

PROGRAMMA PRIN 2022 - BANDO PRIN 2022 Decreto Direttoriale n. 102 del 02-02-2022

TITOLO DEL PROGETTO: PREPARATION AND PERFORMANCE OF PCs WITH NANOSTRUCTURES FOR CIVIL ENGINEERING PROJECTS - 2022X5L45T

CODICE CUP: E53D23003860006

Budget DIST: 87.973 €

Responsabile Unità Locale: Prof. Francesco Marotti de Sciarra

Altre Unità di Ricerca coinvolte nel progetto: Università di Parma

Descrizione del progetto

Il progetto di ricerca ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo di calcestruzzi drenanti nano-modificati, con particolare riferimento alle applicazioni nell'ingegneria civile e, in modo specifico, alle pavimentazioni stradali. L'attività si è concentrata sul miglioramento delle prestazioni meccaniche, della resistenza alla frattura e del comportamento a fatica dei calcestruzzi drenanti, mantenendo al tempo stesso le loro proprietà funzionali, quali permeabilità e capacità di gestione delle acque meteoriche.

Il progetto, svolto dalle unità operative dell'Università degli Studi di Parma e dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, ha integrato attività sperimentali e modellazione numerica multiscala. Sono state condotte caratterizzazioni chimiche, mineralogiche e microstrutturali di nanostrutture, cementi, aggregati e nanocompositi mediante tecniche quali EDS, XRD e SEM. Tali analisi hanno permesso di comprendere la composizione dei materiali, la distribuzione delle nanostrutture nella matrice cementizia e il rapporto tra porosità, microstruttura e prestazioni del materiale.

Tra i principali risultati raggiunti si evidenzia la determinazione delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi drenanti nanomodificati, attraverso prove di compressione, trazione, flessione e taglio. Sono inoltre state eseguite prove di permeabilità e valutazioni sulla capacità di ritenzione e rilascio dei metalli pesanti, contribuendo alla definizione delle prestazioni ambientali dei materiali studiati. Le prove di frattura hanno consentito di misurare la tenacità a frattura e di valutare l'influenza della porosità sul comportamento strutturale.

Un risultato rilevante riguarda lo sviluppo e la calibrazione di modelli numerici avanzati. A scala macroscopica sono stati impiegati modelli agli elementi finiti, modelli Lattice Discrete Element Method e modelli Bond-Based Peridynamics, utili per simulare il comportamento meccanico, l'innescio e la propagazione delle cricche e l'evoluzione del danno. A scala micro- e nanometrica è stato utilizzato un recente modello non locale detto Stress-Driven Model, finalizzato alla descrizione del comportamento di nanostrutture e materiali porosi.

Le indagini a fatica hanno prodotto dati sperimentali utili per la previsione della vita utile dei calcestruzzi drenanti sotto carichi ciclici. In particolare, è stato sviluppato un modello statistico per la valutazione della vita a fatica, basato sulla distribuzione di Weibull, che costituisce un contributo significativo alla progettazione di pavimentazioni più durevoli e sostenibili.

Dalle attività sperimentali e numeriche è emerso che l'aggiunta di nano-silice, nelle condizioni analizzate, non ha prodotto incrementi meccanici statisticamente significativi, pur determinando

una riduzione della capacità di infiltrazione a causa della densificazione superficiale e del riempimento dei pori. Tuttavia, lo studio ha confermato l'efficacia dei modelli numerici, in particolare del metodo LDEM, nel riprodurre la risposta meccanica e i percorsi di fessurazione del calcestruzzo drenante.

Pubblicazioni scientifiche e principali contributi

Nell'ambito del progetto sono stati pubblicati o accettati diversi lavori scientifici su riviste internazionali di fascia Q1/Q2, oltre a un contributo in fase di sottomissione, e molti contributi in conferenze internazionali. Tali pubblicazioni documentano i risultati sperimentali, numerici e teorici conseguiti durante il progetto. Le pubblicazioni su riviste internazionali sono:

Ronchei C., Carpinteri A., Pucillo G.P., Vantadori S., "Flexural fatigue behaviour of pervious concrete: Lifetime evaluation and statistical model development", International Journal of Fatigue, 2025. Il lavoro presenta un'ampia campagna sperimentale sul comportamento a fatica flessionale del calcestruzzo drenante destinato a pavimentazioni stradali a medio traffico. I risultati hanno evidenziato una significativa dispersione della vita a fatica, dovuta all'eterogeneità intrinseca del materiale, e hanno consentito lo sviluppo di un modello predittivo basato sulla distribuzione di Weibull. Il contributo fornisce quindi strumenti utili per la progettazione e la valutazione della durabilità di pavimentazioni drenanti.

Oliveira J.D., Kostas L.E., Marangon E., Vantadori S., "Strength analysis of nano-silica modified pervious concrete: A promising cement-based composite – Experimental and numerical investigation", Composite Structures, 2025. La pubblicazione analizza il comportamento meccanico del calcestruzzo drenante modificato con nano-silice attraverso un approccio integrato sperimentale e numerico. Le prove hanno confrontato calcestruzzi drenanti tradizionali e modificati con il 3% di nano-silice, valutando permeabilità, densità, porosità e resistenze meccaniche. È emerso che la nano-silice riduce sensibilmente la capacità di infiltrazione, senza produrre miglioramenti meccanici statisticamente significativi. Il lavoro ha inoltre dimostrato l'efficacia del metodo LDEM nella simulazione della risposta meccanica e della propagazione delle fratture.

"An integrated numerical–experimental approach for assessing mechanical and fracture behaviour in porous concrete", in preparazione per il Journal of Building Engineering. Questo contributo, destinato alla sottomissione, propone un approccio integrato numerico-sperimentale per descrivere il comportamento meccanico e a frattura del calcestruzzo poroso. Le prove sperimentali sono utilizzate per calibrare e validare un modello numerico continuo, esteso anche alla descrizione dell'anisotropia indotta dalla compattazione. Il lavoro fornisce una metodologia utile per simulare il comportamento del materiale in diverse condizioni di carico.

Vaccaro M.S., Luciano R., Marotti de Sciarra F., "Size-dependent stress-driven behaviour of nanobeams based on higher-order theories", Meccanica, 2025. L'articolo sviluppa una teoria non locale per l'analisi del comportamento flessionale di nano-travi, basata sul modello stress-driven e su teorie di ordine superiore. Il contributo è rilevante per il progetto poiché offre un quadro teorico per studiare il comportamento meccanico di nanostrutture potenzialmente inserite nella matrice cementizia dei calcestruzzi drenanti, permettendo di descrivere effetti dimensionali non catturabili dai modelli classici.

Pinnola F.P., Luciano R., Marotti de Sciarra F., "Bishop nanorods with stress-driven nonlocal elasticity and arbitrary boundary conditions", Mechanics Research Communications, 2025. Il lavoro propone un modello non locale per lo studio di nano-aste secondo la teoria di Bishop, con condizioni al contorno arbitrarie. Il tema è collegato all'impiego di nanostrutture come possibili rinforzi nei calcestruzzi drenanti, poiché consente di comprendere e prevedere la risposta meccanica di elementi nanometrici incorporati nella matrice cementizia.

Pinnola F.P., Scudieri F., Alotta G., Marotti de Sciarra F., "On the stochastic dynamics of nonlocal viscoelastic plates", International Journal of Engineering Science, 2026. La pubblicazione studia le vibrazioni di piastre viscoelastiche non locali soggette a eccitazioni stocastiche. Il contributo amplia il quadro teorico del progetto verso elementi bidimensionali nanometrici o micrometrici, che possono essere impiegati come additivi o rinforzi innovativi nei materiali cementizi porosi. Il lavoro consente di approfondire gli effetti di non località e viscoelasticità sulla risposta dinamica di sistemi avanzati.

Pinnola F.P., Luciano R., Marotti de Sciarra F., "Static analysis of porous Bishop nanorod embedded in an elastic medium", Composite Structures, 2026. L'articolo presenta una formulazione analitica per la risposta statica di nano-aste porose immerse in un mezzo elastico, interpretabile anche come matrice cementizia. Il modello permette di analizzare l'interazione tra inclusioni nanometriche porose e matrice circostante, risultando particolarmente utile per la progettazione di compositi cementizi nanostrutturati e sostenibili, inclusi i calcestruzzi drenanti.

Disseminazione e impatto dei risultati

I risultati del progetto sono stati inoltre presentati in numerose conferenze internazionali, tra cui eventi dedicati alla meccanica dei materiali, alla frattura, all'integrità strutturale, alla sicurezza strutturale e ai materiali innovativi multiscala. Questa attività ha permesso di diffondere i risultati presso la comunità scientifica internazionale e di favorire il confronto su temi quali la durabilità, la frattura, la fatica, la modellazione multiscala e l'impiego di materiali sostenibili nell'ingegneria civile.

In conclusione, il progetto ha raggiunto risultati significativi sia sul piano sperimentale sia su quello modellistico. È stata definita una base conoscitiva avanzata per comprendere il comportamento dei calcestruzzi drenanti nano-modificati, con particolare attenzione al compromesso tra permeabilità, porosità e prestazioni strutturali. Le indicazioni preliminari elaborate supportano il possibile impiego di tali materiali in applicazioni civili sostenibili, soprattutto nel settore delle pavimentazioni stradali, evidenziando al tempo stesso la necessità di ulteriori ottimizzazioni della miscela per massimizzare i benefici delle nanostrutture.