

APPENDICE A6

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLE LEGGI COESIVE DI INTERFACCIA

A6.1. Introduzione

E' ben noto in Meccanica della Frattura che il comportamento dei materiali può essere efficacemente descritto da una coppia di leggi costitutive. Di esse, una è la legge $\sigma(\delta)$, che, per il modo I di frattura, descrive il comportamento softening di un materiale fessurato, sino ad una apertura critica della fessura, oltre la quale si annulla l'interazione tra le facce della stessa; l'altra, analogamente alla precedente, è la legge $\tau(s)$, per il modo II di frattura.

La suddetta coppia di leggi costitutive va sotto il nome di “modello della fessura coesiva”. Intorno ad esso si è sviluppata una feconda attività di ricerca.

Vi hanno contribuito, negli ultimi anni, numerosi ricercatori di tutto il mondo con l’obiettivo di individuare la procedura più idonea per la determinazione sperimentale delle leggi coesive di interfaccia. A tutt’oggi la procedura più accreditata, limitatamente alla legge coesiva di interfaccia per il solo modo I di frattura, $\sigma(\delta)$, si basa sulla tecnica del “J integral”.

Per la legge $\tau(s)$ si propone invece una procedura sperimentale messa a punto nell’ambito della tesi.

A6.2. Tecnica del “J integral” per la determinazione della legge $\sigma(\delta)$

Ci si riferisca allo schema strutturale di figura A6.1, relativo ad una coppia di travi a mensola tra loro adese. Lo schema è noto con l’acronimo DCB (*Double Cantilever Beam*). Ciascuna delle mensole è caricata in corrispondenza dell’estremità libera da una coppia flettente, M , di verso tale da divaricare l’interfaccia. Come è meglio chiarito nel prosieguo, solo per tale schema strutturale è disponibile una soluzione in forma chiusa del summenzionato “J integral”.

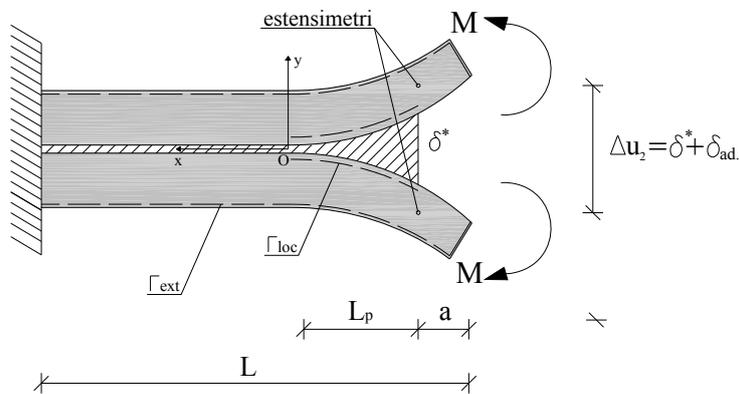


Figura A6.1 – Double Cantilever Beam.

In figura si è indicato con il simbolo L_p la lunghezza della zona coesiva, con il simbolo a un difetto iniziale di incollaggio, con il simbolo δ^* l’apertura

critica della fessura ed infine con i simboli Γ_{loc} e Γ_{ext} , rispettivamente, il contorno della zona di processo e quello esterno dell'intero provino.

L'espressione del "J integral", valutato dall'apice (*tip*) della fessura (origine del sistema di riferimento) fino alla fine della zona di processo (apertura critica δ^*), assume il seguente aspetto:

$$J_{loc} = \int_0^{\delta^*} \sigma(\delta) d\delta + J_{tip}, \quad (A6.1)$$

dove con il simbolo J_{tip} (valore del suddetto integrale nell'origine del sistema di riferimento) si è indicato il valore dell'energia di frattura in corrispondenza dell'inizio della fessura.

L'estensione della zona di processo, L_p , così come l'apertura critica della fessura, δ^* , crescono all'avanzare della fessura in accordo con la (A6.1).

Il valore dell'energia di frattura valutata lungo la zona di processo, J_R , è pari a:

$$J_{loc} - J_{tip} = J_R = \int_0^{\delta^*} \sigma(\delta) d\delta. \quad (A6.2)$$

Se si differenzia tale relazione rispetto all'apertura critica della fessura, δ^* , si ottiene la seguente espressione:

$$\frac{\partial J_R}{\partial \delta^*} = \sigma(\delta^*). \quad (A6.3)$$

Monitorando i valori di δ^* e di J_R , dalla relazione (A6.3) è quindi possibile ricavare la legge costitutiva $\sigma(\delta)$ cercata [41]. Il vantaggio della tecnica del "J integral" consiste nella possibilità di determinare tale legge a partire dall'altra, $\sigma(\delta^*)$, essendo le due legate tra di loro per il tramite delle equazioni A6.1-2.

Rimane solo da correlare il valore dell'energia di frattura lungo la zona di processo, J_{loc} , con il momento flettente esterno applicato alle estremità della DCB.

Per le ben note proprietà del "J integral", tale valore coincide con quello calcolato lungo il contorno esterno del provino, J_{ext} [39].

La quantità J_{ext} è in generale funzione dei parametri che caratterizzano le leggi coesive di interfaccia. Come accennato, solo per lo schema strutturale esaminato (DCB) e solo per le condizioni di carico ipotizzate è disponibile una espressione in forma chiusa della quantità J_{ext} [39]:

$$J_{\text{ext}} = 12(1-\nu^2) \frac{M^2}{B^2 H^3 E} \quad (\text{deformazioni piane}) \quad [39], \quad (\text{A6.3})$$

dove con B ed H si sono indicati, rispettivamente, lo spessore e l'altezza di ciascun aderendo, con E il loro modulo di elasticità normale e con ν il coefficiente di Poisson.

A6.3. Dispositivo di prova

Affinché il provino sia soggetto a solo momento flettente, è necessario applicare il carico secondo la modalità descritta in figura A6.2.

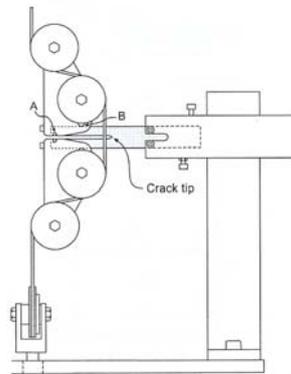


Fig. A6.2 – Meccanismo per l'applicazione del carico.

Per l'acquisizione dei dati relativi alla apertura critica della fessura, δ^* , si utilizzano degli estensimetri posizionati sia in corrispondenza dell'asse neutro degli aderenti che dell'inizio dello strato di adesivo, così come mostrato in figura A6.1.

Il valore della deformazione così monitorato, tiene conto sia della deformazione dello strato di adesivo, δ^* , che di quella relativa a metà spessore degli a-

derendi, $\delta_{ad.}$. Quest'ultima, nella maggior parte dei casi può essere trascurata e quindi con buona approssimazione è possibile ritenere che sia $\delta^* \cong \Delta u_2$.

La presenza di un ramo softening nella curva $\sigma(\delta)$ (vedere Fig. 1.1a) induce ad eseguire la prova sopra descritta in controllo di spostamento.

A6.4. Tecnica sperimentale per la determinazione del legame costitutivo di interfaccia $\tau(s)$

Il legame costitutivo di interfaccia $\tau(s)$ si presenta in generale nella forma di figura 1.1b.

Si fa riferimento ad un provino del tipo indicato in figura A6.3, consistente in un giunto a doppia sovrapposizione bilanciato tra aderendi di FRP.

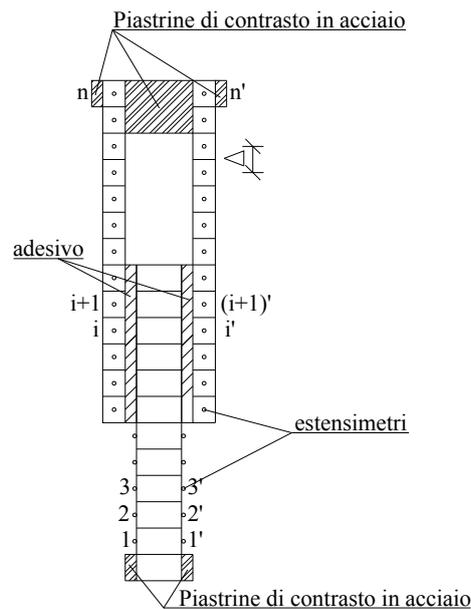


Figura A6.3 – Schema della prova.

L'aderendo interno ha dimensioni $b \times 2h$, gli aderendi esterni dimensione $b \times h$. Il modulo di elasticità normale degli aderendi esterni e di quello interno sia E .

La presenza di un ramo softening richiede che la prova sia condotta in controllo di spostamento.

Riferendosi all' i -esima coppia di estensimetri della zona incollata, e tenendo conto della sottigliezza degli aderendi, gli spostamenti s_i ed s_i' , che il loro punto di applicazione subisce a seguito dello spostamento, s , imposto al provino è:

$$s_i = s + \sum_{\alpha=1}^i \varepsilon_{\alpha} \Delta, \quad (\text{A6.4})$$

$$s_i' = s + \sum_{\alpha=1}^i \varepsilon_{\alpha}' \Delta, \quad (\text{A6.5})$$

essendo ε_i (o ε_i') la deformazione restituita dall' α -esimo (o α_i' -esimo) estensimetro.

Se si analizza il generico elemento di lunghezza Δ e di estremi i e $i+1$ di figura A6.5

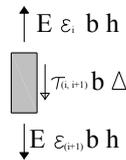


Figura A6.4 – Elemento di lunghezza Δ .

l'equilibrio alla traslazione lungo l'asse del provino impone che sia:

$$E \varepsilon_{(i+1)} h + \tau_{(i, i+1)} b \Delta - E \varepsilon_i b h = 0. \quad (\text{A6.6})$$

Per continuità è corretto assumere come spostamento corrispondente alla tensione $\tau_{(i, i+1)}$ il valore medio:

$$s_{(i, i+1)} = \frac{s_i + s_{(i+1)}}{2}. \quad (\text{A6.7})$$

Nel corso dell'esperimento si costruiscono più curve pari al numero totale di estensimetri applicati agli aderenti esterni. Quale curva $\tau(s)$ è quindi possibile assumere la curva media di quelle ottenute.