

# Abstract

The present era embodies a critical decision point for mankind who has to reckon with the negative impacts of past energy choices. To make a shift and to shape the future of energy, a move towards carbon-free and renewable resources has to be boosted. In this framework geothermal energy is a key inspiring actor that has seen innovative, effective technological developments in recent years to capture the Earth's heat buried at shallow depths, among which energy geostructures are noteworthy. Turning a geostructure, i.e. foundations, tunnel linings, walls, into a heat extraction and storage system, notwithstanding, puts forward unmatched challenges and unsolved questions related to the effects emerging from this original new role.

This Doctoral Thesis focuses on the investigation of a dual-purpose technology that couples the roles for the structural support and energy supply, i.e. energy tunnels, with a major interest on thermal and structural performance. Energy tunnels involve the coexistence of both mechanical and thermal loads, that cause seasonally cyclic alterations of temperature, solicitation and deformation patterns within the surrounding ground and the lining itself that should be accounted for during analysis and design. The additional thermal loading being the essence of all energy geostructures, under any circumstances can the necessary structural stability of the tunnel lining be jeopardized.

Despite prior to this work a substantial amount of research had been made available to address the energy and structural performance of energy piles and walls, little or even no guidance has been proposed to advise in the design of energy tunnels. Limited knowledge, if available, was present to address the energy linings behaviour and performance under thermal loads.

To address such challenges, this research is focused on the experimental and numerical investigation of energy tunnel linings over typical timescales of practical applications, and on the formulation of a comprehensive procedural outline to be used in performance-based design practice. The objective of this Thesis is to identify, quantify and analyse the principal aspects that are involved in the design, construction and performance of energy tunnels as against traditional tunnels.

Following the introduction of the most recent advances, mostly based on contributions related to technological aspects and thermal performance, with plenty of numerical explorations and very rare experimental studies, the research examines the basic principles of tunnel linings design to pave the way for the ensuing extension to energy tunnel linings. The bibliographic study highlights that significant contributions were given in the field of thermo-mechanical behaviour of soils.

The acknowledgement of a gap in the full understanding of energy tunnels thermal-based and structural-based performance led to the setup of a new full-scale experimental prototype that represents the first Italian attempt to show the maturity of a still unfamiliar technology. The chance offered by the tunnel of Turin Metro Line 1 South Extension under construction was taken to put in practice the novel Enertun concept defining a new layout of the networks of geothermal pipes. The design stages and construction details have been presented to show the relatively simple implementation of the primary and secondary circuits. The monitoring plan has been described with the intent to characterize the response in terms of additional thermally induced mechanical effects when subjected to thermal loading in the range between 0 and 35 °C. Indeed, an experimental program has been performed, involving tests able to mimic the real operation of the closed loop system, recovery time-lags and natural trends in absence of any external forcing. Particular attention has been posed on the quantification of thermally induced stresses and strains, as well as temperature within the lining and at the circuit inlet and outlet.

The knowledge acquired throughout the previous experimental campaign was included into a series of numerical analyses performed on a three-dimensional, coupled thermo-hydraulic numerical model that was first validated and then used to further generalize the results to different ground and environmental conditions, including the unstudied role of groundwater flow direction. The effect of the most important design parameters allowed to update existing parametric design charts and to develop a simple method for preliminary evaluation of the energy tunnels potential.

The last part of the Thesis allows one to draw some important conclusions on the structural design of energy tunnels. With the purpose of numerically reproducing the response experimentally observed, a thermo-elastic model was built and validated, to allow for a deeper understanding of the thermo-mechanical interactions. Hence, the interest is moved to the assessment of the structural effects of long-term operation of energy tunnels. This aspect is of great importance from the engineering point of view, which is why in the final part of the Thesis design verifications are performed and some practical recommendations for future designers enunciated. The results presented in this Thesis suggest the conclusion that, in the normal working conditions of current applications, (a) thermal loads do have a visible effect on the thermo-mechanical behaviour though (b) they do not seem to represent a serviceability nor an ultimate limit state problem in the conditions investigated, as internal actions are acceptable with respect to the norms in force. Hence (c) the thermo-mechanical behaviour and performance of energy tunnels is not critically threatened by thermal loads.

**Keywords:** energy tunnels, geothermal energy, thermo-hydraulic behaviour, thermo-mechanical behaviour, performance, soil-structure interaction, in situ testing, numerical modelling, performance-based design, design charts, thermo-elasticity.

# Résumé

L'ère actuelle incarne un point de décision critique pour l'humanité qui doit rendre compte des impacts négatifs des choix énergétiques passés. Pour marquer un virage et façonner l'avenir de l'énergie, il faut accélérer la transition vers des ressources décarbonées et renouvelables. Dans ce cadre, la géothermie peut apporter une contribution majeure et a connu, ces dernières années, des développements technologiques innovants et efficaces pour capter la chaleur de la Terre enfouie à de faibles profondeurs, en particulier pour les géostructures énergétiques. Transformer une géostructure, c'est-à-dire des fondations, des revêtements de tunnel, des murs, en un système d'extraction et de stockage de chaleur, présente des défis inédits et des questions non résolues.

Cette thèse de doctorat se concentre sur la recherche d'une technologie à double usage qui couple les rôles de support structurel et d'approvisionnement énergétique, pour une application aux tunnels énergétiques, avec un intérêt particulier pour les performances thermiques et structurelles. Les tunnels énergétiques impliquent la coexistence de charges mécaniques et thermiques, qui provoquent des altérations cycliques saisonnières de la température, des sollicitations et des modes de déformation dans le sol environnant et dans le revêtement lui-même qui doivent être pris en compte lors de l'analyse et de la conception. La charge thermique supplémentaire étant l'essence de toutes les géostructures énergétiques, la stabilité structurelle nécessaire du revêtement du tunnel ne peut en aucun cas être compromise.

Un nombre important de travaux de recherche ont déjà porté sur la performance énergétique et structurelle des pieux et des murs énergétiques, mais peu ou même aucune orientation n'a été proposée pour guider la conception des tunnels énergétiques. Des connaissances limitées, le cas échéant, étaient disponibles pour traiter le comportement et les performances des revêtements énergétiques sous des charges thermiques.

Pour relever ces défis, cette recherche est axée sur l'étude expérimentale et numérique des revêtements de tunnels énergétiques sur des échelles de temps typiques des applications pratiques, et sur la formulation d'un schéma procédural complet à utiliser en pratique dans la conception. L'objectif de cette thèse est d'identifier, de quantifier et d'analyser les principaux aspects impliqués dans la conception, la construction et la performance des tunnels énergétiques par rapport aux tunnels traditionnels.

Après l'introduction des avancées les plus récentes, principalement basées sur des contributions liées aux aspects technologiques et aux performances thermiques, avec de nombreuses explorations numériques et quelques rares études expérimentales, ce travail examine les principes de base de la conception des revêtements de tunnels et leur extension aux revêtements de tunnel énergétiques. L'étude bibliographique souligne les contributions importantes apportées dans le domaine du comportement thermo-mécanique des sols.

La reconnaissance d'une lacune dans la compréhension complète des performances thermiques et structurelles des tunnels énergétiques a conduit à la mise en place d'un nouveau prototype expérimental à grande échelle qui représente la première tentative italienne de montrer la maturité d'une technologie encore inconnue. L'occasion offerte par le tunnel de Turin Métro Ligne 1 Extension Sud en construction a été saisie pour mettre en pratique le nouveau concept Enertun définissant un nouveau tracé des réseaux de tuyaux géothermiques. Les étapes de conception et les détails de construction ont été présentés pour montrer la mise en œuvre relativement simple des circuits primaire et secondaire. Le plan de surveillance a été décrit avec l'intention de caractériser la réponse en termes d'effets mécaniques supplémentaires induits thermiquement lorsque des charges thermiques comprises entre 0 et 35°C sont appliquées. En effet, un programme expérimental a été réalisé, impliquant des tests capables de simuler le fonctionnement réel du système en boucle fermée, les délais de récupération et les tendances naturelles en l'absence de tout forçage externe. Une attention particulière a été portée à la quantification des contraintes et déformations induites thermiquement, ainsi qu'à la température à l'intérieur du revêtement et à l'entrée et à la sortie du circuit.

Les connaissances acquises tout au long de cette campagne expérimentale ont été incluses dans une série d'analyses numériques effectuées sur un modèle thermo-hydraulique couplé tridimensionnel qui a d'abord été validé puis utilisé pour généraliser les résultats à des conditions différentes du terrain et de l'environnement, y compris le rôle de la direction de l'écoulement de la nappe. L'analyse de l'effet des paramètres de conception les plus importants a permis de mettre à jour les courbes de calcul paramétrique existantes et de développer une méthode simple pour l'évaluation préliminaire du potentiel des tunnels énergétiques.

La dernière partie de la thèse permet de tirer des conclusions importantes sur la conception structurelle des tunnels énergétiques. Dans le but de reproduire numériquement la réponse observée expérimentalement, un modèle thermo-élastique a été construit et validé, pour permettre une meilleure compréhension des interactions thermo-mécaniques. Par conséquent, l'intérêt est porté à l'évaluation des effets structurels de l'exploitation à long terme des tunnels énergétiques. Cet aspect est d'une grande importance du point de vue de l'ingénierie, c'est pourquoi dans la dernière partie de la thèse, des vérifications de conception sont effectuées et quelques recommandations pratiques pour les futurs concepteurs sont énoncées. Les résultats présentés dans cette thèse suggèrent la conclusion que, dans les conditions normales des applications actuelles, (a) les charges thermiques ont un effet visible sur la réponse thermo-mécanique de la structure bien que (b) elles ne semblent pas représenter un problème d'état limite ultime ou de service dans les conditions étudiées, car les actions internes sont acceptables par rapport aux normes en vigueur. Par conséquent, (c) le comportement et les performances thermomécaniques des tunnels énergétiques ne sont pas menacés de manière critique par les charges thermiques.

**Mots-clés:** tunnels énergétiques, géothermie, comportement thermo-hydraulique, comportement thermo-mécanique, performance, interaction sol-structure, essais in situ, modélisation numérique, conception basée sur les performances, courbes de calcul, thermo-élasticité.

# Sommario

L'epoca attuale incarna un punto di decisione critico per l'umanità che deve fare i conti con gli impatti negativi delle scelte energetiche passate. Per attuare un cambiamento e plasmare il futuro del panorama energetico, è necessario potenziare l'utilizzo di risorse rinnovabili tali da non comportare emissioni di anidride carbonica. In questo contesto, l'energia geotermica è un attore chiave che negli ultimi anni ha visto sviluppi tecnologici innovativi ed efficaci per catturare il calore a basse profondità, tra i quali le geostrutture energetiche sono degne di nota. Trasformare una geostruttura, come ad esempio fondazioni, rivestimenti di gallerie, muri, in un sistema di estrazione e immagazzinamento del calore, tuttavia, pone sfide senza precedenti e domande irrisolte relative agli effetti che emergono da questo nuovo ruolo.

Questa tesi di dottorato si concentra sull'indagine di una tecnologia caratterizzata da una duplice funzione, in quanto abbina i ruoli per il supporto strutturale e la fornitura di energia, per un'applicazione alle gallerie energetiche, con un'attenzione rivolta in particolare alle prestazioni termiche e strutturali. Le gallerie energetiche implicano la coesistenza di carichi meccanici e termici, che causano alterazioni cicliche stagionali della temperatura, delle sollecitazioni e delle deformazioni nel terreno circostante e nel rivestimento stesso che dovrebbero essere presi in considerazione durante l'analisi e la progettazione. Dal momento che il carico termico addizionale è l'essenza di tutte le geostrutture energetiche, la stabilità strutturale del rivestimento della galleria non deve, in nessuna circostanza, essere messa a repentaglio.

Nonostante prima di questo lavoro fossero state messe a disposizione numerose ricerche per affrontare il comportamento energetico e strutturale di pali e pareti energetiche, pochissime o addirittura nessuna indicazione è stata fornita per guidare la progettazione di gallerie energetiche. Scarse conoscenze, ove disponibili, erano dunque presenti in merito al comportamento dei rivestimenti energetici e alle prestazioni sotto carichi termici.

Per affrontare tali sfide, questa ricerca si concentra sullo studio sperimentale e numerico del rivestimento di gallerie energetiche su scale temporali tipiche di applicazioni pratiche e sulla formulazione di una struttura procedurale completa da utilizzare nella pratica di progettazione. L'obiettivo di questa tesi è quello di identificare, quantificare e analizzare i principali aspetti coinvolti nella progettazione, costruzione e comportamento di gallerie energetiche rispetto a gallerie tradizionali.

Dopo aver introdotto i più recenti sviluppi, basati principalmente su contributi relativi agli aspetti tecnologici e alle prestazioni termiche, con numerose esplorazioni numeriche e studi sperimentali molto rari, la ricerca esamina i principi di base della progettazione dei rivestimenti delle gallerie per spianare la strada alla successiva estensione ai rivestimenti di gallerie

energetiche. Lo studio bibliografico evidenzia contributi significativi nel campo del comportamento termo-meccanico dei terreni.

Le evidenti lacune nella comprensione delle prestazioni energetiche e strutturali delle gallerie energetiche hanno portato all'installazione di un nuovo prototipo sperimentale a scala reale che rappresenta il primo tentativo italiano di mostrare la maturità di una tecnologia ancora poco nota. L'opportunità offerta dalla galleria dell'Estensione Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino in fase di costruzione è stata colta per mettere in pratica il nuovo concetto Enertun che definisce un nuovo layout della rete di serpentine geotermiche. Le fasi di progettazione e i dettagli di costruzione sono stati presentati per mostrare l'implementazione relativamente semplice dei circuiti primario e secondario. Il piano di monitoraggio è stato descritto con l'intento di caratterizzare la risposta in termini di ulteriori effetti meccanici indotti termicamente in presenza di carichi termici nell'intervallo tra 0 e 35 ° C. Si è portato a termine un programma sperimentale, che ha incluso test in grado di simulare il funzionamento reale del sistema a circuito chiuso, le fasi di recupero termico e i trend naturali in assenza di forzanti esterne. Particolare attenzione è stata rivolta alla quantificazione di sollecitazioni e tensioni indotte termicamente, nonché sulla temperatura all'interno del rivestimento e all'ingresso e all'uscita del circuito.

Le conoscenze acquisite durante la suddetta campagna sperimentale si sono rivelate utili per una serie di analisi numeriche eseguite su un modello termoidraulico accoppiato tridimensionale che è stato prima validato e poi utilizzato per generalizzare ulteriormente i risultati a diverse condizioni geologiche e ambientali, incluso il ruolo non indagato in letteratura della direzione del flusso dell'acqua di falda. L'effetto dei parametri di progettazione più rilevanti ha permesso di aggiornare i design charts parametrici già esistenti e di sviluppare un metodo semplice per la valutazione preliminare del potenziale delle gallerie energetiche.

L'ultima parte della tesi ha consentito di trarre alcune importanti conclusioni sulla progettazione strutturale delle gallerie energetiche. Allo scopo di riprodurre numericamente la risposta osservata sperimentalmente, è stato costruito e validato un modello termo-elastico, per consentire una comprensione più dettagliata delle interazioni termo-meccaniche. L'interesse è stato dunque rivolto alla valutazione degli effetti strutturali del funzionamento a lungo termine delle gallerie energetiche. Questo aspetto è di grande importanza dal punto di vista ingegneristico, motivo per il quale nella parte finale della tesi vengono eseguite le verifiche di progetto e vengono enunciate alcune raccomandazioni pratiche rivolte ai futuri progettisti. I risultati presentati in questa tesi ventilano la conclusione che, nelle normali condizioni di lavoro delle attuali applicazioni, (a) i carichi termici hanno un effetto visibile sul comportamento termo-meccanico sebbene (b) non sembrino rappresentare un problema né a stato limite ultimo né a stato limite di esercizio nelle condizioni investigate, poiché le azioni interne sono accettabili rispetto alle norme in vigore. Pertanto (c) il comportamento termo-meccanico e le prestazioni delle gallerie energetiche non risultano criticamente minacciati dalle azioni termiche indotte dalla loro attivazione energetica.

**Parole chiave:** gallerie energetiche, energia geotermica, comportamento termo-idraulico, comportamento termo-meccanico, prestazioni, interazione terreno-struttura, prove in situ, modellazione numerica, progettazione basata sulle prestazioni, grafici di progetto, termo-elasticità.