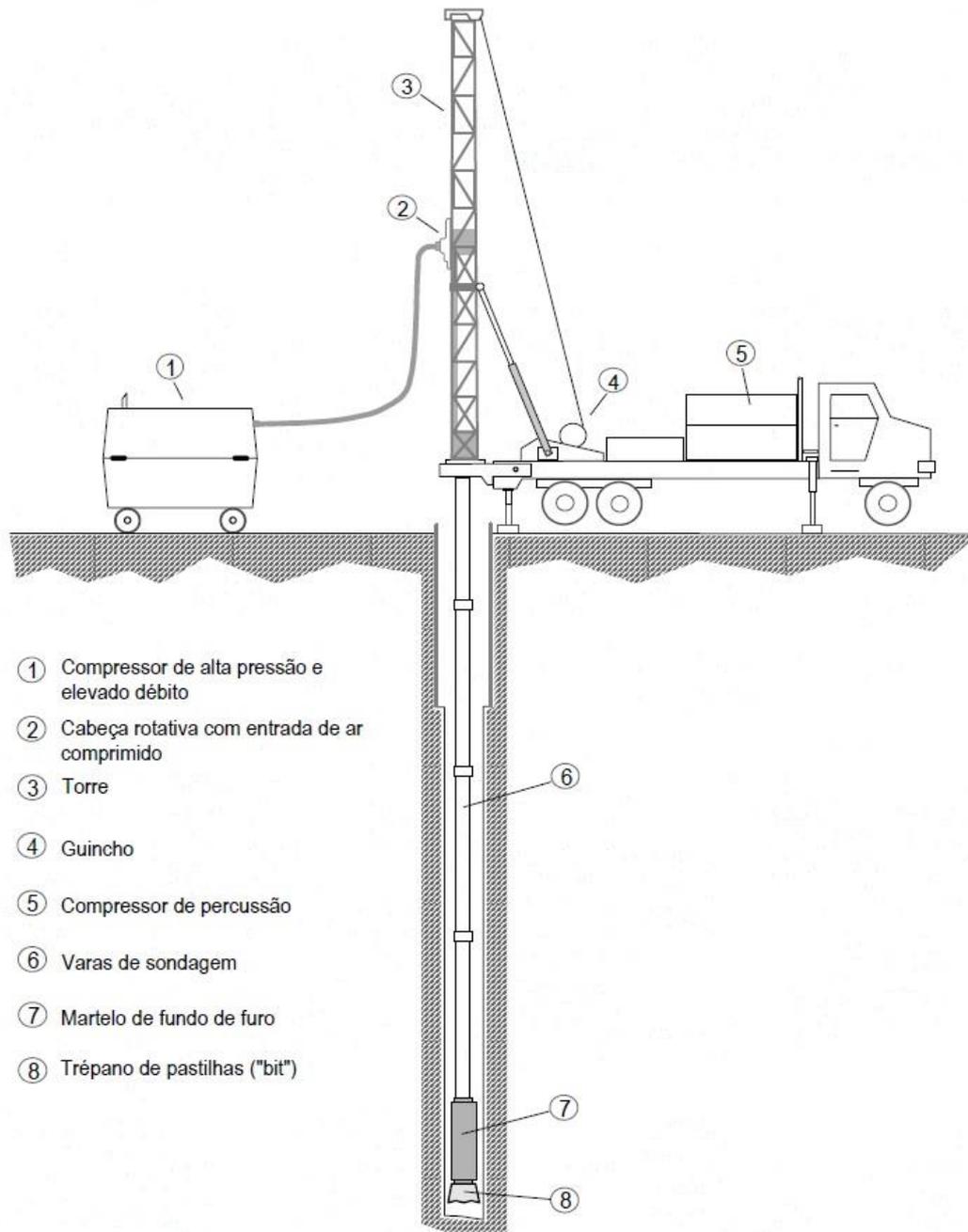
Desvantagens do método:

- Equipamento de maiores dimensões;
- Necessidade de maior número de operadores;
- Necessidade de um tanque de lamas maior e consumo de água mais exigente face ao elevado débito de injeção;
- Maior área de estaleiro;
- Perdas elevadas de fluido de circulação, em certas formações, o que pode perturbar ou deteriorar as zonas produtivas;
- Risco de entupimento das varas por detritos de grande diâmetro.



**Figura 21:** Perforação por circulação inversa (Ferreira et al., 2012)

### Perforação por roto-percussão



**Figura 22:** Método de Roto-percussão (Ferreira et al., 2012)

O método baseia-se numa ação principal de esmagamento e corte provocada por uma ferramenta acionada por ar comprimido, em que se pode combinar um pequeno movimento de rotação de um “bit” (broca) transmitido pelas hastes de perfuração e um movimento de percussão de elevada frequência e de pequeno curso, dado por um martelo de fundo de furo. Neste caso, o fluido de circulação pode ser o próprio ar comprimido, produzido a partir de um compressor, que é transmitido pelo interior da coluna de perfuração, passando pelo martelo e “bit”, servindo também como fluido de limpeza. Como complemento à utilização de ar comprimido e visando resolver problemas de

limpeza e/ou de instabilidade das paredes de perfuração, podem ser adicionadas “espumas” no fluido de circulação, para diminuição do seu peso específico.

De acordo com bibliografia relevante foram comparados os métodos mecânicos de prospeção convencionais. Os aspetos tidos em consideração foram os relevantes para a elaboração de uma sondagem (Tabela 2).

**Tabela 2:** *Resumo do procedimento de seleção do método de perfuração para captações hidrogeológicas (adaptado de Herrera e Castilla, 2012)*

Dureza	Litologia	Diâmetro	Captação superficial (<100m)	Captação profunda
Muito dura Resistência à compressão >2000 Kp/cm <sup>2</sup>	Ardósia Quartzito Granitos Basaltos	Grande	X	X
		Pequeno (<300 mm)	Rotopercussão com circulação direta	X
Dura Resistência à compressão entre 800-2000 Kp/cm <sup>2</sup>	Calcários competentes Arenitos competentes	Grande	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)	Rotopercussão com circulação inversa
		Pequeno (<300 mm)	Rotopercussão com circulação direta	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)
Media Resistência à compressão entre 200-800 Kp/cm <sup>2</sup>	Calcários Arenitos	Grande	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)
		Pequeno (<300 mm)	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)	Rotopercussão com circulação direta (ou inversa)
Branda Resistência à compressão < 200 Kp/cm <sup>2</sup>	Areias Siltes Margas Argilas	Grande	Poços Percussão Rotação a circulação inversa	Percussão Rotação a circulação inversa
		Pequeno (<300 mm)		Rotação a circulação inversa

#### 4.1.2. Perfuração por métodos tradicionais

Constituem o conjunto de práticas por pessoas habilitadas dentro da prática histórica sem os benefícios de “ideias e materiais modernos” (Carter, 2005).

## *Sludging* (Noroeste do Bangala)

Constitui prática por povos na área da Índia próxima ao Bangladeche, assim como no Bangladeche e Nepal, por artesãos designados por “*Mistries*”, donos do equipamento e do saber necessário à condução da atividade de prospeção. É o conjunto de métodos de perfuração contínua, que permite que o fluído de perfuração desça pelo espaço entre o tubo de perfuração e o furo escavado e levar o material escavado pelo tubo de perfuração. Trata-se de um método em que a perfuração é feita por via húmida com o uso de esterco de vaca para espessar a água (Danert, 2009).

É usado em solos aluviais e apresenta taxas de perfuração entre 16 e 45 m/dia, com um custo de 200 rupias, entre 3 e 4 £ por um furo de 12 m de profundidade. Que perfaz um custo de cerca de 16,6 rupias/m de furo, entre 0,25 e 0,34 £/m de furo (Ball e Danert, 1999).

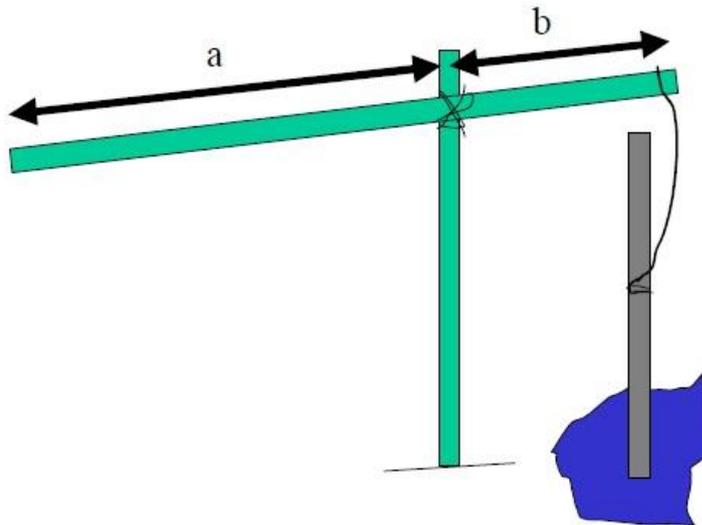
O equipamento é operado por 2 pessoas (*mistries*), em que o elemento sénior da equipa está na válvula de charneira, onde é ejetado o material cortado que provém do fundo do furo. A válvula está ligada à tubagem que faz o corte.

### Material

A base de funcionamento do sistema é o princípio da alavanca, com um ponto de pivô onde é amarrada por cordoamento, que dista 0,5 m do ponto do furo em que a força é exercida a partir da outra extremidade que dista 1,5 m até ao ponto de pivô, para uma extensão total de 2 m. O material que constitui o pivô e a vara que assenta no pivô são feitos de bambu (Danert e Ball, 1999).

O mecanismo de perfuração consiste em 2 partes, uma parte interna, que faz o desgaste e corta no fundo de furo, à qual está ligada o *bit* com 1½” de diâmetro, e tubo a que está ligado com 1½” de diâmetro por 3,1 m de comprimento, sendo sucessivamente anexado por ligações de 1½”, e uma parte externa, que encapsula e impede que o furo abata, tem 4,85 cm de diâmetro por 3,1 m de comprimento. No topo da tubagem interna existe uma válvula que é ativada pelo *mistry* na parte final do percurso descendente do tubo de perfuração que ejeta, tubos de aço galvanizado, geralmente desgastados (Ball e Danert, 1999).

Para o caso em concreto do *sludging*, as dimensões das varas estão representadas no seguinte esquema (Figura 23).



**Figura 23:** Para sondagem:  $a = 0,9-1,5$  m e  $b = 0,5$  m; para limpeza:  $a = 1,6$  m e  $b = 0,5$  m (adaptado de Danert e Ball, 1999)

#### 4.1.3. *Low cost*

Por *low cost*, ou “melhorados” (Carter, 2005), entendem-se os métodos de prospeção, que promovem uma solução de baixo custo quando comparado com o de métodos convencionais e são manufacturados total ou parcialmente no local de aplicação (Danert, 2009). Resultam da interação entre tecnologia, ou paradigma, convencional e o confronto com a realidade, produzindo uma tecnologia nova.

#### Trado Manual

Consiste num método de perfuração por corte a seco, em que o solo é cortado por meio de um trado que pode ter várias configurações. Nas configurações mais pesadas é montado por via de tripé e guincho pesados, caso do *Vonder Rig* (Figura 25) (Blair Research Laboratory, 1988).

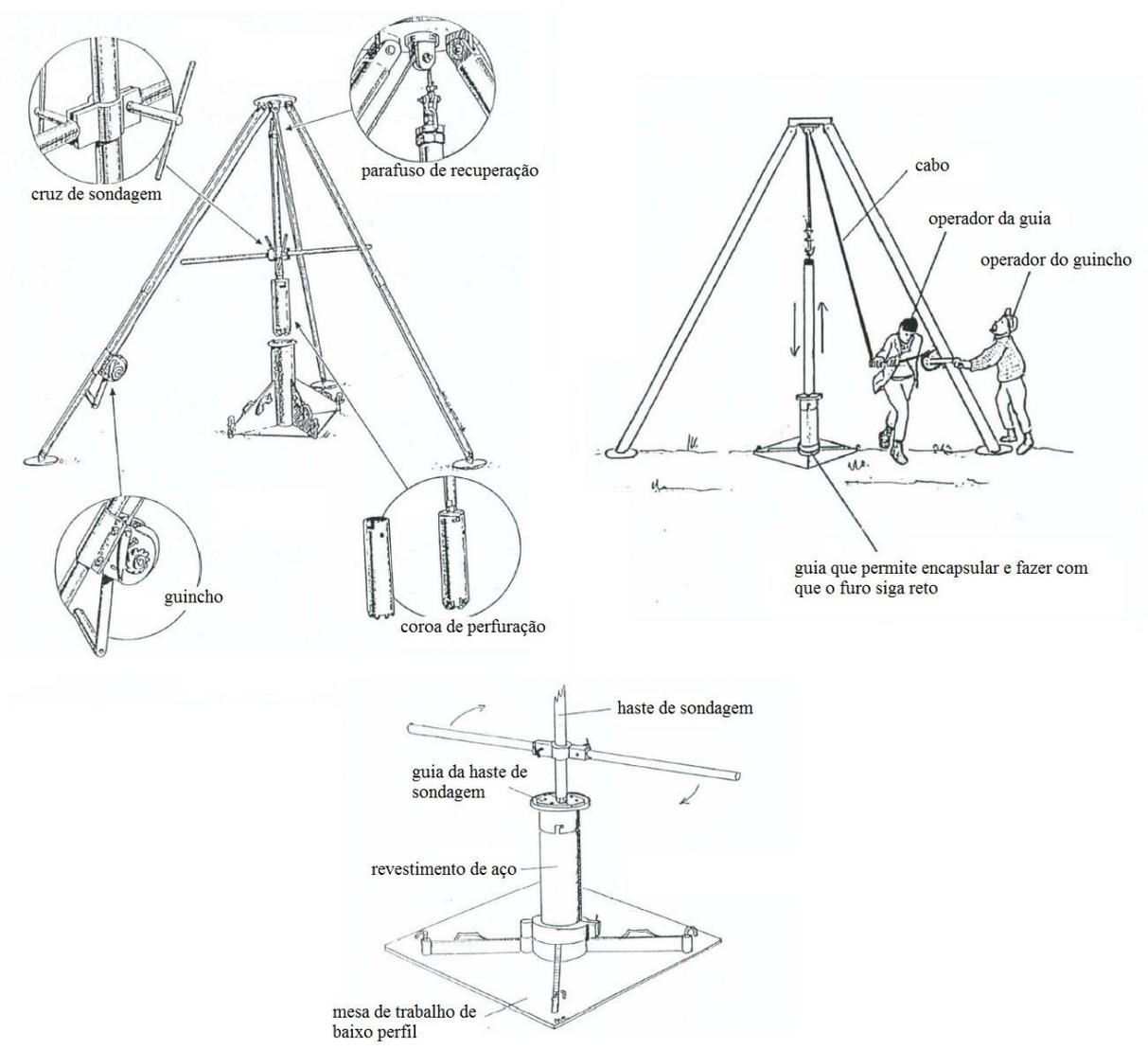
Para a sondagem usa diâmetros de vara de perfuração sólidas entre os 25 e os 50 mm por 6,1 a 6,4 m de comprimento (Koegel, 1985), para coroa de perfuração usam-se diâmetros entre os 100 e os 150 mm excepcionalmente 250 mm (*Vonder Rig*). Tem como profundidade mais comum de se atingir os 10 m, com um máximo de cerca de 20 m. No processo de sondagem as varas são colocadas umas em cima das outras, com o trado a necessitar de ser retirado ocasionalmente do fundo do furo para retirar a terra cortada que fica retida no espaço da coroa de perfuração (Blair Research Laboratory, 1988).

Pode ser usado em areias e siltes não consolidadas, e em algumas formações de argila, para

evitar o colapso, em formações menos coesas o furo pode ser encapsulado à medida que avança em profundidade (Danert, 2009).



**Figura 24:** Funcionamento do Auger ligeiro e de tipos de trado (Danert, 2009)

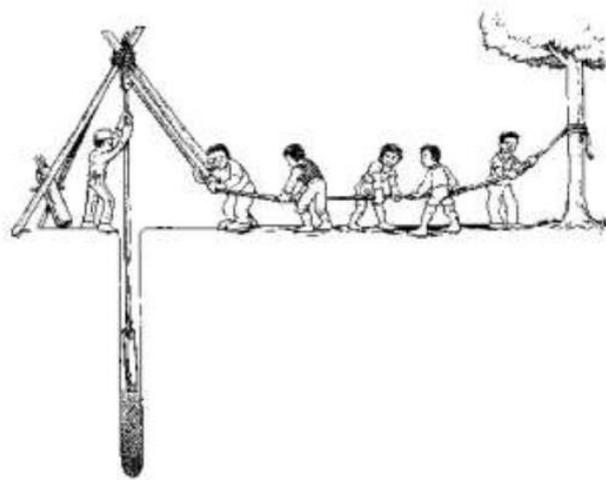


**Figura 25:** Elementos do Vonder Rig (adaptado de Blair Research Laboratory, 1988)

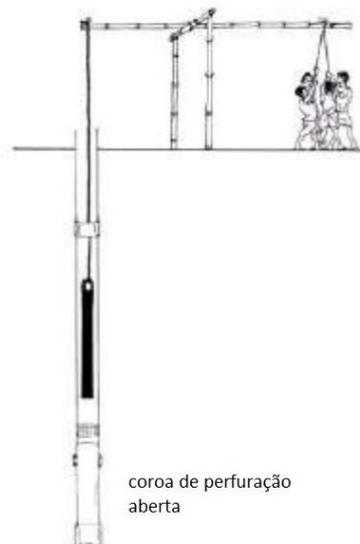
## Percussão Manual

Envolve a utilização da força gravítica para efetuar a sondagem no fundo de furo. Um corpo é deixado cair sobre a vara que transmite a energia ao longo do furo. A massa do corpo varia e vai desde o peso da coroa de perfuração com coluna (Figura 26), até aos 70 kg, nas configurações mais pesadas (Figura 27), para formações rochosas mais competentes (Danert, 2009).

É uma metodologia que é executada quase a seco, em que é usado apenas um pouco de água para remover os excedentes de solo cortado. Nas formações mais brandas é necessário encapsular à medida que se avança para que a cavidade não abata, o que leva a que a profundidade habitual atingida seja de 15 m. Quando a formação é mais competente poderá ser possível chegar aos 20, 30 m. Devido à lenta progressão da sondagem por este método, não é de aplicação comum, ou é-o em conjunto com as metodologias de trado manual ou de *sludging* (Danert, 2009; Carter, 2005).



**Figura 26:** Equipamento ligeiro de percussão (Danert, 2009)



**Figura 27:** Equipamento pesado de percussão (adaptado de Danert, 2009)

## *Sludging (Baptista, Pounder Rig e Rota Sludge)*

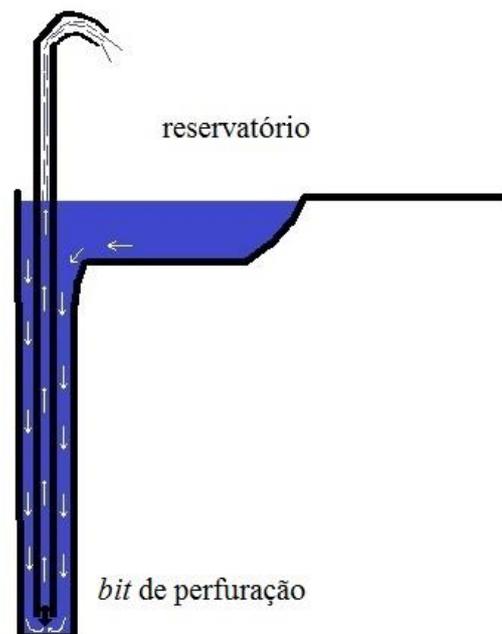
Os métodos *low cost* de *sludging* são semelhantes aos dos tradicionais. Os métodos Baptista, *Pounder Rig* e *Rota Sludge* procuram perfurar material mais competente, com sucesso variável. O *Pounder Rig* coloca mais ênfase numa furação mais vertical e enquanto os Baptista e *Rota* têm como objetivo um custo menor. Os métodos Baptista e *Rota* podem ser combinados com percussão manual para lidar com formações mais competentes, no entanto faz parte do desenho base do *Pounder Rig* (Danert, 2009).

### Método Baptista

Metodologia que tem por base o *sludging* e envolve a utilização de movimentos recíprocos, ascendentes e descendentes, de uma haste amarrada por corda a um tripé, por via de uma roldana acionada manualmente (Figura 28) desenvolvido em 1993 por Terry Waller (Danert, 2009). Este conjunto de movimentos recíprocos tem 2 objetivos, fazer com que o *bit* impacte o terreno com energia necessária para o sondar, e fazer com que o fluido circule, por dentro da tubagem, de forma a remover o material sondado (Figura 29). O elemento que perfura a terra tem cerca de 32 mm de diâmetro (Figura 30) e que permanece no fundo do furo, está acoplado a um tubo de ferro de 3 m de comprimento, sendo acrescentados tubos de PVC à medida que a sondagem vai progredindo (Waller, 2008).



**Figura 28:** Operação de sondagem (Waller, 2008)



**Figura 29:** Esquema do reservatório e circulação do fluido de sondagem.



*Figura 30: Bits de sondagem, à esquerda, o bit Baptista (Waller, 2008)*

Consegue atingir os 84 m de profundidade, isto se encontrar apenas solos, com registo de perfuração em formações rochosas, ainda que com reduções significativas de velocidades de avanço. Para solos silto-arenosos as velocidades de avanço são de entre 3 a 5 m por hora, que vão até aos 5 a 7 cm por hora em formações mais competentes (i.e. laterites compactas, tufos, gnaisses meteorizados, etc.) (Waller, 2008). Apresenta um custo médio de 5 \$ dos EUA por metro na Nicarágua (Cloesen, 2007) e na Bolívia de cerca de 2 \$ dos EUA por metro (Danert, 2009).

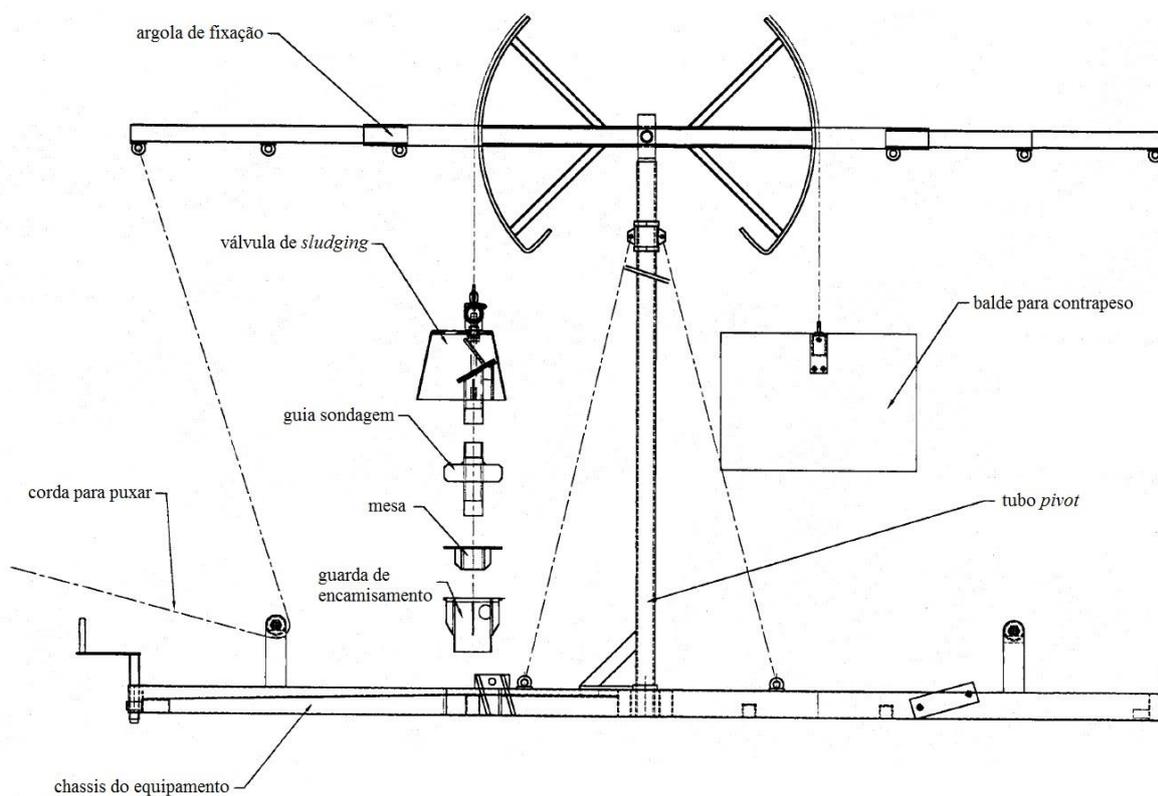
#### Método *Pounder Rig*

Tal como o método Baptista, tem a sua origem no *sludging*, mas conta com um conjunto de alterações que lhe permite lidar com material consolidado, rególitos, desde as camadas superiores à zona saturada (Danert, 2009) e tem origem no trabalho realizado por Peter Ball e Richard Carter entre 1998 e 2001, de que resultou o manual, posteriormente publicado, com peças desenhadas e melhores práticas de sondagem (Ball e Carter, 2000).

O princípio do método de sondagem húmida, alimentada por um reservatório com água (Figura 28) envolve o movimento recíproco dos elementos de perfuração, tubagem + *bit*, típicos do *sludging* em que, no topo da tubagem, à superfície, se encontra uma válvula manual que ejeta o material proveniente do fundo de furo. A tubagem de sondagem é constituída por segmentos de aço entre 25 a 40 mm de diâmetro por 3 m de comprimento, com *bit* de carboneto de tungsténio que permite, em conjunto com a robustez da tubagem, sondar material mais competente. Quando o material a ser sondado é constituído por solos arenosos finos, siltes e argilas, é só necessária a tubagem sem o *bit*, convertendo o equipamento, tornando-o capaz de usar o *sludging* que apresenta melhores velocidades de avanço. O movimento recíproco é auxiliado por um contrapeso na seção da vara oposta à que se encontra a tubagem de sondagem a ser atuada (Figura 31 e 32) (Ball e Carter, 2000).



**Figura 31:** Sondador a efetuar sondagem de teste (Carter, 2001)



**Figura 32:** Peças desenhadas do equipamento (adaptado de Ball e Carter 2000)

Apresenta custos que podem ir das 80 às 450 £ esterlinas, sendo que essa variação de custos tem que ver com a qualidade dos recursos empregues, se se tratam de equipamentos próprios e da experiência e reputação dos sondadores (Carter, 2001).

### Método *Rota Sludge*

De forma semelhante ao método *Pounder Rig*, trata-se de uma metodologia com base no

*sludging*, portanto por via húmida, em que o fluido de circulação é água com espessante, comumente esterco de vaca. O princípio mecânico da metodologia é o da alavanca, que possibilita a realização de movimentos recíprocos, ascendentes e descendentes, do conjunto tubagem + *bit*, e de rotação do mesmo conjunto (Figura 33). No movimento descendente, ao impactar o solo, é dado manualmente cerca de um quarto de volta, com uso de uma barra que está a atuar sobre a tubagem, para que, com maior eficácia, escave o solo. O solo escavado é ejetado pelo topo da tubagem e, em conjunto com a água, vai para um poço de decantação para que a água reentre no sistema (Figura 33 e 34). O furo mantém-se aberto pela pressão da água ao longo da cavidade (Practica, 2014).

O método *Rota* é capaz, e indicado, para ser usado em formações argilosas e arenosas, sendo capaz de sondar laterites e arenitos alterados. Tem como profundidades limite cerca de 35 m, com custos que podem variar amplamente, entre os 100 e os 2500 \$ dos EUA, por um furo de 30 m. Entre os motivos dessa variação estão a qualidade, a geologia e o custo operacional inerente ao próprio país. Um furo de 30 m poderá levar entre 2 a 6 dias, estando essa variação dependente da geologia, das ferramentas disponíveis, da logística e da experiência das equipas de sondagem (Practica, 2014).



**Figura 33:** Diagrama da execução de sondagem (Williams, 2014)



**Figura 34:** Sondagem Método Rota Sludge (Practica, 2014)

### *Jetting/washboring*

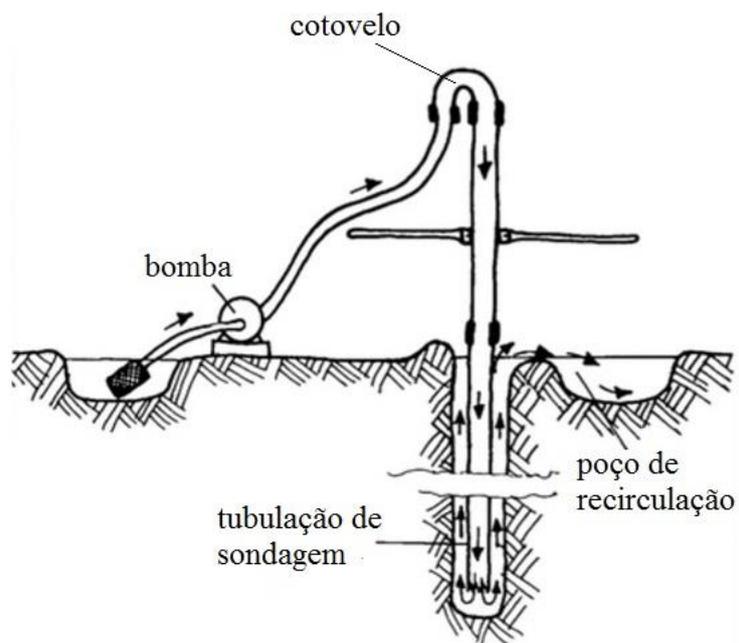
Trata-se de um método que usa a pressão de água bombada da superfície para o fundo do furo por forma a escavá-lo. Requer uma quantidade razoável de água uma vez que a desarticulação no fundo de furo ocorre por ação do fluído, água, em que a pressão impressa à água provém de bombas que podem ser acionadas por pedais (Carter, 2005). Para sondar são usadas tubulações de aço, ou PVC, com diâmetro entre os 50 e os 100 mm por 3 m (Figura 32), com ou sem *bit* de perfuração (Figura 33), que vão sendo acrescentadas à medida que a sondagem progride. À medida que a sondagem decorre, o material sondado sai pela borda do furo até à superfície, de forma a entrar de novo em circulação (Figura 34).



**Figura 37:** Tubo de sondagem de aço com 50 mm de diâmetro por 3 m de comprimento, com pegas que servem para elevar e baixar durante a sondagem, no topo um cotovelo de 180° (Carter, 1985)



**Figura 35:** Bit de sondagem usado pela metodologia jetting (Danert, 2009)



**Figura 36:** Esquema com elementos relevantes ao funcionamento do método de jetting (adaptado de Carter, 1985)

O uso da metodologia *jetting* está restrita a formações que vão dos siltes às areias pouco competentes. Em argilas o avanço ocorre muito lentamente, e em solos porosos a água perde-se na circulação. O *jetting* é frequentemente usado em leitos de cursos de água com fluxo variável, para que quando haja o período de estio, em que o curso de água seque, se consiga recorrer à zona saturada ainda com água (SWS, 2001). Em média atingem-se 6 a 10 metros de profundidade, em circunstâncias extraordinárias, 30 m, com a profundidade atingida a ser condicionada pela qualidade dos operadores (Danert, 2009).

Método EMAS

Com origem na Bolívia no início dos anos 90, combina os métodos de *jetting*, associados à percussão. É uma metodologia que tem como fluido de circulação uma mistura de argila e água, misturada a uma densidade adequada, e é bombeada para a frente de perfuração, subindo para o exterior através do espaço entre a tubagem de sondagem e o furo, entrando novamente no circuito de bombeamento. A tubagem de sondagem é constituída por segmentos com cerca de 1¼” de diâmetro por 1,5 m de comprimento, que é acrescentada com o avanço da sondagem. A sondagem é feita com um *bit* (Figura 38) que, para além de cortar por via mecânica, é o ponto de saída da água bombeada a partir de um reservatório exterior. O *bit* é retirado no final da sondagem. Quando a sondagem entra em maiores profundidades, é necessário alterar a configuração do método que auxilia a percussão, nos primeiros metros é usado o movimento ascendente impresso pela pessoa que guia a sondagem, à medida que executar esse movimento ascendente, vai se tornando mais difícil, e passa a ser usado um sistema de roldanas fixado na torre que auxilia a sondagem (Figura 39). Quando aumenta a profundidade, passa a ser usado o sistema de alavanca (Figura 40) (Jetting - EMAS method, 2016).



**Figura 39:** Método de prospeção EMAS com uso de roldana (Buchner, 2010c)



**Figura 38:** Bit de sondagem método EMAS (Danert, 2009)



**Figura 40:** Torre de sondagem do método EMAS (Buchner, 2010c)



**Figura 41:** Sondagem EMAS com uso do princípio da alavanca (Buchner, 2010c)

O método EMAS é usado em solos não coesos, assim como em algum material consolidado, encontrando no entanto dificuldades em areias grosseiras, o que faz com a velocidade de progressão baixe, podendo alterar-se a metodologia de sondagem para o *sludging*. Tem como limitações a impossibilidade de atravessar formações rochosas ou blocos de rocha (Danert, 2009). Atinge uma média de 30 m de profundidade, podendo ser atingidos 90 m em 3 dias de trabalho (Jetting - EMAS method, 2016). A aquisição ou manufatura do equipamento é estimada entre os 600 e os 800 \$ dos EUA (Danert, 2009), com o valor da prestação de serviço da sondagem a ficar entre os 4 e os 10 \$ dos EUA, com o custo médio de um poço de 30 m de profundidade, com um preço que inclui já o custo de desenvolvimento do furo, assim como a instalação de uma bomba manual EMAS, com 1 ano de garantia, de cerca de 180 \$ dos EUA (Jetting - EMAS method, 2016).

#### 4.1.4. Comparação entre métodos

É possível traçar o seguinte quadro de comparações relativamente aos métodos enunciados:

**Tabela 3:** Comparação dos métodos de prospeção (adaptado de Danert, 2009)

Método	Forma de perfuração	Diâmetro ( $\varnothing$ ) e profundidade máxima (h)	Custo Total (CT) e por m de furo (CMF)
Convencionais			
Roto-Percussivo	Percussão pressão de ar associada a rotação motorizada	$\varnothing$ até 12” h até 800 m	CT = 35 a 57 mil \$ dos EUA CMF = 250 a 400 \$ dos EUA (Burrows, 2006)
Percussivo	Pressão de ar em martelo de fundo de furo		
<i>Rotary</i> (circulação direta e circulação inversa)	Rotação motorizada associada a lamas		
Tradicionais			
<i>Sludging</i> (Noroeste do Bangala)	Ação recíproca de um tubo de aço por via do princípio de alavanca	$\varnothing$ = 50 a 100 mm h = 30 m	CT = 3 a 4 £ esterlinas CMF = 0,25 a 0,34 £ esterlinas (Ball e Danert, 1999)
<i>Low cost</i>			
Trado Manual	Rotação manual por via de	$\varnothing$ = 50 a 100 mm h = 30 m	CT = 150 \$ dos EUA (Burrows, 2006)
Percussão Manual	Ação gravítica de um peso associado a um <i>bit</i> com recurso a força manual	$\varnothing$ = 50 a 200 mm h = 15 m (20 a 30 m senão não for necessário suportar o furo)	
Baptista	Ação recíproca de um tubo de aço por via do princípio de alavanca, com válvula incluída no <i>bit</i>	$\varnothing$ = 32 a 150 mm h = 30 m	CT = 50 a 100 \$ dos EUA (Burrows, 2006) CT = 150 \$ dos EUA (Cloesen, 2007)
<i>Pounder Rig</i>	Ação recíproca de um tubo de aço por via do princípio de alavanca	$\varnothing$ = 100 mm h = 30 m	CT = 80 a 450 £ esterlinas (Carter, 2005)

<i>Rota Sludge</i>		Ø = 100 mm h = 30 m	CT = 100 a 2500 \$ dos EUA (Practica, 2014)
<i>Jeting/Washboring</i>	Ação da pressão de água no solo	Ø = 100 a 150 mm h = 6 a 10 m (registadas profundidades de 30 m em siltes)	
EMAS	Ação recíproca de tubo de aço com uso de roldana e princípio de alavanca	Ø = 50 mm h = 30 m	CT = 180 \$ dos EUA CMF = 4 a 10 \$ dos (Danert, 2009)

Os métodos tradicionais apresentam um custo inferior em comparação com os *low cost* e ainda mais inferiores comparando com os convencionais. Por outro lado, os métodos convencionais permitem alcançar profundidades que nenhum outro método permite. Em termos económicos não podemos afirmar que estes métodos competem uns com os outros, pode ser verdade entre os *low cost* e os tradicionais, mas o poder aquisitivo das populações afasta os métodos convencionais de serem uma opção viável à maioria das populações dos países considerados (Tabela 3).

O meio em que os métodos *low cost* e tradicionais são aplicados são muito semelhantes e presentes ao longo das Grandes Bacias do Sub-Continente Indiano (Bacias do Indus, Ganges e Brahmaputra) assim como das longas faixas sedimentares da formação Siwalik ao sul do Butão e Nepal.

#### 4.2. Métodos de construção

São métodos que dizem respeito às ações que são tomadas no período que se seguem a uma sondagem bem sucedida. Esta fase tem por fim "*evitar uma prematura degradação da captação e do risco de infiltrações de águas de níveis indesejados*". Os elementos que dizem respeito à sua implementação são: o uso de tubagem de revestimento adequada, acondicionamento do maciço drenante e revestimento ou não do furo, *open hole* (Medeiros *et al.*, 2011).

A aplicação de tubagem de revestimento está relacionada com o diâmetro de perfuração. Terá também de ter em conta a instalação de equipamento de bombagem i.e. operações de instalação, manutenção, substituição, atividade de bombagem, isto é, o choque da bomba no arranque e contacto da bomba com o revestimento (Ferreira *et al.*, 2012). Por sua vez a bomba terá de ter um diâmetro 2" inferior ao diâmetro interno do tubo.

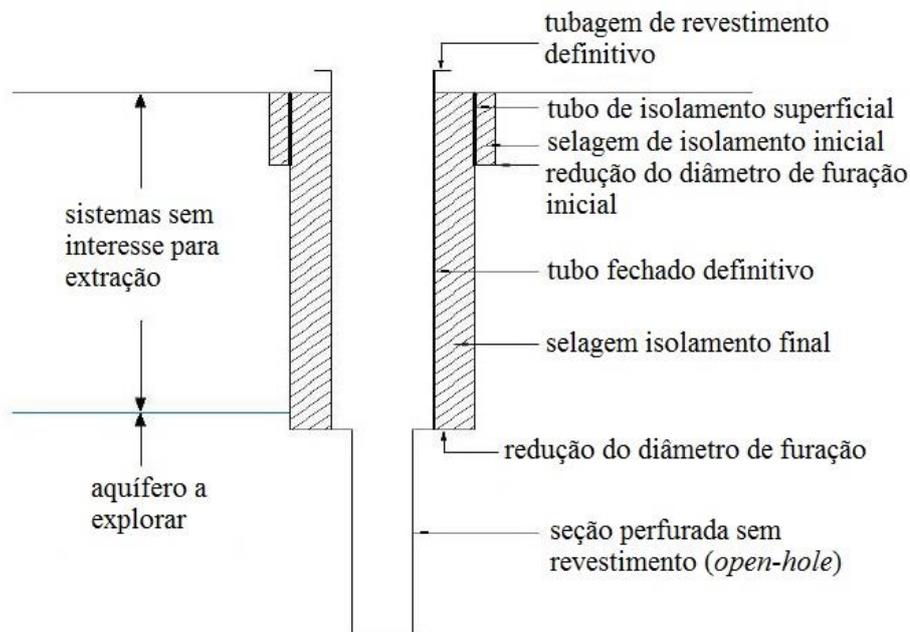
Os tubos podem ser divididos em tubos fechados, em tubos ralos e tubos de redução. Tubos fechados são tubos que ao longo da seção não permitem a comunicação entre as águas no interior do

tubo e as zonas exteriores ao tubo, e são colocados às profundidades não adequadas à extração de água, isto é, nas zonas não produtivas. Tubos ralos, pelo contrário são colocados a uma profundidade onde haja camadas saturadas de água adequadas à sua extração (Medeiros *et al.*, 2011).

Quando ocorre uma redução no diâmetro de furo e é necessário ligar as duas seções, são usados tubos de redução. São tubos em forma de cone que fazem a ligação entre dois outros tubos quando há necessidade de reduzir de um diâmetro superior para um inferior dentro de uma captação.

O maciço drenante é o conjunto de elementos adicionados ao contato com a zona saturada que será alvo de extração. Terão de ser apurados o dimensionamento do grão e a quantidade do sedimento colocado como maciço drenante, o tamanho (largura e frequência) e a tipologia dos rasgos dos ralos dos tubos ralos, as características do material do maciço drenante, a higienização do material do maciço drenante e a metodologia de colocação do material drenante (Medeiros *et al.*, 2011).

A colocação de revestimento no furo, isto é, a aplicação integral de tubagem ao longo do furo, ocorre quando se verifica a possibilidade da integridade do furo ou da qualidade da água a partir de uma determinada profundidade estar em causa. Os motivos para não encamisar uma determinada extensão das captações serão económicos, porque menos tubagem a usar implicará um custo menor, mas é também necessário que o maciço cumpra determinados requisitos para que tal aconteça. Os requisitos são que a partir de uma determinada profundidade, até ao fim do furo executado, o maciço seja autoportante, pouco alterado a são, e pouco fraturado (Graça, 2012).



**Figura 42:** Esquema simplificado de um furo parcialmente sem revestimento, em "Open hole"(Graça, 2012)

#### 4.2.1. Convencionais/correntes

Os equipamentos convencionais são comprados como consumíveis, fabricados em série e de forma padronizada, requerendo pouca ou nenhuma adaptação ao furo em que são aplicados. A sua aplicação é determinada por práticas que são comuns, que correspondem a um padrão na indústria.

Os tubos usados para construção de forma convencional podem ser feitos de PVC (PoliCloroeto de Vinil ou policloroeteno pela IUPAC), aço ou aço inox (Figura 43). As características de cada furo irão ditar o tipo de material a usar, são enunciadas de forma sucinta as vantagens e desvantagens da aplicação de cada material (Tabela 4). Tem como regra expedita para determinar o uso de tubagem adequada, em polegadas (") (Ferreira *et al.*, 2012):

$$\text{Diâmetro de tubagem} = \text{Diâmetro de perfuração} - 6''$$



**Figura 43:** Tubos de PVC e de aço, esquerda e direita respectivamente (Graça, 2012)

**Tabela 4:** Comparação entre tubulações definitivas de PVC e aço (adaptado de Graça, 2012)

Material	Vantagens	Desvantagens
Aço	<ul style="list-style-type: none"><li>— Maior resistência mecânica, que possibilita menor espessura de tubo e maior profundidade por espessura;</li><li>— Maior resistência à rotura, que possibilita intervenções de manutenção mais fortes;</li><li>— Maior resistência ao aquecimento sem deformações ou torções;</li><li>— Uma coluna mais reta, com menos desvios;</li><li>— Permite o uso de menor espessura para o mesmo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>— Mais passível de corrosão em ambientes hidroquímicos agressivos;</li><li>— Suscetível de ser corroído por ferro bactérias;</li><li>— Nível de especialização elevado da mão-de-obra no caso de ser necessário soldar;</li><li>— Uniões roscadas suscetíveis de ovalização no processo de soldagem, não permitindo estanquidade dos setores de união;</li><li>— Custo elevado condiciona aplicação;</li></ul>

PVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Custo muito inferior;</li> <li>— Facilidade em manusear e transportar por ter menor peso;</li> <li>— Aplicação na construção mais fácil e rápida;</li> <li>— Não suscetível a fenômenos de oxidação ou corrosão por atividade bacteriana;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Menor resistência mecânica o que implica maior espessura de tubo, quando comparado com tubo de aço para uma dada profundidade;</li> <li>— Por ser mais deformável e frágil que o aço não suporta intervenções de manutenção agressivas;</li> <li>— Sensível a altas temperaturas que pode levar à entrada de elementos químicos do tubo para a água e/ou deformação do tubo, i.e. hidrotermalismo, processo de cura do cimento usado como selante;</li> <li>— Aplicação dos elementos que constituem o maciço drenante tem de ser feita de forma cuidadosa devido à fragilidade do material;</li> <li>— Menor impermeabilidade no que diz respeito a certos compostos orgânicos voláteis que possam entrar na captação</li> </ul>
-----	---	--

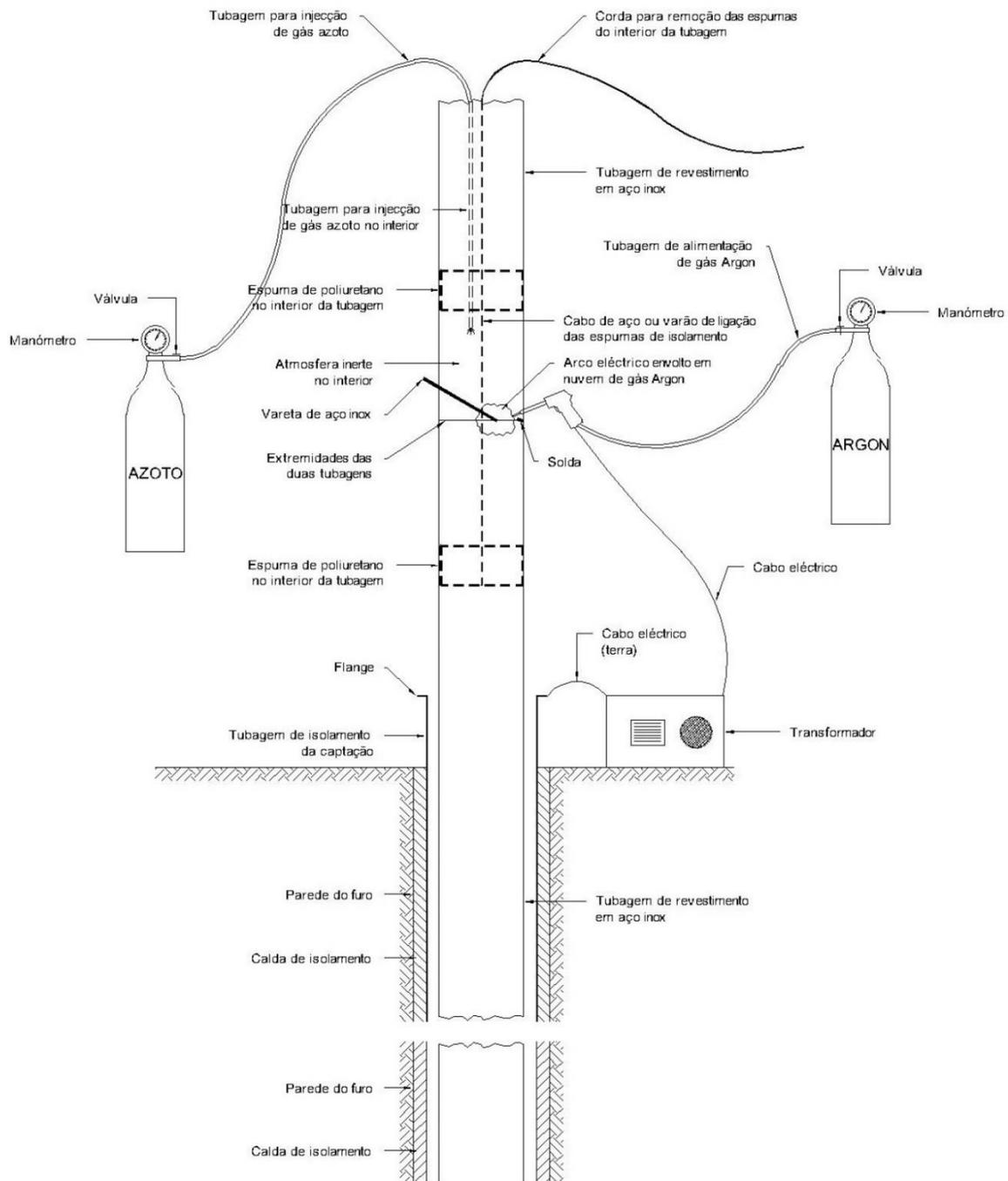
A escolha dos tubos adequados obedece a três fatores (Graça, 2012):

- Profundidade de aplicação;
- Resistência à compressão do material;
- Diâmetro.

Dos fatores supramencionados resultam algumas considerações com base em experiência, que são as que se seguem: no uso de PVC a resistência não deverá ser inferior a 10 kg/cm<sup>2</sup>; se a profundidade do furo exceder os 150 a 200 m será aconselhável a substituição do PVC por tubos de aço; se a tubagem for de aço e os diâmetros externos forem de 203 ou de 273 mm, as espessuras mínimas terão de ser de 6,35 e 7,79 mm, respetivamente (Ferreira *et al.*, 2012).

A partir dos conceitos referidos, a escolha dos tubos será feita com base em cálculos que tenham em conta: a tensão confinada aplicada pelo terreno exterior na coluna, perda de carga ao longo da coluna e o caudal pretendido (ver Anexos ).

Quando se procede à construção do furo com uso de tubos de aço, estes podem ser de entrada lisa ou em rosca. Os tubos de entrada lisa são ligados topo a topo entre um tubo e o seguinte, através do uso de soldadura. Esta deverá ser da mesma composição que o tubo (Graça, 2012), conforme o seguinte esquema (Figura 44).



**Figura 44:** Esquema do dispositivo para a soldadura TIG (soldadura a arco eléctrico com ponta de tungsténio em atmosfera de gás inerte, árgon) entre dois segmentos de tubagens de revestimento final, em aço inox (retirado de Graça, 2012)

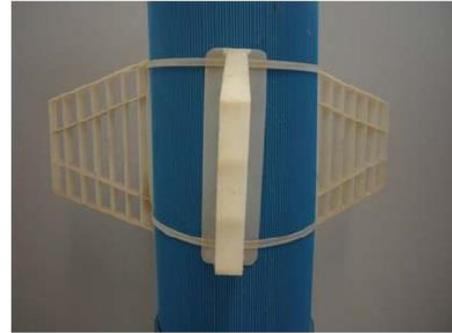
A natureza das ligações feitas entre tubos através de roscas faz com que sejam de fácil aplicação no terreno, sem necessidade de proceder a operações de soldadura, por outro lado constituem um ponto de fraqueza estrutural. No caso das ranhuras da rosca se danificarem (griparem) seria necessário substituir ambos os tubos (Graça, 2012).

Os tubos ralo, de uma forma mais convencional, podem ser divididos em quatro tipos (Ferreira





Centralizador em ferro, com cinco hastes de apoio.



Centralizador em PVC, com três hastes de apoio.



Centralizador em ferro, com quatro hastes de apoio.

**Figura 46:** Diferentes tipos de centralizadores usados em construções convencionais de furos (Graça, 2012)

O maciço drenante é constituído por partículas com uma dimensão previsível, que são introduzidas entre o tubo de revestimento e o furo. Tem como objetivo aumentar a eficiência do furo, permitir o desenvolvimento do maciço envolvente através da saída do material mais fino, em termos de argilas, siltes e areias finas, do sector imediato à captação para o interior da captação na fase de desenvolvimento e minimizar ou impedir a saída de areia do maciço envolvente para o interior do furo e impedir que as paredes do furo pressionem contra o tubo de revestimento com a possibilidade de o danificar (Graça, 2012).

No caso da formação furada ser pouco alterada a sã, e pouco fraturada, pode nem ser construído maciço drenante, com os ralos a serem diretamente aplicados contra o maciço. Nestes casos, as partículas finas que possam estar a preencher as fraturas são removidas na fase de desenvolvimento da captação. Pode até nem ser necessário proceder à colocação de ralos, basta que haja o isolamento da parte superior do furo, deixando a parte inferior sem qualquer tipo de encamisamento, *open hole* (Graça, 2012). Neste último caso, a bomba submersível tem de ser sempre colocada dentro do tubo fechado acima da área em *open hole*, para não se correr o risco de ficar com a bomba presa por queda de alguma pedra no interior da captação sem proteção do tubo.

A fase de construção num ambiente convencional pode então ser sintetizada pelo esquema da

Figura 47.

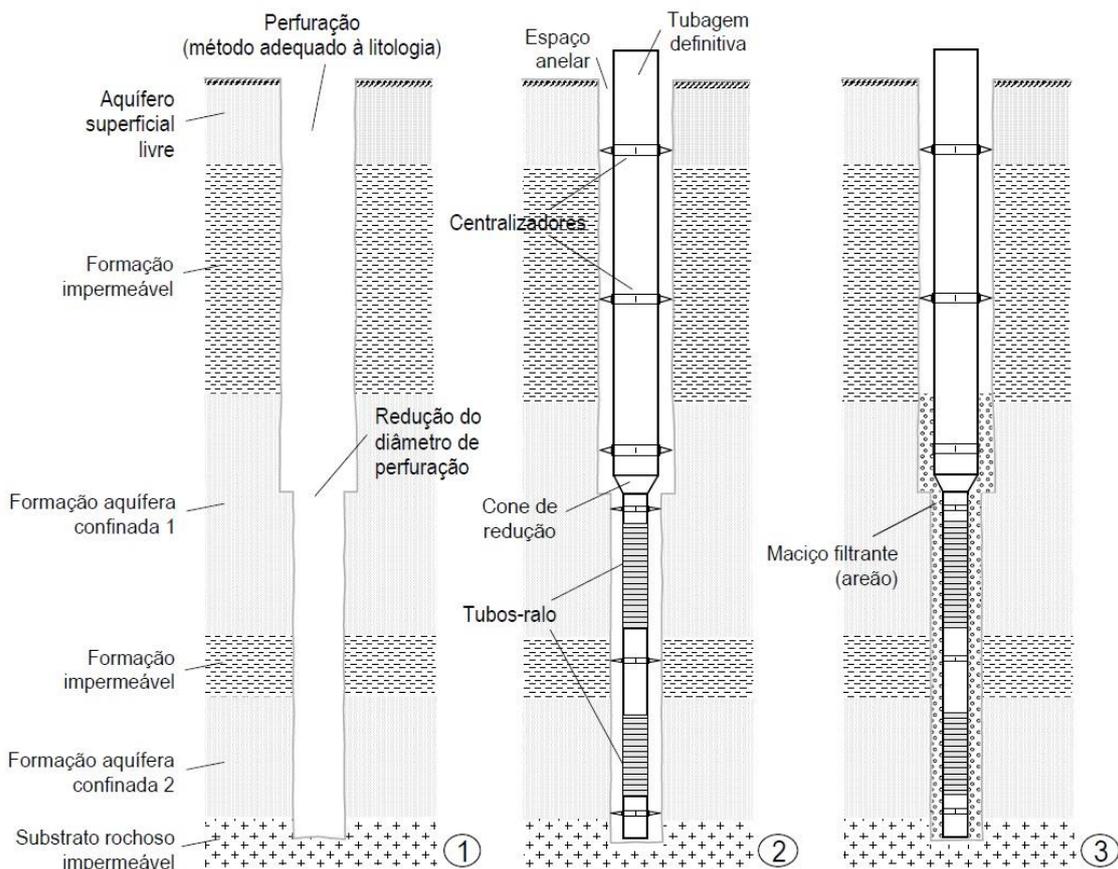


Figura 47: Exemplo de um esquema genérico relativo à sequência de construção das fases principais de um furo com redução de diâmetro de perfuração (Ferreira et al., 2012)

#### 4.2.2. Tradicionais

A metodologia de construção tradicional está associada ao método de prospeção *sludging* do Norte de Bengala. Da mesma forma que com o método de prospeção, tem por base os materiais presentes no local da sondagem, a sua fabricação e montagem é feita *in situ* e está incluída no preço da sondagem (Carter, 2005).

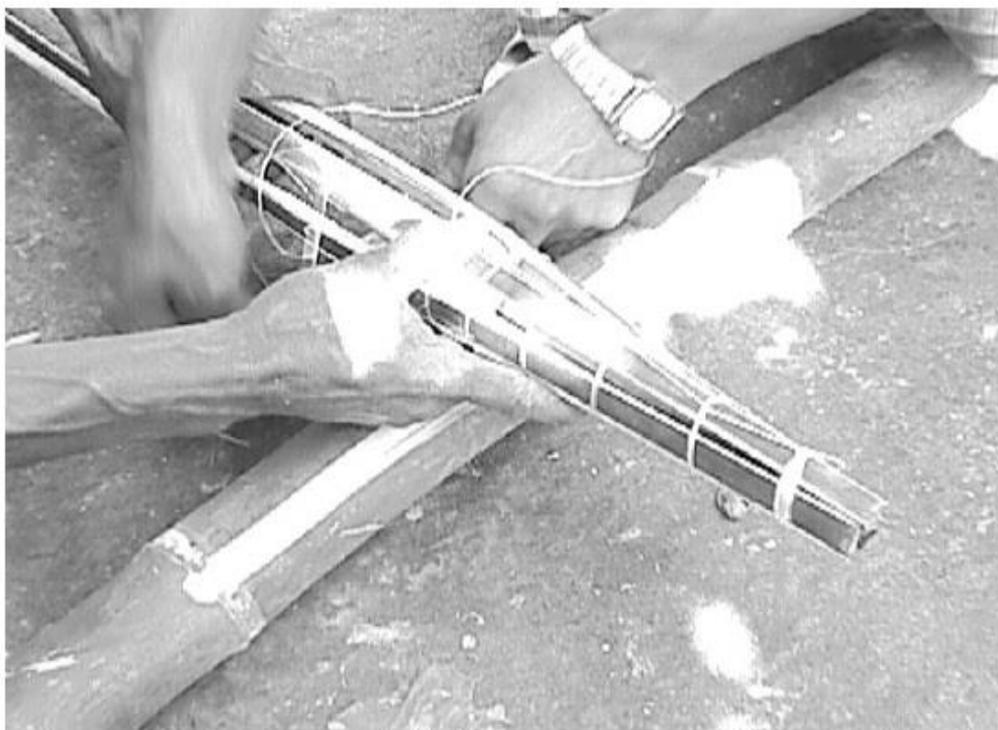
O material para os tubos usados na construção do furo é o bambu, e é empregue tanto na construção dos tubos ralo como na dos tubos fechados. Os tubos ralo são construídos usando seções de varas de bambu, entre 7 e 9, com 10 a 20 mm de largura e 5 mm de espessura (Figura 48) que são fixadas usando seções anelares ocas de cana de bambu com 20 mm de altura (Figura 49). As seções das varas de bambu são presas aos anéis de bambu por fios ou arames (Figura 50), e envolvidas por uma rede feita de faixas de tecido ou de rede mosquiteira, enrolada pelo menos em duas voltas (Figura 51) e apresentam uma duração estimada de 3 anos (Ball e Danert).



*Figura 48: Corte das varas de bambu (Ball e Danert, 1999)*



*Figura 49: Corte das seções anelares de bambu (Ball e Danert, 1999)*



**Figura 50:** Amarrar das varas de bambu cortadas em volta das seções anelares (Ball e Danert, 1999)



**Figura 51:** Envolver a tubagem contruída na Figura anterior com rede mosquiteira (Ball e Danert, 1999)

Os tubos fechados são feitos com varas de bambu de diâmetro que permita acomodar o tubo ralo feito de bambu. As varas de bambu são selecionadas a partir da sua regularidade quanto a diâmetro ao longo da extensão, para que se juntem umas às outras. As varas são retificadas através de uma vara com diâmetro inferior atada com um fragmento cortante de ferro ou aço (Figura 52), que

percorre o interior das varas de bambu, de maneira retificá-las e a permitir continuidade (Figura 53) (Ball e Danert, 1999).



*Figura 52: Ferramenta de corte das varas de bambu (Ball e Danert, 1999)*



*Figura 53: Limpeza das varas de bambu para que possam ser usadas na construção da captação (Ball e Danert, 1999)*

As varas de bambu são unidas umas às outras através de tiras de borracha, de maneira a promover a estanquidade da ligação (Ball e Danert, 1999).

#### 4.2.3. *Low cost*

Os métodos *low cost* acabam por ser muitas vezes a adaptação de elementos usados pelas metodologias convencionais, ou seja, a cumprir funções para as quais não tinham sido criados. Não vêm montados de série e são o resultado da aplicação de princípios mecânicos e/ou hidráulicos simples. São pensados com base na ideia de que a sua construção teria de necessitar de espaços não especializados e de mão-de-obra não especializada, seja *in situ* ou em estaleiro provisório (Carter, 2005). Metodologias de prospeção *low cost* usam mais frequentemente equipamentos *low cost* para construção de captações de água, no entanto a metodologia de prospeção tradicional aqui abordada também pode empregar equipamentos *low cost*. As metodologias aqui consideradas integram componentes que são comuns utilização em construções com tecnologia convencional simplesmente porque o foco de construção é o custo final.

Os tubos usados são, na sua maioria, feitos de PVC, devido ao seu baixo custo de aquisição, facilidade de transporte e facilidade de trabalhar. Tubos fechados podem ter o seu comprimento alterado *in situ*, por forma a cumprir com a especificidade do furo, por via de corte (Figura 54).



*Figura 54: Corte de seção de PVC in situ (Buchner, 2010a)*

Após o corte, a sua forma pode ser alterada através da aplicação de chama, aumentando o diâmetro, alterando o topo para que assuma a configuração de ligação fêmea com outro topo (Figuras 55 a 57).



*Figura 55: Aquecimento do tubo de forma flexibilizar o PVC (Buchner, 2010a)*



*Figura 56: Encaixe forçado com uma peça fria, transformando o topo numa nova forma fêmea (Buchner, 2010a)*



**Figura 57:** É aplicada água para esfriar o tubo de forma, a partir daqui o encaixe está moldado (Buchner, 2010a)

Os tubos fechados são passíveis de serem convertidos em tubos ralo, seja em que diâmetro for. É necessário marcar ao longo do tubo onde serrar e executar o corte (Figura 58 a 59).



**Figura 58:** Marcação das ranhuras a serem cortadas por serra manual (Buchner, 2010b)



*Figura 59: Execução do corte das ranhuras previamente assinaladas (Buchner, 2010b)*

É possível criar tampas de base de coluna para finalizar a construção do furo. O tubo é aquecido até que se torne maleável, é posteriormente dobrado, arrefecido e inserido no tubo com aplicação de cola (Figuras 60 a 63).



*Figura 60: Aquecimento do tubo (Buchner, 2010b)*



*Figura 61: Dobramento da ponta (Buchner, 2010b)*



*Figura 62: Arrefecimento do tubo (Buchner, 2010b)*



*Figura 63: Aplicação de cola nos topos macho e fêmea (Buchner, 2010b)*



**Figura 64:** Encaixe final de tampas de base de coluna (Buchner, 2010b)

Os tubos ralos podem também ser cobertos por forma a filtrar possíveis entradas de sedimentos que possam afetar o normal funcionamento das bombas em uso, para tal podem ser colocadas mangas de *nylon* a cobrir os tubos ralo. As mangas de *nylon* usadas ficam justas ao tubo, são postas do fundo para o topo da tubagem por forma a cobrir a extensão total dos ralos presentes. Por fim a manga é colada nas extremidades da tubagem não abrangida pelas ranhuras, e o excesso de tecido cortado (Figuras 65 a 67).



**Figura 65:** Aplicação da manga de poliéster no tubo ralo e colagem ao tubo (Buchner, 2010b)



**Figura 66:** Corte do excesso de manga (Buchner, 2010b)



**Figura 67:** Aplicação de cola e isolamento do fim da manga de nylon (Buchner, 2010b)

As metodologias *low cost* acabam então por ser a aplicação dos mesmos conceitos e *design* das construções convencionais. Sendo a principal diferença que os elementos a serem aplicados são construídos no momento, sem perda notável de qualidade do recurso extraído, e são de cariz universal, ou seja, a forma de fabrico pode variar ligeiramente, mas parte do uso do PVC enquanto material polivalente de recurso.

## 5. Conclusão

A água é “insubstituível à existência da vida” (OMS, 2002) e, é também amplamente reconhecido, um bem comum (Hess, 2006). Com base nesses conceitos, entidades governamentais e não-governamentais procuram resolver a questão do acesso à água de uma forma mais justa e equitativa por via de opções estratégicas integradas de longo prazo, *Water Acts* ou através de documentação avulsa que surge de acordo com indicações e ideias políticas vigentes.

O conhecimento que existe relativamente à geologia é amplo e sucessivamente atualizado, seja por motivos económicos, ambientais, ou para um melhor conhecimento do território nacional. Foi possível identificar ao longo do traçado dos rios Indus-Ganges-Brahmaputra uma bacia com elevado potencial produtivo.

As metodologias tradicionais de pesquisa exigem um conhecimento e aprendizagem que ocorre ao longo de algum tempo, motivo pelo qual o conhecimento dificilmente se dissemina. As metodologias *low cost* necessitam de um conhecimento técnico que exige também um período de treino alargado, pois grande parte do equipamento tem de ser manufacturado ou no campo ou em espaço de oficina. As metodologias convencionais são as mais onerosas, e exigem conhecimento técnico para a fabricação de algum equipamento ligeiro que diga respeito à perfuração, seja em espaço de sondagem ou em espaço de oficina.

Do ponto de vista da aplicação, tanto as metodologias *low cost* como as tradicionais são muito limitadas no que diz respeito às formações que conseguem atravessar. Utilizam-se apenas em rochas sedimentares arenosas ou argilosas, incluindo aluviões, e são inviáveis quando se tenta perfurar formações alteradas e fraturadas, independentemente do tipo de rocha.

Quanto à construção, não parece ser possível falar em diferenças entre metodologias convencionais, *low cost* e tradicionais. Os princípios e técnicas são os mesmos, mudando apenas os materiais que são empregues. Essa diferença é o suficiente para impactar de forma determinante os custos da construção da captação. Nos três casos, a aplicação da tecnologia requer agentes especializados, capazes de dominar os conhecimentos envolvidos.

## Referências bibliográficas

- Almeida, C., Mendonça, J., Duarte, R., Quina, A., Neves, J. (2000). *Glossário de Termos Hidrogeológicos*. Centro de Geologia do Instituto Superior Técnico e Instituto da Água. p. 55. Retirado de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779576358131/Glossario%20de%20Termos%20Hidrogeologicos.pdf>
- Ali, A. (2010). *Structural Analysis of the Trans-Indus Ranges: Implications for the Hydrocarbon Potential of the NW Himalayas, Pakistan* [Tese de Doutoramento]. National Centre of Excellence in Geology, Universidade de Peshawar. Retirado de [http://nceg.uop.edu.pk/Thesis/PhD/Thesis20/Amjad\\_PhD\\_Thesis.pdf](http://nceg.uop.edu.pk/Thesis/PhD/Thesis20/Amjad_PhD_Thesis.pdf)
- Aryal, R. (2011). *The Law on Ownership and Right to Water in Nepal*. Global Water Partnership Nepal. Katmandu. Retirado de <http://www.jvs-nwp.org.np/sites/default/files/Water%20Right%20and%20Ownership%20in%20Nepal.pdf>
- Asif, M. (2010). *Geochemical Applications of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Crude Oils and Sediments from Pakistan* [Tese de Doutoramento]. Departamento de Química da Universidade de Engenharia e Tecnologia, Lahore. Retirado de <http://eprints.hec.gov.pk/4030/>
- BWA (2013). *Bangladesh Water Act*. Governo da República Popular do Bangladeche – Ministério da Lei, Justiça e Assuntos Parlamentares, Divisão dos Assuntos Parlamentares e Legislativos. 06 de Novembro. Retirado de <http://www.ielrc.org/content/e1313.pdf>
- Ball, P. e Carter, R. (2000). Specification and Drawings for the Pounder Rig. In Report of DFID KAR Project R7126 *Private Sector Participation in Low Cost Water Well Drilling*, 1ª Ed. Universidade de Cranfield. Retirado de <http://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/403>
- Ball, P. e Danert, K. (1999). *Hand Sludging - A Report from North West Bengal*. Universidade de Cranfield. Retirado de <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3039/1/Hand%20Slugging-A%20report%20from%20West%20Bengal-1999.pdf>
- Bandaragoda, T. (1995). *Water Laws in Pakistan: A Syntheses of Traditions and Enactments*. IIMI Paquistão. Retirado de <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/40119>
- Bandaragoda, O. e Rehman, S. (1995). *Warabandi in Pakistan's canal irrigation systems: Widening gap between theory and practice*. Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute. 89. (IIMI Country Paper, Paquistão No.7), ISBN: 92-9090-169-1. Retirado de [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNABY457.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABY457.pdf)
- Baptista, H. (2016). *Acompanhamento da construção de uma captação de água subterrânea* [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia. Retirado de [http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/24133/1/ulfc118309\\_tm\\_H%C3%A9lder\\_Baptista.pdf](http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/24133/1/ulfc118309_tm_H%C3%A9lder_Baptista.pdf)
- Benn, D. (2001). Lectures GG 2002 Regional Geography of South Asia and the Himalayas - 1: Geological Evolution of South Asia and the Himalayas. Universidade de St. Andrew, Reino Unido retirado de <https://www.st-andrews.ac.uk/~dib2/asia/himal.html> a 10-01-2016
- Blair Research Laboratory. (1988). *Instructions for Drilling Tubewells with the Vonder Rig*. Retirado

de <http://resources.bgs.ac.uk/sadcreports/zimbabwe1988morganinstructionsfordrillingtube wells.pdf>

- Brumfiel, G. (2006). Seismology: Shaking the foundations. In *Nature* 440, 16-18, março, doi:10.1038/440016a. Retirado de <http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7080/full/440016a.html>
- Buchner, W. [EMAS]. (2010a, janeiro 03). Well drilling - sludging with temporary casing - part 1 [vídeo]. Retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=qHwReBdKkr8>
- Buchner, W. [EMAS]. (2010b, janeiro 03). Well drilling - sludging with temporary casing - part 2 [vídeo]. Retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=EljSb7-z5fU>
- Buchner, W. [EMAS]. (2010c, janeiro 03). *Well drilling - standard EMAS method - part 1* [vídeo]. Retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=B9zXHlrsdiw>
- Burrows, R. (2006). *Design of a low cost, hand operated drill rig appropriate for adoption by sub-Saharan Africa's private sector*. Universidade de Cranfield, Reino Unido. Retirado de [http://www.watersanitationhygiene.org/References/EH\\_KEY\\_REFERENCES/WATER/Drilling/Hand%20Drilled%20Boreholes/Design%20of%20a%20Low-Cost%20Drilling%20Rig%20\(Cranfield%20-%20Burrows%20G\).pdf](http://www.watersanitationhygiene.org/References/EH_KEY_REFERENCES/WATER/Drilling/Hand%20Drilled%20Boreholes/Design%20of%20a%20Low-Cost%20Drilling%20Rig%20(Cranfield%20-%20Burrows%20G).pdf)
- CIA (2016). *The CIA Fact Book*. Central Intelligence Agency - Langley, Virgínia. Estados Unidos da América. Retirado de <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2119.html#bt>
- Carter, R. (1985). Groundwater development using jetted boreholes. In *Waterlines*, 3(3). Retirado de <http://www.developmentbookshelf.com/doi/abs/10.3362/0262-8104.1985.006?journalCode=wl>
- Carter, R. (2001). *Private Sector Participation in Low Cost Water Well Drilling - Knowledge and Research (KAR) Project R7126 FINAL REPORT*. Universidade de Cranfield, Silsoe (Reino Unido). Retirado de <http://www.rural-water-supply.net/fr/resources/details/177>
- Carter, R. (2005). *Human-Powered Drilling Technologies - an overview of human-powered drilling technologies for shallow small diameter well construction, for domestic and agricultural water supply*. Universidade de Cranfield, Silsoe. Retirado de <http://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/402>
- Chandrasekaran, C. Umashankar, P. Duraiswaminathan, V. Jayakumar, R. (S/D). *Water Users Association for Sustainable Water Management - Experiences from the Irrigation Sector, Tamil Nadu, India*. UNESCO, Nova Deli. Retirado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001356/135674eo.pdf>
- Cloesen, P. (2007). *Baptist Drilling*. Retirado de <http://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/135>
- Cullet, P. (2007). *Water Law in India - Overview of Existing Framework and Proposed Reforms*. International Environmental Law Research Centre. Suíça. Retirado de <http://www.ielrc.org/content/w0701.pdf>
- Cunha, L. (2009). Water: A human right or an economic resource? *Water Ethics* - Marcelino Botín

- Water Forum 2007, Taylor & Francis Group Londres, Reino Unido. Retirado de <http://collections.unu.edu/eserv/UNU:2780/Water-Ethics.pdf>
- Dahal, R.K. (2006). *Geology of Nepal*. Retirado de <http://www.ranjan.net.np/index.php/resources/geology-of-nepal>
- Danert, K. (2009). *Hand Drilling Directory - Cost Effective Boreholes*. Rural Water Supply Network. Retirado de [http://www.rural-water-supply.net/\\_ressources/documents/default/156.pdf](http://www.rural-water-supply.net/_ressources/documents/default/156.pdf)
- Directorate General Agriculture (n/d). Water Users' Associations. Retirado de [http://ofwm.agri.punjab.gov.pk/services\\_registration\\_wua](http://ofwm.agri.punjab.gov.pk/services_registration_wua)
- FAO (2011). *Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures – Aquastat Survey – Bangladesh, Bhutan, India*. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Retirado de <http://www.fao.org/docrep/016/i2809e/i2809e.pdf>
- FAO (2013). *FAO Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture*. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Retirado de <http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>
- FAO (2015). AQUASTATDFO. AQUASTAT [Base de Dados]. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Retirado de <http://data.fao.org/ref/75f7d9c5-57ab-4a62-88d3-91e47fb50c45.html?version=1.0>
- Ferreira, J. Brito, A. Silva, A. Sampaio, J. Tavares, T. (2012). *Manual de Boas Práticas para Execução e Exploração de Furos de Captação de Águas Subterrâneas*. Instituto Português da Qualidade - Ministério da Economia e Emprego, Comissão Setorial para a Água (CS/04). Retirado de [http://www1.ipq.pt/PT/SPQ/ComissoesSectoriais/CS04/Documents/Manual\\_Furos\\_Captacao.pdf](http://www1.ipq.pt/PT/SPQ/ComissoesSectoriais/CS04/Documents/Manual_Furos_Captacao.pdf)
- Garzanti, E. (1999). Stratigraphy and sedimentary history of the Nepal Tethys Himalaya passive margin. In *Journal of Asian Earth Sciences* 17, 805-827. Retirado de <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S1367912099000176>
- Gawel, A. e Ahsan, I. (2014). *Review and Compendium of Environmental Policies and Laws in Bhutan - Input to the Asian Judges Network on Environment*. Banco de Desenvolvimento Asiático. Retirado de <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/150136/review-compendium-environmental-policies-and-laws-bhutan.pdf>
- Google (2015). Google Earth – Localização de variadas nações, Butão, Índia, Paquistão, Bangladeche [Software de computador].
- Governo do Paquistão Ocidental. (1965). West Pakistan Land and Water Development Board (Control over Underground Waters) Rules, 1965. Retirado de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/pak18871.pdf>
- Graça, H. (2012). *Execução de uma Captação*. Cadernos Técnicos APIAM - Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais e de Nascentes. Retirado de <http://www.apiam.pt/publicacoes/Cadernos-T%C3%A9cnicos/-/47/23/46>

- Haghipour, A. [coordenador] (2009). *International Geological Map of the Middle East*. Commission for the Geological Map of the World - Subcommission for the Middle East. Retirado de <https://pt.scribd.com/doc/82874333/International-Geological-Map-of-the-Middle-East>
- Hayes, G. (2015). *The April-May 2015 Nepal Earthquake Sequence*. Serviços Geológicos dos Estados Unidos da América - Centro Nacional de Informação de Sísmica. Retirado de [http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Nepal\\_Slides.pdf](http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Nepal_Slides.pdf)
- Henderson, A. Najman, Y. Parrish, R. BouDagher-Fadel, M. Barford, D. Garzanti, E. Andò, S. (2010). Geology of the Cenozoic Indus Basin sedimentary rocks: Paleoenvironmental interpretation of sedimentation from the western Himalaya during the early phases of India-Eurasia collision. In *Tectonics*, 29, 1-35. Retirado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009TC002651/abstract>
- Herrera, J. e Castilla, J. (2012). *Utilización de Técnicas de Sondeos en Captaciones de Agua*. Laboratorio de Tecnologías Mineras, Departamento de Explocati3n de Recursos Minerales y Obras Subterráneas - Universidad Politécnica de Madrid.
- Hess, C. (2006). Research on the Commons, Common-Pool Resources, and Common Property. Retirado de <http://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/contentguidelines>
- Jessup, M. (2013). *Mid-crustal processes in the Himalaya*. Ensaio. Universidade do Tennessee–Knoxville. Retirado de <https://geosociety.wordpress.com/2013/08/28/mid-crustal-processes-in-the-himalaya/>
- Jetting - EMAS method. (2016). In Akvopedia. Retirado de [http://akvopedia.org/wiki/Jetting\\_-\\_EMAS\\_method](http://akvopedia.org/wiki/Jetting_-_EMAS_method)
- Ju, W. Hou, G. Hari, K. (2013). Mechanics of mafic dyke swarms in the Deccan Large Igneous Province: Palaeostress field modelling. *Journal of Geodynamics* 66, 79–91. Retirado de: [https://www.researchgate.net/publication/236156750\\_Mechanics\\_of\\_mafic\\_dyke\\_swarms\\_in\\_the\\_Deccan\\_Large\\_Igneous\\_Province\\_Palaeostress\\_field\\_modelling](https://www.researchgate.net/publication/236156750_Mechanics_of_mafic_dyke_swarms_in_the_Deccan_Large_Igneous_Province_Palaeostress_field_modelling)
- Kansakar, D. (2011). *Regulating Common Pool Groundwater under Fugitive Surface Water Law: Limitations in Laws and Regulations in Nepal*. Global Water Partnership Nepal. Retirado de <http://www.jvs-nwp.org.np/sites/default/files/Water%20Laws%20and%20Regulations%20in%20Nepal.pdf>
- Khan, I. e Clyde, W. (2013). Lower Paleogene Tectonostratigraphy of Balochistan: Evidence for Time-Transgressive Late Paleocene-Early Eocene Uplift. *Geosciences* 3, 466-501. DOI: 10.3390/geosciences3030466. Retirado de <http://www.mdpi.com/2076-3263/3/3/466/pdf>
- Koegel, R. (1985). *Self Help Wells*. FAO Irrigation and Drainage Paper, FAO, Roma. Retirado de <http://www.fao.org/docrep/x5567e/x5567e00.htm>
- Koonan, S. e Bhullar, L. (2012). *Water Regulatory Authorities in India – The Way Forward*. Centro de Investiga3n das Leis Ambientais Internacionais (IELRC). Retirado de <http://www.ielrc.org/content/p1204.pdf>
- Kumar, R. Suresh, N. Sangode, S. Kumaravel, V. (2007). Evolution of the Quaternary alluvial fan system in the Himalayan foreland basin: Implications for tectonic and climatic decoupling.

*Quaternary International* 159, 6–20. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104061820600200X>

Larson, K.P. (2012). The geology of the Tama Kosi and Rolwaling valley region, East-Central Nepal Geosphere, April 2012, 8, 507-517

Long, S. McQuarrie, N. Tobgay, T. Grujic, D. Hollister, L. (2011a). *Geologic Map of Bhutan*. Journal of Maps. Retirado de [http://www.pitt.edu/~nmcq/Long\\_et al\\_2011\\_JOM\\_Bhutan\\_Map\\_1-500k.pdf](http://www.pitt.edu/~nmcq/Long_et al_2011_JOM_Bhutan_Map_1-500k.pdf)

Long, S. McQuarrie, N. Tobgay, Rose, C. Gehrels, G. Grujic, D. (2011b). Tectonostratigraphy of the Lesser Himalaya of Bhutan: Implications for the along-strike stratigraphic continuity of the northern Indian margin. *Geological Society of America Bulletin*, julho/agosto. Retirado de [https://www.princeton.edu/geosciences/people/mcquarrie/pdf/long-30202\\_v1.pdf](https://www.princeton.edu/geosciences/people/mcquarrie/pdf/long-30202_v1.pdf)

Medeiros, A. Silva, A. Graça, H. Silva, V. (2011). Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais - Grupo de Trabalho Sobre Furos de Captação de Água. Retirado de [http://livrozilla.com/doc/1509905/4335\\_henrique-gra%C3%A7a-furos-capata%C3%A7%C3%A3o](http://livrozilla.com/doc/1509905/4335_henrique-gra%C3%A7a-furos-capata%C3%A7%C3%A3o)

Mukherjee, A. Fryar, A. Scanlon, B. Bhattacharya, P. Bhattacharya A. (2011). Elevated arsenic in deeper groundwater of western Bengal basin, India: extents and controls from regional to local-scale. *Applied Geochemistry*, 26, 600–613. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292711000187>

Mukherjee, A. Saha, D. Harvey, C. Taylor, R. Ahmed, K. Bhanja, S. (2015). Groundwater systems of the Indian Sub-Continent. *Journal of Hydrology : Regional Studies* 4, 1–14. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000233>

NWMP (2001). *National Water Management Plan*. Governo da República Popular do Bangladeche – Ministério dos Recursos Hídricos. Organização do Planeamento dos Recursos Hídricos – Volume 1. dezembro. Retirado de <http://www.buet.ac.bd/itn/publications/sector-documents/documents/nwmpv20041.pdf>

OMS (2002). Water for health enshrined as a human right. Retirado de <http://www.who.int/media/centre/news/releases/pr91/en/>

ONU (1992). *Dublin Statement*. International Conference on Water and the Environment. United Nations. Dublin, Ireland. Retirado de <http://www2.ohchr.org/english/bodies/HRTD/docs/DublinStatement.pdf>

ONU (2003). General Comment No. 15 (2002) - The right to water (arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights). Conselho Económico e Social – Questões substantivas emergentes na implementação de acordos internacionais acerca de direitos económicos, sociais e culturais. Retirado de [http://www2.ohchr.org/english/issues/water/docs/CESCR\\_GC\\_15.pdf](http://www2.ohchr.org/english/issues/water/docs/CESCR_GC_15.pdf)

ONU (2004). Maps of East Asia. Retirado de <http://www.un.org/Depts/Cartographic/map/profile/banglade.pdf>

ONU (2006). Human Development Report 2006 - Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. Publicado para o Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (UNDP).

Retirado de <http://hdr.undp.org/sites/default/files/reports/267/hdr06-complete.pdf>

- Ozha, M. Mishra, B. Hazarika, P. Jeyagopal, A. Yadav, G. (2016). EPMA monazite geochronology of the basement and supracrustal rocks within the Pur-Banera basin, Rajasthan: Evidence of Columbia breakup in Northwestern India. *Journal of Asian Earth Sciences* 117, 284–303. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136791201530170X>
- PPIS (2010a). *New Blocks for Bidding Round 2010 – Central Indus Platform Basin*. Serviço de Informação Paquistânês de Petróleo – PPIS. Governo do Paquistão. Retirado de <http://www.ppisonline.com/IOP2010/data/technical-writeup/central-indus-basin.pdf>
- PPIS (2010b). *New Blocks for Bidding Round 2010 – Lower Indus Platform Basin*. Serviço de Informação Paquistânês de Petróleo – PPIS. Governo do Paquistão. Retirado de <http://ppisonline.com/iop2010/data/technical-writeup/lower-indus-platform.pdf>
- PPIS (2010c). *New Blocks for Bidding Round 2010 - Balochistan Foldbelt Basin*. Serviço de Informação Paquistânês de Petróleo - PPIS. Governo do Paquistão. Retirado de <http://ppisonline.com/iop2010/data/technical-writeup/balochistan-basin.pdf>
- Parlamento do Butão. (2011). The Water Act of Bhutan 2011. Retirado de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/bhu106322.pdf>
- Pati, P. Pradhan, R. Dash, C. Parkash, B. Awasthi, A. (2015). Terminal fans and the Ganga plain tectonism: A study of neotectonism and segmentation episodes of the Indo-Gangetic foreland basin, India. *Earth-Science Reviews* 148, 134–149. Elsevier. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825215300052>
- Politejo (2012). *Tubos PVC - Manual Técnico*. Retirado de [http://politejo.com/pdf/catalogos/Catalogo\\_Tecnico\\_Comercial\\_de\\_Tubos\\_PVC.pdf](http://politejo.com/pdf/catalogos/Catalogo_Tecnico_Comercial_de_Tubos_PVC.pdf)
- Practica (2014). *Rota-Sludge Manual Drilling*. Fundação Practica, [www.practicafoundation.nl](http://www.practicafoundation.nl). Retirado de <http://practica.org/wp-content/uploads/2014/08/PS-Rota-Sludge.pdf>
- Qureshi, A. McCornick, P. Sarwar, A. Sharma, B. (2010). *Challenges and Prospects of Sustainable Groundwater Management in the Indus Basin, Pakistan*. IWMI - International Water Management Institute. Retirado de [http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/5967/McCornick\\_Challenges%20and%20prospects%20of%20sustainable%20groundwater\\_2010.pdf?sequence=1](http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/5967/McCornick_Challenges%20and%20prospects%20of%20sustainable%20groundwater_2010.pdf?sequence=1)
- Qureshi, A. e Sayed, A. (2014). Situation Analysis of the Water Resources of Lahore Establishing a Case for Water Stewardship. WWF – Paquistão. Retirado de [https://eeas.europa.eu/delegations/pakistan/documents/press\\_corner/20141204\\_01\\_en.pdf](https://eeas.europa.eu/delegations/pakistan/documents/press_corner/20141204_01_en.pdf)
- Roy, A. e Chatterjee, A. (2015). Tectonic framework and evolutionary history of the Bengal Basin in the Indian Subcontinent. *Current Science*, Vol. 109, nº 2, 25 julho. Retirado de [https://www.researchgate.net/publication/280094358\\_Tectonic\\_framework\\_and\\_evolutionary\\_history\\_of\\_the\\_Bengal\\_Basin\\_in\\_the\\_Indian\\_subcontinent](https://www.researchgate.net/publication/280094358_Tectonic_framework_and_evolutionary_history_of_the_Bengal_Basin_in_the_Indian_subcontinent)
- Riparian Rights (n.d.) *West's Encyclopedia of American Law*, 2ª edição. (2008). Retirado de <http://legal-dictionary.thefreedictionary.com/Riparian+Rights>
- SWS (2001). *The SWS Well-Jetting Technique*. Retirado de <http://www.swsfilt.co.uk/tech/tech3.htm>

- Saleem, A. (2013). *Analysis and Geochemistry of Waxy Crude Oils from Pakistan* [Tese de Doutoramento]. Departamento de Química da Universidade de Engenharia e Tecnologia, Lahore. Retirado de <http://eprints.hec.gov.pk/10403/>
- Shah, S. (2011). The Provision and Violation of Water Rights (The Case of Pakistan) - A Human Rights Based Approach. Working Paper - Centro de Investigação de Desenvolvimento de Políticas, Universidade de Ciências de Gestão de Lahore. Retirado de <http://waterinfo.net.pk/?q=node/773>
- Smith, A. Lingas, E. Rahman, M. (2000). Contamination of drinking water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bull, World Health Org.* 78 (9), 1093–1103. Retirado de [http://www.who.int/bulletin/archives/78\(9\)1093.pdf](http://www.who.int/bulletin/archives/78(9)1093.pdf)
- Sotra (2015). *PVC Bi-Oriented Pipes - Technical Handbook*. Sotra Seperef. Retirado de [http://www.sotra-seperef.com/images/LIVRET\\_TECHNIQUE\\_BO\\_2015\\_anglais\\_tcm121-30771.pdf](http://www.sotra-seperef.com/images/LIVRET_TECHNIQUE_BO_2015_anglais_tcm121-30771.pdf)
- Sriramadas, A. (1967). Geology of Eastern Ghats in Andhra Pradesh. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section B*, 66(5), 200-205. Retirado de <http://link.springer.com/article/10.1007/BF03052185>
- Tobgay, T. McQuarrie, N. Long, S. Kohn, M. Corrie, S. (2012). The age and rate of displacement along the Main Central Thrust in the western Bhutan Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 319-320, 146–158. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X11007199>
- UNESCO (2012). Managing Water Report under Uncertainty and Risk — The United Nations World Water Development, Report 4, Volume 1. Retirado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWDR4%20Volume%201-Managing%20Water%20under%20Uncertainty%20and%20Risk.pdf>
- Waller, T. (2008). The “Baptist” Water For All manual/motorized drilling method - A update showing some parameters of the “Baptist” drilling method. Concerning depth, hard ground, well clubs etc. Water For All International. Retirado de <http://www.waterforallinternational.org/Documents/Update%20%20Baptis%20drilling%20technique%20parameters.pdf>
- Wandrey, C. Law, B. Shah, H. (2007). *Patala-Nammal Composite Total Petroleum System, Kohat-Potwar Geologic Province, Pakistan*. Petroleum Systems and Related Geologic Studies in Region 8, South Asia - U.S. Geological Survey Bulletin 2208-B. Retirado de <https://pubs.usgs.gov/bul/b2208-b/b2208-b.pdf>
- Williams C. (2014). Rota Sludge Drilling. Retirado de <http://www.mawama.org/rota-sludge-drilling>
- Zaisheng, H. e Hao, W. (2006). Groundwater Resources in Asia - Problem and Challenge. 34<sup>o</sup> Congresso da Associação Internacional de Hidrogeólogos. Instituto Geológico da China – CGS.

# Anexos

Mapa Geológico do Bangladeche

(ver ficheiro com nome Mapa Geológico do Bangladeche)

Mapa Geológico do Butão

(ver ficheiro com nome Mapa Geológico do Butão)

## Sludging de Bengala

### Forças aplicadas

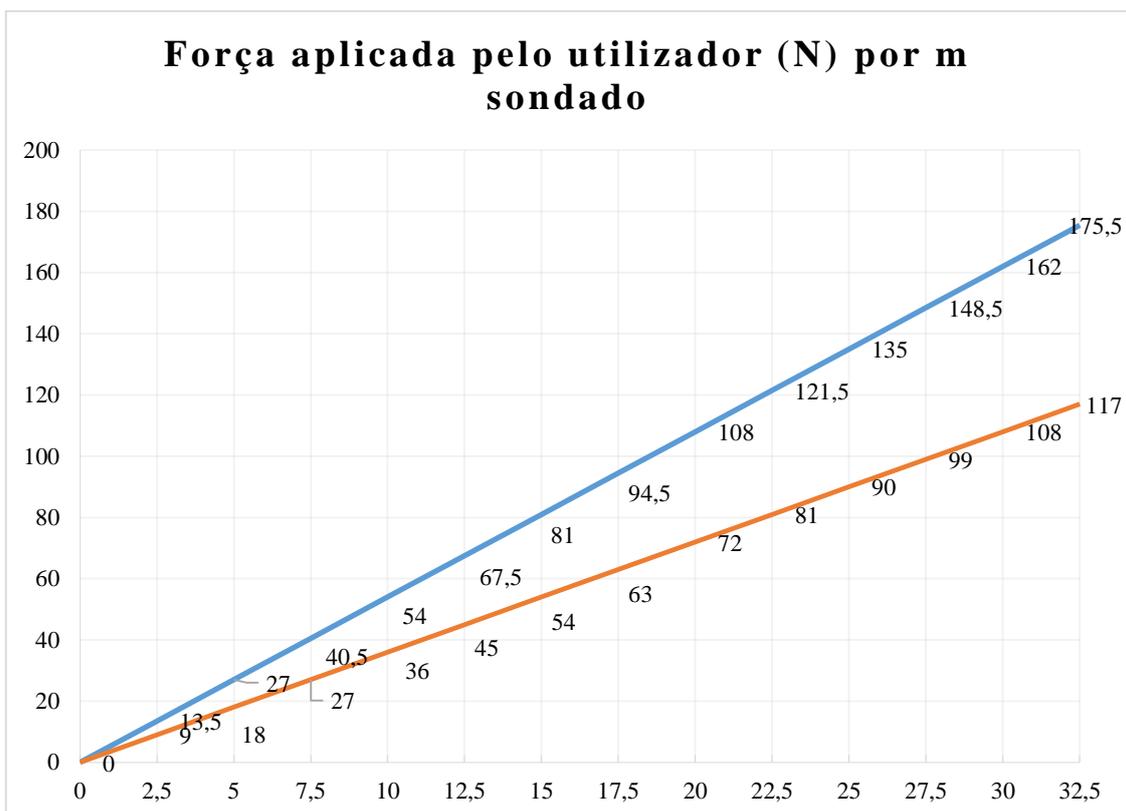
Esta variante do *sludging* retira a sua eficiência do uso do princípio da alavanca, a

- (1)  $M_1 = M_2$
- (2)  $F_1 \cdot a = F_2 \cdot b$
- (3)  $F_1 \cdot \frac{a}{b} = F_2$

O que portanto indica que a força em 2 é k vezes superior à força em 1.

É no entanto necessário assegurar que o ponto no pivot não cede, com tal, é necessário que esteja segura. Portanto para que haja equilíbrio de forças, é necessário que em 3 a força exercida seja:

- (4)  $\Sigma F = 0$   $F_{res} = F_1 + F_2 + F_3$
- (5)  $F_{res} = 0$   $0 = F_1 + F_2 - F_3$
- (6)  $F_3 = F_1 + F_2$
- (7)  $F_2 = F_1 \cdot k$   $F_3 = F_1 + (k \cdot F_1)$
- (8)  $F_3 = (k+1) \cdot F_1$



**Gráfico 1:** Força necessária, em N, aplicar para sondar, em m, tem como base os valores tidos por Danert e Ball, 1999

*para a sondagem a 10m (108N). A azul está representada para uma razão de distâncias de a para b de 2 para 1 e a cor de laranja para uma razão de 3 para 1.*

## Método de escolha de tubagem

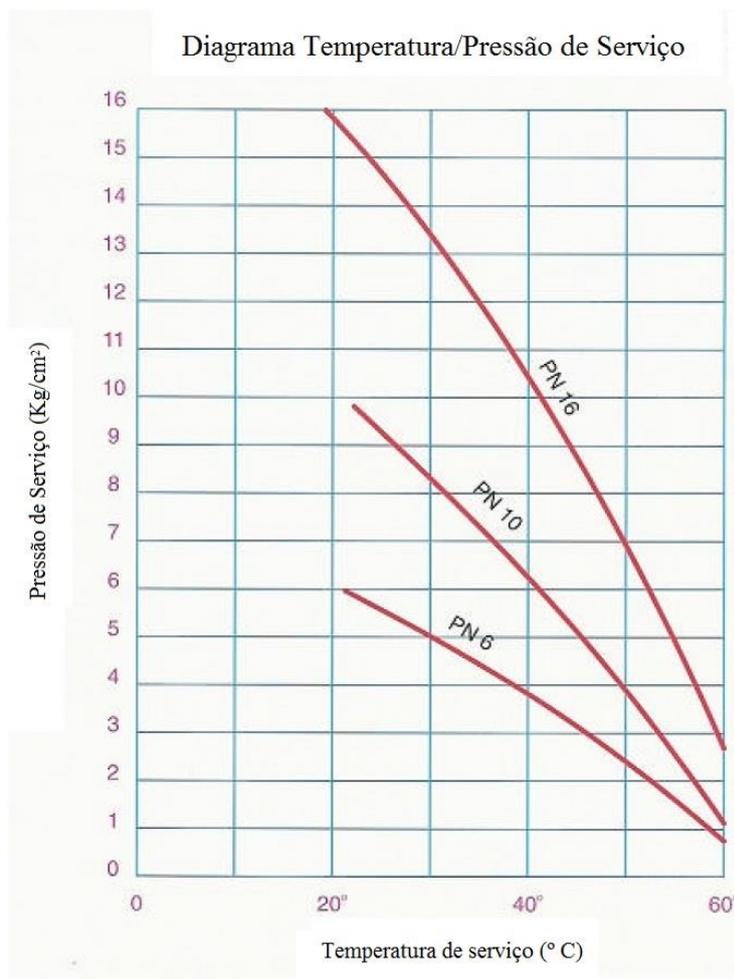
A escolha da tubagem adequada tem de ter em conta as condições em que o material vai atuar (Gráfico 3). Para além disso pode ser estimada, num pior cenário possível, a profundidade a que um tubo pode resistir através do cálculo da tensão usando a seguinte fórmula.

$$\sigma = K \times \gamma \times h \quad (9)$$

Em que  $\sigma$  será a tensão, K uma constante relacionada o ângulo do grão (admite valores entre 0 e 1 em que 1 será o pior caso possível) e h a profundidade. Em que  $\sigma$  corresponde aos valores de tensão suportáveis pelos tubos de 16, 10 e 6 bar, K é 1 e  $\gamma$  é o pior valor possível de encontrar que diz respeito a peso volúmico de solo, areia saturada tabelado, em que se encontra a tubagem. Nessas condições h corresponde ao valor a partir do qual se desaconselha o uso do tubo de PVC com a resistência marcada.

**Tabela 5:** Cálculo de resistência de tubagem em PVC com coluna de furo constituída por areia saturada

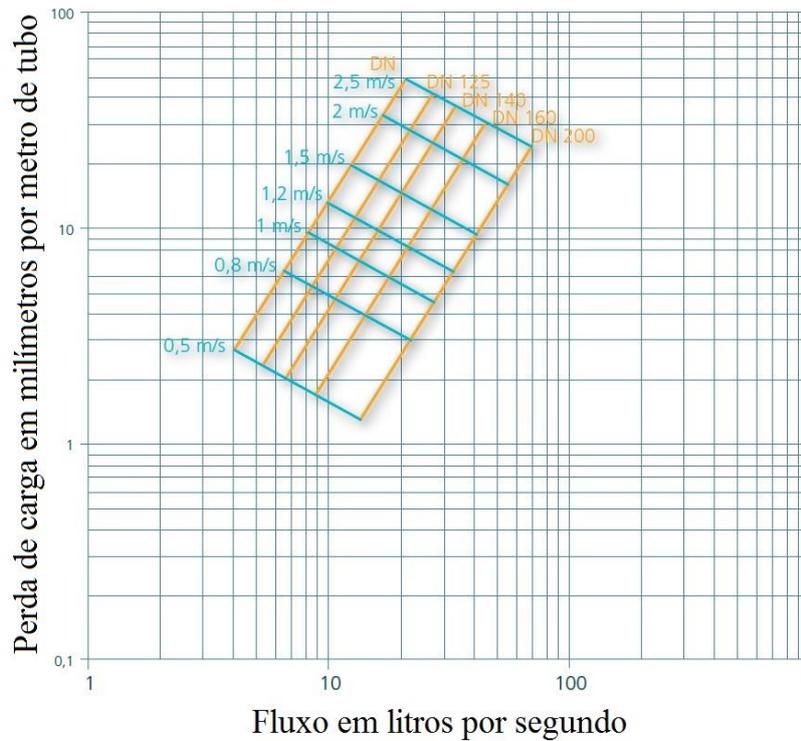
$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (N/m <sup>2</sup> )	h (m)
21000	1600000	76,19
21000	1000000	47,62
21000	600000	28,57



**Gráfico 2:** Condições em que os tubos de PVC operam (Politejo, 2012)

### Perdas de Carga

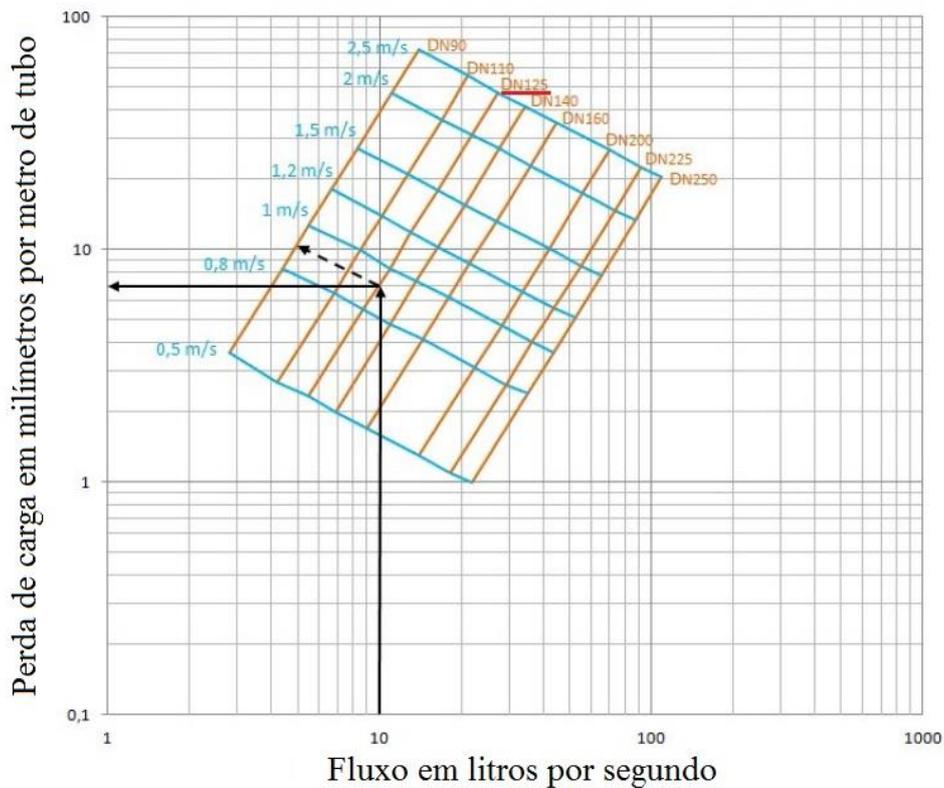
De forma a saber de forma expedita quais as perdas de carga para um determinado tubo, a partir da fórmula de Colebrook para água a uma temperatura de 15° C, traçou-se o seguinte ábaco (Gráfico 3) tendo em consideração os diâmetros internos dos tubos usados e velocidades de fluxo pretendidas para determinar as perdas de carga.



**Gráfico 3:** Ábaco usado para calcular a perda de carga de tubos do modelo PN 25 da série BI-OROC (adaptado de Sotra, 2015)

#### Exemplo de uso do ábaco para a escolha dos tubos

Cada ábaco é definido tendo em base a pressão operacional da série de tubos, neste caso em particular a pressão considerada será de 16 bar, no ábaco anterior era de 25 bar (PN 25). Assim o Gráfico (4) deverá ser abordado da seguinte forma: ao partir do uso de um fluxo de 10 litros por segundo, será traçada uma linha vertical que vai até onde interceta a linha que corresponde à referência DN 125, que diz respeito a um diâmetro de 125 mm. Traça-se uma linha até o eixo das ordenadas onde está representada a perda de carga, neste caso será de 7 mm por metro de tubo, ou seja, com uma tubagem com 1000 m perderia 7 mca, o equivalente a 0,7 bar.



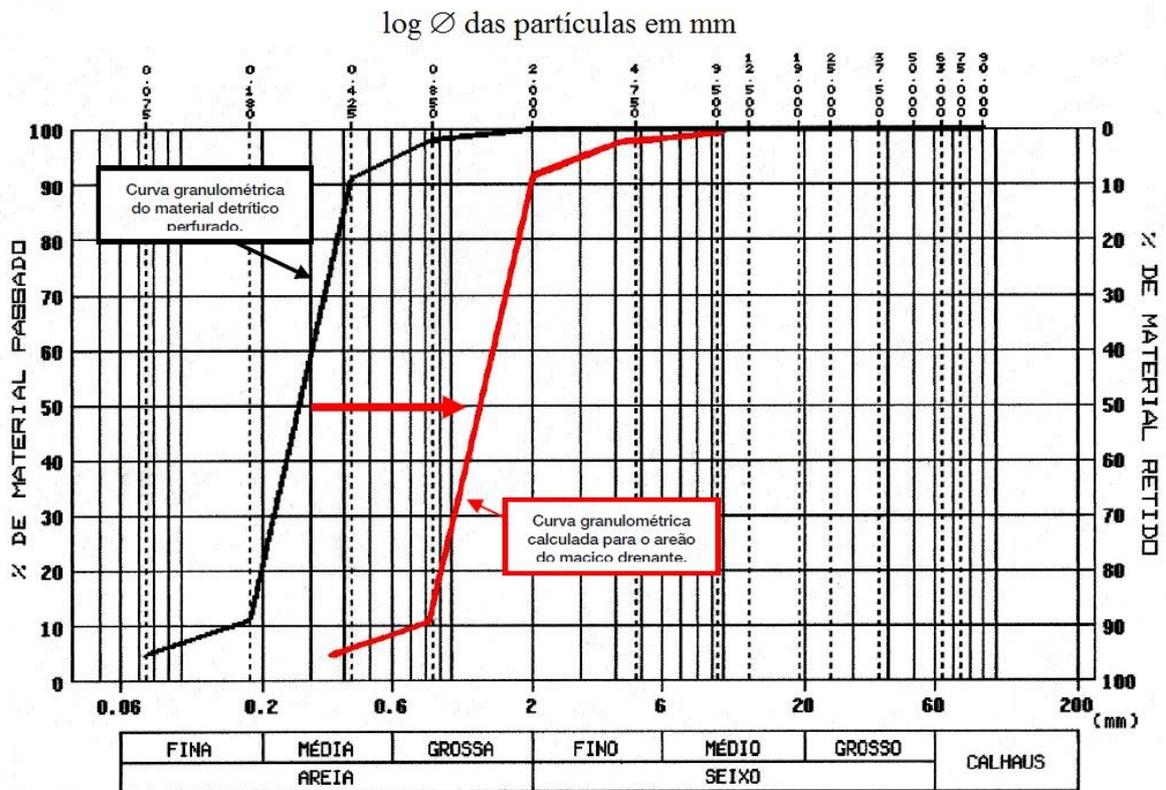
**Gráfico 4:** Uso prático do ábaco para determinar perda de carga modelo PN 16 da série BI-OROC (adaptado de Sotra, 2015)

#### Escolha do maciço drenante

O maciço drenante faz-se através de material geológico calibrado que tenha uma relação com a camada sedimentar em que será aplicado. No geral tem espessura nunca inferior a 2,4" e mais comum de 3" e um máximo de 6" por banda (Baptista, 2016). Para tal é usado o material sondado e caracterizado por análise granulométrica.

Ao determinar a dimensão dos grãos que corresponde a 50% do material passado, caso ele seja predominantemente fino, mal graduado, a curva granulométrica a ser aplicada corresponderá a uma translação no sentido do grão mais grosseiro em 4 vezes. No caso de se tratar de material mais grosseiro, a curva granulométrica a ser aplicada corresponderá a uma translação no sentido do grão mais grosseiro em 6 vezes (Graça, 2012). (Gráfico 4)

A consequência de aplicação do maciço drenante é que os tubos ralo terão de ser dimensionados com base no diâmetro do material retido em 80 a 90% (Graça, 2012)



*Gráfico 5: Exemplo de uma curva granulométrica projetada de um material a aplicar num furo a partir de análise granulométrica do material sondado (Graça, 2012).*