

O ESPAÇO SUBTERRÂNEO COMO FONTE DE ENERGIA: ESTRUTURAS TERMO-ACTIVAS NO TERRENO

UNDERGROUND SPACE AS AN ENERGY SOURCE: THERMO-ACTIVE GROUND STRUCTURES

Vieira, Ana, *LNEC*, Lisboa, Portugal, avieira@lnec.pt

Maranha, J. R., *LNEC*, Lisboa, Portugal, jmaranha@lnec.pt

RESUMO

A energia geotérmica obtida próximo da superfície e a elevada profundidade perspectiva-se como uma fonte de energia promissora. Aspectos económicos e de protecção ambiental são apontados como vantagens decorrentes da sua utilização. As condições locais do clima, as características do terreno, o nível de desenvolvimento tecnológico, as condições ambientais, os preços da energia e o tipo de estrutura envolvida, estão entre os principais parâmetros influenciadores do desempenho destes sistemas energéticos, designadamente no que se refere aos recursos próximos da superfície.

Foca-se o tema da utilização dos recursos geotérmicos próximos da superfície, utilizados essencialmente para efeitos de climatização. É feita referência às estruturas termo-activas, descrevendo-se sucintamente os seus princípios de funcionamento e os factores a ter em conta no seu projecto. Mostra-se um caso de aplicação de energia geotérmica numa estrutura subterrânea.

O desempenho destes sistemas e a sua eficiência estão ainda por avaliar relativamente às condições existentes no nosso país. São necessários estudos mais aprofundados no que se refere aos aspectos termo-hidro-mecânicos da interacção entre o solo e a estrutura termo-activa.

ABSTRACT

Geothermal energy obtained near the surface and at higher depths is considered a promising alternative to traditional energy sources. Economic aspects and environmental protection are considered as advantages arising from the use of this heat source. Local climate, ground properties, technological level of development, environmental conditions, the type of structure involved and energy prices are considered the most important factors influencing the performance of these energy systems, particularly with regard to near surface resources.

This work addresses near surface geothermal resources, used primarily for the purpose of cooling, designated as low-enthalpy resources. Reference is made to thermo-active ground structures, describing briefly the principles of its operation and the main design aspects to be considered. A geothermal energy application case to underground structures is shown.

The performance of these systems and their efficiency is still to be evaluated for the local conditions in our country. Further studies are needed regarding thermo-hydro-mechanical aspects of the interaction between the thermo-active structure and the surrounding ground.

1. INTRODUÇÃO

Tanto as estruturas termo-activas no terreno como os furos para captação de energia, os designados tubos permutadores de calor (*borehole heat exchangers*) são inovações que

perspectivam um consumo de energia limpo e sustentável. No que se refere às estruturas termo-activas, uma vantagem da sua utilização resulta do facto de o princípio de base da sua operação residir no aproveitamento de partes da estrutura já necessários por motivos estruturais ou geotécnicos para os processos de transferência de calor com o solo, não sendo necessário o recurso a elementos estruturais ou hidráulicos adicionais. As estruturas termo-activas (estruturas energéticas) compreendem fundações, estacas, paredes moldadas, paredes e túneis entre outros. Estes elementos estruturais são usados directamente para a instalação dos designados tubos absorvedores por via dos quais se dão as trocas de calor. Estes sistemas tiram, assim, partido da elevada condutibilidade térmica do betão.

O requisito básico para a utilização destes sistemas é uma temperatura aproximadamente constante do solo a uma profundidade de cerca de 10-15 m. Na maioria das regiões da Europa, esta temperatura varia entre 10° C e 15° C, e permanece constante até uma profundidade de aproximadamente 50 m (Adam e Markiewicz, 2009).

A experiência da relativamente recente operação de sistemas de aquecimento/arrefecimento geotérmicos a partir de fundações energéticas e outras estruturas termo-activas no terreno, revela uma poupança de energia. De acordo com Brandl (2006) esta poupança ronda 2/3 dos custos de aquecimento convencionais. Além das já referidas vantagens de uma efectiva protecção ambiental, ao proporcionarem uma energia limpa e auto-renovável, são apontados a estes sistemas baixos custos de operação e de manutenção, embora o investimento inicial seja mais elevado que o associado às energias tradicionais.

2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE ESTRUTURAS TERMO-ACTIVAS

As fundações termo-activas distinguem-se dos sistemas de transferência de calor com o terreno convencionais, em que as tubagens do permutador de calor formado pelo circuito primário se encontram directamente inseridas no terreno, pelo facto de estarem inseridas nos elementos estruturais de fundação em betão armado. Em virtude das boas capacidades térmicas do betão, a transferência de calor é significativamente mais elevada do que nos sistemas convencionais. As estruturas termo-activas funcionam, assim, como permutadores de calor que são usados para transferir o calor entre os edifícios e o solo com o auxílio de bombas de calor (Brandl, 2006; Banks, 2008; Preene e Powrie, 2009). Para a operação destes sistemas faz-se uso da temperatura quase constante perto da superfície do solo, para dissipar o calor no Verão (contribuindo para refrigeração) e retirar o calor no Inverno (contribuindo para o aquecimento) (Adam e Markiewicz, 2009; Bourne-Webb, Amatya *et al.*, 2009).

Para tirar partido das propriedades térmicas do betão são instaladas no interior das estruturas energéticas, antes da colocação do betão, tubos plásticos de polietileno de elevada densidade, geralmente de 20 ou 25 mm de diâmetro, com 2 ou 2,3 mm de espessura de parede. Os tubos são instalados no interior do betão e colocados para formar vários circuitos fechados, no interior dos quais circulam o fluido transportador de calor (geralmente água com anticongelante ou uma solução salina).

O fluido que circula nas tubagens das estacas (e outros elementos de fundação) forma, o já mencionado, circuito primário que está em contacto com a bomba de calor. O papel deste circuito é transferir calor da fundação ou para a fundação (permutador de calor). Existe também um circuito secundário, em contacto com a bomba de calor, que possibilita a transferência de calor do edifício ou para o edifício (permutador de calor). Cabe à bomba de calor, que consome a energia necessária à actuação do compressor, transferir calor do circuito primário para o secundário ou vice-versa. A bomba de calor permite transferir calor de um meio a uma temperatura mais baixa para outro a temperatura mais elevada. Permite também aumentar a

transferência de calor que se processa naturalmente entre um meio com temperatura mais elevada e outro com temperatura mais baixa. A bomba de calor é também utilizada no funcionamento do frigorífico. O conjunto formado pelo circuito primário, bomba de calor e circuito secundário (representado na Figura 1), permite a transferência de calor da fundação para o edifício (aquecimento) ou do edifício para a fundação (arrefecimento), desde que a bomba de calor seja reversível. Não há transporte de matéria (fluido) entre os diferentes circuitos, apenas transferência de calor.

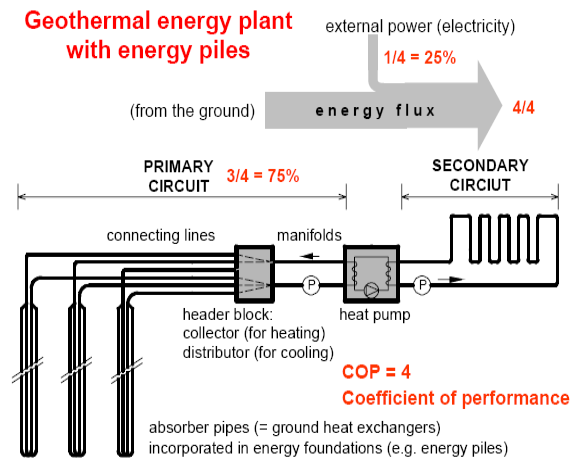


Figura 1 – Sistema termo-activo de estacas energéticas para um COP=4 da bomba de calor (Brandl, 2006)

Os elementos estruturais de fundação permitem reforçar a eficiência do permutador de calor que é o circuito primário, pelo efeito das propriedades térmicas do betão. Passam assim a ser designados por elementos de fundação energéticos.

No caso de estacas energéticas, o circuito da estaca é normalmente pressurizado para testar a sua integridade e também para que esta resista à carga do betão fresco sem colapsar. Esta pressão é tipicamente mantida até que o betão da fundação tenha alguns dias de idade, sendo outra vez aplicada antes que todo o circuito primário esteja definitivamente fechado. O sistema de tubagem e a armadura são arrançados em conjunto antes de serem baixados para um furo previamente escavado e posteriormente preenchido com betão. Uma vez que todas as estacas estejam colocadas a tubagem é ligada a uma bomba de calor que faz transferir a fonte de calor no terreno.

Na Figura 2 representa-se esquematicamente um edifício equipado com estruturas termo-activas mostrando-se na Figura 3 uma vista do sistema de colocação de tubos absorvedores nas primeiras camadas de betão no encabeçamento de uma estaca.

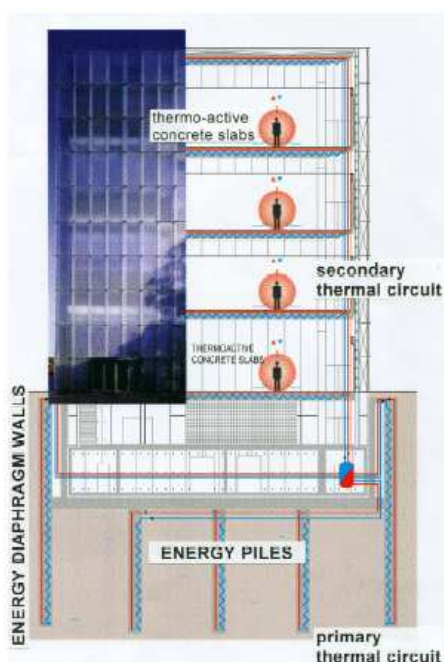


Figura 2 – Sistema típico de estruturas termo-ativas num edifício



Figura 3 – Pormenor de construção de uma estaca energética

De parâmetro essencial para o estudo de viabilidade destes sistemas é o coeficiente de performance COP de uma bomba de calor que é definido por:

$$COP = \frac{\text{output de energia após a bomba de calor (kW)}}{\text{input de energia para a operação (kW)}} \quad [1]$$

Um valor de COP de 4 significa que a energia necessária para a operação do compressor da bomba de calor é $\frac{1}{4}$ da energia total disponível para a climatização. Isto significa que $\frac{3}{4}$ da energia são providenciados pelo terreno (conforme se esquematiza na Figura 1).

A eficiência da bomba de calor (e do seu COP) é tanto menor quanto maior for a diferença de temperatura entre os circuitos primário e secundário. Brandl (2006) refere que, por motivos económicos, um valor de $COP \geq 4$ deve ser alcançado, e que, no caso do aquecimento, a temperatura utilizável no circuito secundário não deve exceder $35-45^\circ$ e a temperatura de extracção no circuito primário não deve cair abaixo dos $0-5^\circ$. Consequentemente, esta tecnologia tende a ser limitada a aquecimento (e arrefecimento) a baixas temperaturas.

Dependendo das propriedades do solo e da profundidade de instalação das tubagens do circuito primário, 1 kW de aquecimento necessita de aproximadamente entre 20 m^2 (solo saturado) e 50 m^2 (areia seca) de superfície de estruturas de fundação energéticas de betão em contacto com o solo.

Não é apontado um limite para a profundidade das estacas ou paredes moldadas no que diz respeito aos sistemas termo-ativos. O potencial energético aumenta com a profundidade uma vez que aumenta a quantidade de transferência de calor: deste modo as fundações mais profundas são mais vantajosas. É referido na bibliografia (Brandl, 2006) uma profundidade mínima económica de 6 m para estacas, paredes moldadas ou outras estruturas de fundação.

3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO SOLO ATÉ AO FLUIDO CONDUTOR DE CALOR

O processo de transferência de calor entre o solo e o fluido do circuito primário é complexo e envolve as seguintes etapas: no solo, entre o solo e o betão, no betão, entre o betão e o tubo (do circuito primário), no tubo, entre o tubo e o fluido, e no fluido.

A transferência de calor num solo não congelado ocorre principalmente por condução. Existe também a transferência de calor por convecção, que ocorre entre sistemas termo-dinâmicos que se movem uns em relação aos outros (i.e. por meio de circulação de fluidos). No solo a fase sólida é estática assim apenas a convecção com a água e a convecção com o gás podem ser distinguidas. Um outro mecanismo de transferência de calor, designado por calor latente, verifica-se quando ocorrem mudanças de fase nos fluidos do solo (durante a vaporização, condensação, solidificação e fusão). Em particular, a solidificação da água (congelamento) e a fusão (descongelamento) da mesma, podem transferir uma quantidade apreciável de calor. Estes processos podem ocorrer por efeito do funcionamento das estruturas termo-activas. Em solos a radiação tem uma contribuição geralmente negligenciável na transferência de calor (Rees *et al.*, 2000).

A transferência total de calor no solo \dot{q}_{tot} pode ser definida como (Rees *et al.*, 2000):

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{l,conv} + \dot{q}_{v,conv} + \dot{q}_{lat} \quad [2]$$

onde \dot{q}_{cond} é o fluxo de calor condutivo, $\dot{q}_{l,conv}$ é o fluxo e calor gerado pela convecção da fase líquida, $\dot{q}_{v,conv}$ o fluxo e calor gerado pela convecção da fase gasosa e \dot{q}_{lat} é o fluxo de calor devido ao calor latente.

O factor de proporcionalidade que relaciona a taxa à qual o calor é transferido por condução sob a acção de um determinado gradiente de temperatura é conhecido por condutividade térmica λ (unidades SI W/m.K). O valor de λ é fortemente influenciado pelo teor em água e densidade do solo, e também pelas suas componentes mineralógicas, assim como pelas propriedades químicas da água nos poros. O congelamento aumenta significativamente a condutividade térmica do solo, porque $\lambda_{\text{água}}=0,57$ W/m.K e $\lambda_{\text{gelo}}=2,18$ W/m.K.

O parâmetro térmico mais importante do solo é a condutividade térmica λ . Para o projecto preliminar de fundações energéticas, o seu valor pode ser obtido através de elementos disponíveis na bibliografia em função do teor em água, densidade, grau de saturação e o tipo de solo (Jessberger e Jagow-Klaff, 1996). Para grandes projectos λ deve ser determinado a partir de ensaios de laboratório e de campo, nos quais o solo esteja submetido a um gradiente de temperatura.

Conhecidos os processos de transferência de calor no solo é necessário avaliar o processo de transferência de calor entre o fluido do circuito primário e o solo/betão. Assumindo que as paredes dos tubos de um permutador de calor no terreno têm a mesma temperatura do que o betão ou solo circundante, o problema térmico fica reduzido ao da transferência de calor da parede do tubo para o fluido. Esta é essencialmente influenciada pelo regime de escoamento do fluido: laminar ou turbulento.

4. FACTORES INTERVENIENTES NO PROJECTO DE UMA ESTRUTURA TERMO-ACTIVA

O projecto apropriado de fundações energéticas para um sistema termo-activo requer uma investigação detalhada do terreno, das condições ambientais locais e do edifício a ser climatizado, incluindo perdas de calor sazonais do edifício. É aconselhável, para grandes projectos, uma simulação numérica de todo o sistema, incluindo o do sistema de energia secundária dentro do edifício. Os seguintes parâmetros devem ser considerados (Brandl, 2006):

1. condições do terreno
 - condições hidrogeológicas: profundidade da flutuação sazonal do nível freático, direcção do escoamento e velocidade da água no solo;
 - propriedades geotécnicas: zonamento do solo, teor em água, densidade e índice de vazios, permeabilidade (condutividade hidráulica em função do grau de saturação);
 - comportamento expansão-retracção (se for requerida uma extracção de calor intensa);
 - comportamento congelamento-descongelamento (se uma extracção intensa de calor for requerida);
 - parâmetros de resistência ao corte e comportamento tensão-deformação (para projecto de fundações);
 - propriedades geotérmicas do solo: condutividade térmica e capacidade específica de calor, temperatura *in situ*, gradientes térmicos;
2. detalhes estruturais do edifício
 - tipo e tamanho das fundações energéticas: comprimento, largura, espessura e diâmetro;
 - profundidade das fundações abaixo do terreno ou das caves;
 - posição, arranjo e espaçamento dos elementos de fundação;
 - padrão das estacas;
 - método de instalação das fundações, sequência de construção (no que se refere à instalação dos tubos absorvedores);
 - detalhes do reforço, propriedades do betão das energias de fundação;
3. detalhes de instalação do sistema de aquecimento/arrefecimento geotérmico
 - espaço disponível para as linhas de ligação;
 - posição do distribuidor/colector;
 - posição da bomba de calor e do centro de serviço técnico;
4. física do edifício
 - espessura de insolação do telhado;
 - tamanho e qualidade das janelas;
 - local e tamanho da caixa de escadas (aberto/fechado);
 - projecto das pontes de calor;
 - condições de temperatura nos circuitos primários e secundários
5. condições do clima e concepção energética óptima
 - exigências de aquecimento/arrefecimento mensais e exigências de pico;
 - condições de temperatura nos circuitos de energia primário e secundário;
 - tipo de sistemas de aquecimento/arrefecimento em edifícios;
 - tipo/mistura e velocidade do fluido circulatório (fluido transportador de calor); dentro do sistema energético;
 - intervalo de aquecimento/arrefecimento, plano de operação.

5. APLICAÇÃO DA GEOTERMIA A OBRAS SUBTERRÂNEAS. EXEMPLO DE UM TÚNEL TERMO-ACTIVO

É apresentada uma aplicação de aproveitamento da energia proveniente do solo no âmbito das obras subterrâneas. De acordo com os elementos recolhidos na bibliografia este terá sido o primeiro túnel termo-activo na Europa. Trata-se do túnel de Lainzer, um túnel de 12,8 km situado a Nordeste de Viena, esta estrutura subterrânea funciona, também, parcialmente como um grande tubo absorvedor de energia. De referir que, em virtude da sua grande superfície de contacto com o terreno, um túnel permite activar uma quantidade de calor, significativamente mais elevada do que a proveniente de fundações profundas.

O Túnel Lainzer foi construído em várias secções e por diferentes métodos: nas secções executadas pelo método *cut and cover*, consiste em estacas moldadas de grande diâmetro, com laje de fundo e de topo de betão armado; e nas secções executadas pelo Novo Método Austríaco (NATM), por meio de um suporte primário de betão projectado reforçado, pregagens e ancoragens em rocha e um revestimento secundário de betão armado.

Com o objectivo de otimizar o projecto de energia do túnel e para fins de investigação, foram realizados os seguintes projectos geotérmicos (Brandl, 2006):

1. Instalação energética no túnel *cut and cover*: LT24, Hadersdorf-Weidlingau. A secção LT24 foi seleccionada como secção-teste, para investigar tanto os aspectos técnicos como os aspectos económicos. Foi utilizado o método que permite a aplicação das técnicas de absorção combinadas com as de engenharia estrutural.
2. Poços energéticos: Hetzendorferstraße. Esta instalação de teste foi construída a fim de investigar o desempenho dos poços de energia que foram utilizados simultaneamente para rebaixar o nível da água no solo.
3. Membrana energética no túnel NATM: LT22, Bierha uslberg. Nesta secção LT22 foi está localizada numa secção, na qual o sistema comprovado de fixar tubos absorvedores às secções de armadura para o betão armado de pilares, paredes moldadas ou lajes de fundo não podia ser utilizada, tendo sido desenvolvida uma nova tecnologia.

Túnel cut and cover

Na secção LT24 (Figura 4) o revestimento da parede primária do túnel consiste em estacas moldadas, sendo que uma em cada três estacas foi usada como uma estaca energética. No seu total a instalação energética compreendeu um total de 59 estacas moldadas com diâmetro de 1,2 m e um comprimento médio de cerca de 17,1 m. A parede de estacas intermitente apresenta colunas de *jet-grouting* entre as estacas. As estacas energéticas estão equipadas com tubos absorvedores ligados aos colectores/distribuidores, que estão localizados num ponto central do túnel. Os tubos que partem das estacas para os coletores/distribuidores foram colocados ao lado da cobertura do túnel. Os tubos de ligação conduzem a uma sala de armazenamento/distribuição que é facilmente acessível na parte superior do túnel. Um bloco com um diâmetro de 150 mm liga os coletores/distribuidores com as bombas de calor a uma escola adjacente, a fim de aquecer o edifício. Entre os dados técnicos relevantes destaca-se um *output* de aquecimento anual de 214 MWh.

Para avaliar o seu comportamento em operação a instalação foi intensamente instrumentada com aparelhos de medição. Seis estacas energéticas foram equipadas com 18 medidores de temperatura em diferentes níveis, além disso, uma estaca foi equipada com extensómetros de temperatura-deformação em cinco níveis. O objectivo deste sistema de medição é investigar os efeitos das mudanças de temperatura dentro de uma estaca energética na sua capacidade de carga e a flutuação de temperatura nas estacas energéticas durante a operação. Além disso, a

passagem de fluido transportador de calor, o calor total extraído, e as temperaturas no colector são monitorizados. A temperatura das águas subterrâneas em torno da secção energética é também registada (a diferentes distâncias). As diferenças de temperatura entre as estacas energéticas (termo-activas e com funções de suporte) e as estacas padrão (apenas função da capacidade de carga) foram verificadas por imagem fotográfica térmica.

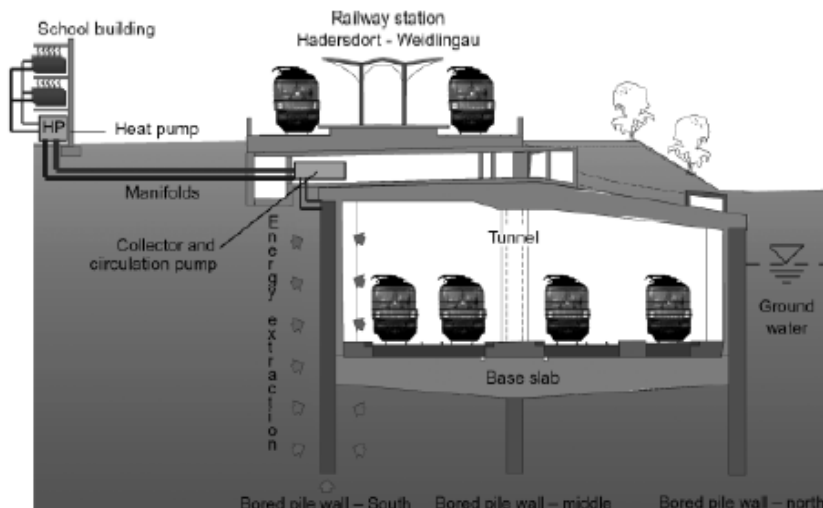


Figura 4 – Representação esquemática da instalação energética do túnel *cut and cover* LT24

Secção NATM

As sequências construtivas dificultam a instalação contínua de tubos absorvedores no sentido longitudinal em túneis escavados de acordo com o método NATM. Foram assim concebidos métodos alternativos. Três elementos estruturais podem ser utilizados para a extração/armazenamento de energia térmica (ou seja, aquecimento/arrefecimento) no caso deste método construtivo: i) ancoragens ou pregagens termo-energéticas a térmica activadas em torno do solo ou rocha (Figura 5); ii) geossintéticos energéticos que façam uso do terreno envolvente à abertura do túnel, principalmente tecidos geotêxteis, geocompostos ou geomembranas; iii) revestimento secundário termo-ativo (betão arado da secção interna. Na secção LT22 do túnel de Lainzer foi usada uma membrana energética. Neste caso os tubos absorvedores foram fixados às geomembranas e colocados entre os suportes primários e secundário do túnel (Figura 6).

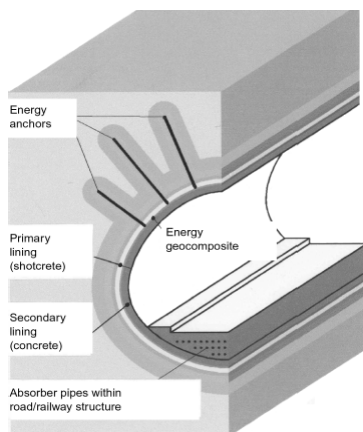


Figura 5 – Esquema de um túnel energético com o método (NATM)

Figura 6 – Geotêxtil energético no túnel LT22 (Adam e Markiewicz, 2009)

6. NOTAS FINAIS

Apesar das vantagens bem definidas de sistemas geotérmicos, o montante da capacidade instalada mundial de instalações de energia geotérmica é nitidamente desproporcional à quantidade de energia geotérmica naturalmente disponível. A energia geotérmica fornece actualmente menos de 1% do total da energia consumida no mundo. A incerteza envolvida na estimativa da eficiência e do custo de sistemas geotérmicos é um dos factores que mais contribui para esta insuficiência na sua utilização. Uma das principais razões para esta incerteza é a ausência de ferramentas computacionais capazes de simular de forma rigorosa e computacionalmente eficiente processos de aproveitamento de energia geotérmica (Khoury *et al.*, 2010).

A utilização de estruturas termo-activas tem sido utilizada de forma crescente nos países do Norte da Europa, sendo nesta como claramente mostram os gráficos representados na Figuras 7 e 8, o primeiro representa a evolução do número de estacas energéticas na Áustria e o segundo a número de bombas de calor na Alemanha nos últimos anos. A utilização em grande escala destes sistemas em Portugal impõe um estudo de viabilidade técnica e económica que leve em consideração as condições ambientais locais (clima e terreno) e a qualidade das edificações.

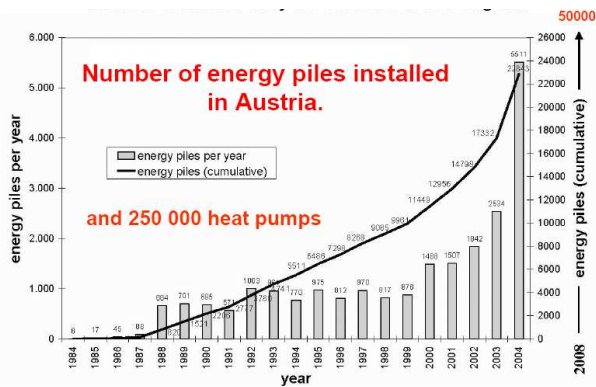


Figura 7 – Número de estacas energéticas na Áustria (Brandl, 2006)

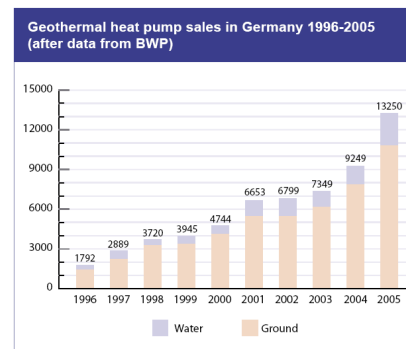


Figura 8 – Venda de bombas de calor na Alemanha (EGEC, 2007)

A energia geotérmica representa uma grande fonte potencial de energia limpa e fiável tanto para os sectores residenciais como para os comerciais. A implementação de um sistema de aproveitamento de energia geotérmica, no caso concreto das estruturas termo-activas, é simples, podendo esta ser extraída da crosta terrestre a profundidades relativamente superficiais. Utilizando estacas estruturais e outras estruturas de fundação, como paredes moldadas e ensoleiramentos gerais entre outros, ou mesmo túneis, a energia geotérmica pode ser usada como uma solução de climatização alternativa para edifícios. Este tipo de extracção de calor do terreno existe há alguns anos na Europa e na Ásia, tendo vindo a registar um crescimento assinalável. Sendo uma tecnologia energética limpa, apresenta potenciais reduções significativas nas emissões de CO² e um decréscimo da necessidade de utilização de energias primárias. São também apontados a estes sistemas menores custos de operação e de manutenção relativamente aos sistemas tradicionais.

No entanto, o funcionamento das estruturas termo-activas envolve uma interacção de mecanismos que não está ainda devidamente avaliada. É assim necessário estudar os efeitos termo-hidro-mecânicos no terreno como fonte de calor do sistema, nas fundações que com ele interagem. É importante perceber os efeitos que os ciclos de aquecimento/arrefecimento têm no comportamento das fundações de betão de modo a determinar a sua estabilidade estrutural a longo prazo. Levantam-se questões em relação á variação do nível de segurança das fundações

uma vez que os elementos estruturais que as compõem assim como o terreno, ficam sujeitos a ciclos de aquecimento/arrefecimento. A resposta termo-hidro-mecânica da solo-estrutura deve ser entendida para poder melhorar as normas e práticas de projecto. Estes estudos devem ser conduzidos recorrendo a modelos constitutivos apropriados.

REFERÊNCIAS

- Adam, D. e Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique* 59(3): 229-236.
- Al-Khoury, R.; Kolbel, T.; Schramedei, R. (2010). Efficient finite element modeling of shallow geothermal systems. *Computers & Geosciences (a publicar)*.
- Banks, D. (2008). An Introduction to Thermogeology. *Ground Source Heating and Cooling*, WileyBlackwell.
- Bourne-Webb, P. J.; Amatya, B. et al. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique* 59(3): 237-248.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56(2): 81-122.
- EGEC – European Geothermal Energy Council (2007). Geothermal Heating & Cooling Action Plan for Europe. <http://www.egec.org/target/GeothermalActionPlan>.
- Jessberger, H. L. & Jagow-Klaff, R. (1996). Frost im Baugrund. Grundbau-Taschenbuch. Teil 1, 5th edn. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.
- Preene, M. e Powrie, W. (2009). Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Géotechnique* 59(3): 261-271.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M. e Thomas, H. R. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy* 4(3): 213–265.
- Thomas, H. R. e Rees, S. W. (2009). Measured and simulated heat transfer to foundation soils. *Géotechnique* 59(4): 365-375.