

Abstract

La fusione nucleare rappresenta uno dei percorsi più promettenti verso una produzione di energia sostenibile, su larga scala e a basso impatto ambientale. Tuttavia, le condizioni operative estreme all'interno dei reattori a fusione, caratterizzate da temperature elevate, intensa irradiazione neutronica e severi carichi meccanici e magnetici, pongono sfide significative all'integrità strutturale e all'affidabilità a lungo termine dei componenti del reattore.

Questo lavoro di dottorato è stato sviluppato lungo due linee di ricerca complementari e parallele, condotte rispettivamente nell'ambito accademico dell'Università di Salerno e in collaborazione con la società di ingegneria LT Calcoli, nell'ambito di una partnership industriale.

All'interno della ricerca accademica, l'attenzione è stata rivolta alla meccanica della frattura applicata al divertore del reattore a fusione *DEMO* (*DEMON*stration power plant), uno dei suoi componenti strutturali più critici. È stato sviluppato un modello completo agli elementi finiti (*FE*) per descrivere la risposta termo-meccanica del divertore sotto carichi operativi realistici. Mediante tecniche di sottomodellazione e approcci di Meccanica della Frattura Lineare Elastica (*LEFM*), sono state introdotte cricche stazionarie semi-ellittiche al fine di valutare i fattori di intensificazione delle tensioni (*SIF*) e identificare le regioni più critiche. Lo studio è stato successivamente esteso alla simulazione della propagazione delle cricche sotto condizioni di carico multi-step, consentendo la stima della vita a fatica tramite la legge di Paris e la previsione del numero di cicli necessari per raggiungere dimensioni critiche della cricca. Inoltre, è stata condotta un'analisi di crescita multi-cricca per investigare la presenza simultanea di due cricche localizzate in regioni critiche adiacenti. Infine, è stato implementato un modello di materiale elastoplastico per valutare la deviazione della risposta strutturale rispetto all'ipotesi di comportamento lineare elastico. I risultati ottenuti hanno permesso di individuare le zone più vulnerabili del divertore e di dimostrare la sensibilità della crescita delle cricche ai gradienti termici e agli effetti combinati dei carichi.

In parallelo, la ricerca industriale condotta con LT Calcoli si è concentrata sulla progettazione e analisi termomeccanica di un braccio robotico (*mover*)

destinato alla manutenzione del Breeding Blanket del reattore *DEMO*, operante in condizioni termiche severe. Lo studio ha valutato la risposta strutturale del *mover* a elevati flussi termici conduttivi e convettivi, provenienti rispettivamente dal Blanket e dall'ambiente circostante, ed ha esplorato strategie di ottimizzazione progettuale e dei materiali al fine di migliorare la resistenza al calore e ottenere una distribuzione della temperatura più uniforme.

Al di là dei risultati specifici ottenuti in ciascuna linea di ricerca, il contributo originale di questo lavoro risiede nello sviluppo di una metodologia integrata per la valutazione dell'integrità strutturale dei componenti dei reattori a fusione in condizioni operative realistiche. L'uso combinato delle tecniche di sottomodellazione, della meccanica della frattura e delle analisi di valutazione della vita utile definisce un quadro predittivo in grado di catturare le complesse interazioni tra i carichi e le reali condizioni operative con maggiore accuratezza rispetto agli approcci convenzionali.

L'integrazione di queste due direzioni di ricerca fornisce un contributo complessivo alla sicurezza strutturale, alla durabilità e alla manutenibilità dei reattori a fusione di nuova generazione, supportandone uno sviluppo affidabile e sostenibile.

Nuclear fusion represents one of the most promising pathways toward sustainable, large-scale, and low-impact energy production. However, the extreme operational conditions within fusion reactors, characterized by elevated temperatures, intense neutron irradiation, and severe mechanical and magnetic loads, pose significant challenges for the structural integrity and long-term reliability of reactor components.

This doctoral work has been developed along two complementary and parallel research lines, conducted respectively within the academic framework of the University of Salerno and in collaboration with the engineering company LT Calcoli as part of an industrial partnership.

Within the academic research, the focus was placed on fracture mechanics applied to the divertor of the *DEMO (DEMONstration power plant)* fusion reactor, one of its most critical structural components. A comprehensive finite element (*FE*) model was developed to capture the thermo-mechanical response of the divertor under realistic operating loads. Using submodeling and Linear Elastic Fracture Mechanics (*LEFM*) approaches, stationary semi-elliptical cracks were introduced to assess stress intensity factors (*SIFs*) and identify the most critical regions. The study was further extended to simulate crack propagation under multi-step loading conditions, allowing fatigue life estimation through Paris' law and the prediction of the number of cycles required to reach critical crack sizes. Additionally, a multi-crack growth analysis was performed to investigate the simultaneous presence of two cracks located in adjacent critical regions. Finally, an elastoplastic material model was implemented to evaluate the deviation of the structural response from the linear elastic assumption. The obtained results identified the most vulnerable divertor zones and demonstrated the sensitivity of crack growth to thermal gradients and combined loading effects.

In parallel, the industrial research conducted with LT Calcoli focused on the thermo-mechanical design and analysis of a robotic arm intended for the maintenance of the *DEMO* Breeding Blanket, operating under severe thermal conditions. The study assessed the structural response of the manipulator to high heat conductive and convective fluxes originating respectively from the Blanket and the surrounding environment and explored design and material optimization strategies to enhance heat resistance and achieve a more uniform temperature distribution.

Beyond the specific results obtained in each research line, the original contribution of this work lies in the development of an integrated methodology for assessing the structural integrity of fusion reactor components under realistic operational conditions. The combined use of the submodeling

techniques, fracture mechanics and lifetime assessment analyses establishes a predictive framework capable of capturing complex loading interactions and realistic operating conditions more accurately than conventional approaches.

The integration of these two research directions yields a comprehensive contribution to the structural safety, durability, and maintainability of next-generation fusion reactors, supporting their reliable and sustainable development.