

RIPRODUZIONE NUMERICA DELLA FRATTURA TRAMITE SIMULAZIONI NUMERICHE SUPPORTATE DA SPERIMENTAZIONI DI LABORATORIO

Marco Domaneschi

Dipartimento di Ingegneria Strutturale,
Politecnico di Milano

Tubi commerciali in polipropilene, caratterizzati da un comportamento fragile alle basse temperature, rappresentano l'oggetto del presente studio che si sviluppa attraverso prove sperimentali e procedure numeriche atte a riprodurre l'innescò e la propagazione della frattura. Vengono descritti gli elementi essenziali di una metodologia per riprodurre e identificare le fratture da impatto.

Gli esperimenti di laboratorio sono stati sviluppati a diverse temperature inizialmente in condizioni quasi statiche e successivamente in condizioni dinamiche al fine, rispettivamente, di spiegare il comportamento del materiale tramite una caratterizzazione dello stesso in termini di diagrammi sforzo-deformazione e di osservare il comportamento meccanico di campioni di tubi sottoposti a carichi da impatto. Inoltre, le prove dinamiche sono risultate funzionali a sostenere e validare il successivo studio numerico per la simulazione dinamica della frattura.

La procedura proposta, chiamata VCMD (Virtual Crack Method with Element Deactivation) e basata sull'utilizzo di MSC MARC, permette di seguire l'evoluzione del percorso della fessura tramite una disattivazione selettiva degli elementi finiti sulla base di consolidati principi di meccanica della frattura. Il confronto tra le prove di impatto e i risultati delle simulazioni numeriche, tra la resistenza alla frattura caratteristica del materiale e il tasso di rilascio di energia, mostrano che il metodo proposto simula gli effetti dell'impatto con precisione e rapidità e permette l'identificazione del danno. Da un paragone con altre metodologie numeriche si nota che la VCMD mostra alcuni aspetti positivi quali la sua indipendenza da percorsi di frattura predeterminati e da tecniche di remeshing, anche in condizioni dinamiche

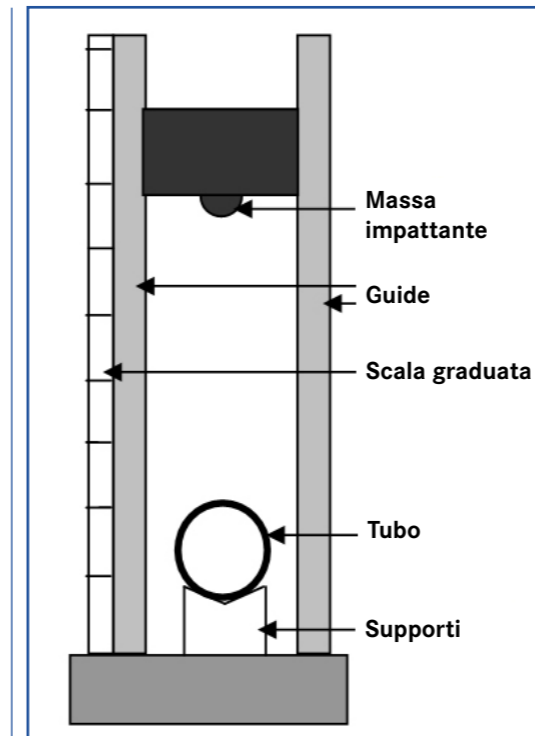


Fig. 1 - Schema dell'impianto di sperimentazione

caratterizzate da velocità relativamente alte (impatti) e reticoli tridimensionali. Inoltre, come si è notato da analisi preliminari, questa tecnica risulta promettente per la riproduzione della frattura "ramificata".

IL CASO IN ESAME

Le normative guidano i produttori del settore industriale verso sperimentazioni dei loro manufatti per evitare fratture dovute ad eventi di impatto. I tubi in plastica sono elementi soggetti a tali eventualità durante il loro uso ma anche durante il trasporto e l'installazione [UNI EN 744-1997]. Approcci tradizionali basati sull'ispezione visiva non sono in grado di rilevare i livelli di piccole entità. Per questo motivo, uno strumento rapido e preciso di identificazione è essenziale per valutare l'integrità delle strutture e dei loro limiti operativi in termini di variabili fisiche.

Il comportamento meccanico dei polimeri come il polipropilene può essere influenzato da una serie di fattori, alcuni deliberatamente introdotti e altri relativi alle condizioni ambientali. Tra questi, si possono menzionare le cariche minerali, la temperatura e l'umidità ambientale. Le cariche minerali inorganiche vengono introdotte nei composti polimerici per ridurre il costo e migliorarne la rigidità e stabilità dimensionale. Generalmente, l'aggiunta di cariche inorganiche ha un effetto

di infragilimento dei polimeri e si traduce in una significativa riduzione di resilienza rendendo i manufatti più suscettibili a problemi di frattura. Le condizioni ambientali possono anche interessare le caratteristiche meccaniche del polimero: il polipropilene ad esempio mostra una risposta particolarmente fragile alle basse temperature. Tale fenomeno scompare all'aumentare della temperatura. Inoltre, valori elevati di umidità relativa possono favorire una risposta duttile.

Un'ampia serie di tubi commerciali in polipropilene sono stati testati in laboratorio in caso di carico di impatto, a temperature prefissate. La bassa temperatura e la velocità del carico sono parametri base per guidare la risposta del materiale verso problematiche di frattura, tali parametri possono essere considerati in laboratorio tramite una camera ambientale e una macchina universale di prova opportuna regolata. A 0°C, oltre una soglia caratteristica di carico di impatto, tali campioni mostrano fessurazioni.

La metodologia numerica proposta è volta a riprodurre e comprendere tali comportamenti, fornendo di conseguenza un metodo efficace e semplice, basata sugli strumenti disponibili. Le simulazioni numeriche consistono in un approccio tridimensionale ad elementi finiti supportato dagli esperimenti di laboratorio.

LA PROCEDURA NUMERICA

Il problema fisico di un corpo soggetto a impatto è caratterizzato da diverse non linearità che devono essere comprese dalle simulazioni numeriche. Il codice commerciale MSC MARC [MARC & Mentat versione 2010] consente di riprodurre tali comportamenti ed è stato utilizzato nelle analisi dinamiche di modelli numerici 3D dei campioni di tubo sottoposti ad impatto. Le equazioni del moto sono state risolte tramite un metodo di integrazione diretta con un approccio in grandi spostamenti e deformazioni. I contatti tra la massa impattante, il tubo e il supporto di base sono stati presi in considerazione con un attrito costante.

Le simulazioni numeriche del problema hanno comportato la discussione di diverse problematiche tra cui la dimensione del reticolo di elementi per la discretizzazione del problema strutturale, la definizione del metodo di disattivazione degli elementi per la simulazione della propagazione della fessura, il criterio numerico per la selezione degli elementi da rimuovere, la dimensione degli elementi in prossimità della zona di diffusione della fessura. La discretizzazione del problema si è



Figura 2. Esempio di frattura su campioni di laboratorio.

basata su concetti generali della propagazione delle onde meccaniche nel continuo solido. Successivamente si è definito il metodo di simulazione della fessura (Virtual Crack Method with Element Deactivation) attraverso nozioni di meccanica della frattura quali la definizione del rilascio di energia di frattura.

Il criterio di Galileo-Rankine-Navier (GRN) è stato selezionato come criterio di rimozione degli elementi durante la simulazione numerica. Per stabilire i criteri di discretizzazione del problema in prossimità della zona interessata dal carico da impatto è stato necessario testare diversi tipi di modelli in campo bidimensionale (stato piano di deformazione) e tridimensionale sulla base di confronti con quantità fisiche caratteristiche (e.g. energia di frattura e conservazione della massa).

I RISULTATI E LE OSSERVAZIONI FINALI

I campioni sottoposti ad impatto mostrano sempre una frattura parallela al proprio asse che si propaga, oltre certe intensità di impatto, per tutta la lunghezza del tubo. La Figura 1 mostra alcuni campioni sottoposti ai test di impatto a bassa temperatura con frattura completa lungo tutta la lunghezza. Per confronto, in Figura 2, vengono riprodotti i risultati delle analisi numeriche condotte tramite l'utilizzo della procedura VCMD sui campioni di tubi modellati sfruttando le condizioni di simmetria.

L'evoluzione spazio-temporale della frattura viene realizzata tramite la disattivazione di elementi finiti implementando una specifica subroutine in Fortran esternamente a MSC MARC che utilizza il criterio di selezione GRN modificato (non simmetrico) basato sul massimo sforzo. I risultati numerici corrispondono ai quelli di laboratorio e alle specifiche dei materiali in termini di resistenza alla frattura in modo soddisfacente.

Questa metodologia consente la simulazione di frattura tramite una procedura semplice ad elementi finiti anche quando sono coinvolti elementi solidi ed alte velocità di impatto. Questo risultato viene raggiunto senza una prescrizione del percorso della frattura e senza l'uso di tecniche di remeshing. L'approccio è generale e può essere impiegato con tutti i codici ad elementi finiti con la possibilità di implementare subroutine e la tecnica di disattivazione di elementi finiti, rappresentando un valido metodo numerico per l'identificazione dell'integrità strutturale, nel caso in esame di tubi in polipropilene industriali, in particolare quando il controllo visivo non è in grado di rilevare i livelli di danno di piccole entità. Oltre a questi aspetti positivi, la metodologia proposta è anche utile nel processo di ottimizzazione del composto di materiale, per esempio nel caso di materiali polimerici, per il miglioramento della risposta meccanica, consentendo di evitare estese campagne sperimentali.

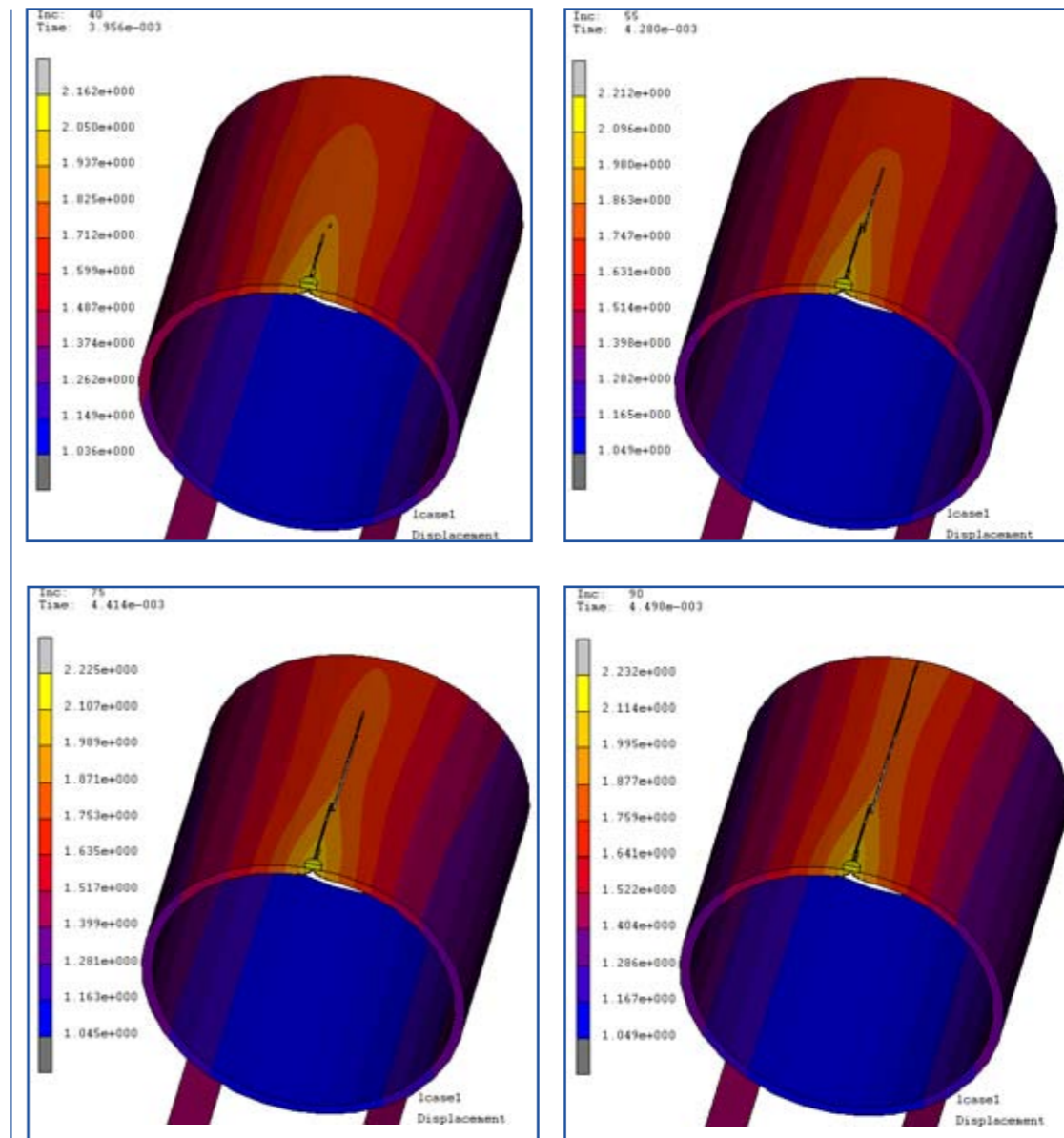


Figura 3. Riproduzione numerica della frattura con MSC MARC tramite VCMD sul campione posizionato su supporti alla base e colpito dalla massa impattante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN 744-1997. Plastics piping and ducting systems. Thermoplastics pipes. Test method for resistance to external blows by the round-the-clock method.
- [2] M. Domaneschi (2012), "Experimental and numerical study of standard impact tests on poly-propylene pipes with brittle behaviour", Journal of Engineering Manufacture, Proc. IMechE Part B. SAGE. DOI: 10.1177/0954405412461983.
- [3] MARC & Mentat MSC, User manuals. Santa Ana, CA, USA: MSC Software, 2010.

Marco Domaneschi ha conseguito il titolo di dottore in ingegneria (1998) e dottore di ricerca in ingegneria civile (2006) presso l'Università degli Studi di Pavia occupandosi di controllo e monitoraggio strutturale. Negli ultimi anni ha ricoperto incarichi di ricerca e di didattica presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano ed è autore di numerose pubblicazioni agli atti di congressi e su riviste scientifiche internazionali. I suoi interessi includono il controllo e il monitoraggio strutturale, i processi stocastici, l'analisi di rischio, la sicurezza e l'affidabilità strutturale, la simulazione numerica e l'identificazione strutturale.

domaneschi@stru.polimi.it



