

IGF8 - VIII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Genova, 27 - 29 Maggio 1992

INTERAZIONE TRA CARICHI APPLICATI E AMBIENTE AGGRESSIVO, NELLA PROGETTAZIONE E NELLA STIMA DELLA VITA RESIDUA.

G.Gabetta, M.M.Radaelli

CISE, Tecnologie Innovative, via Reggio Emilia, 39 20090 Segrate (Milano)

SOMMARIO

In seguito alle conoscenze accumulate nel campo della corrosione e della corrosione-fatica, è risultato chiaro che la meccanica della frattura è uno strumento che può essere utile al corrosionista per affrontare il problema della nucleazione e crescita di difetti in presenza di ambiente aggressivo. L'uso dei metodi propri della meccanica della frattura permette infatti di passare da una filosofia di progetto tipo 'safe life', ad una filosofia tipo 'damage tolerant'. Le prove 'classiche' di tensocorrosione (prove SSRT) sono prove di trazione lenta in ambiente, dalle quali si ricavano indicazioni abbastanza generiche di suscettibilità. Si è visto che applicandi i concetti e i metodi della meccanica della frattura, anche con prove di questo tipo si possono determinare importanti proprietà del materiale.

In questo lavoro si cerca di dare degli spunti per l'impostazione di campagne di prova che permettano, utilizzando tecniche già ben note, di determinare parametri utili per l'ottimizzazione della vita di componenti d'impianto.

INTRODUZIONE

E' noto che l'azione combinata di sollecitazioni meccaniche e ambiente aggressivo può dar luogo, nei materiali metallici, alla nucleazione e crescita di cricche che possono compromettere la stabilità strutturale di componenti. Questo fenomeno, che in ambito corrosionistico viene indicato con il termine "tensocorrosione", può essere studiato con i metodi della meccanica della frattura, che permettono di affrontare i problemi ad esso connessi in modo più completo. In generale, si usa raggruppare tutti i casi di nucleazione e crescita di difetti in cui sia determinante l'azione dell'ambiente aggressivo sotto il nome di "Environmentally Assisted Cracking" (EAC), nell'ambito del quale si comprendono non solo gli effetti di carichi statici (tensocorrosione), ma anche quello di carichi variabili nel tempo (corrosione-fatica).

In sede di progetto, le problematiche relative all'EAC sono state storicamente poco considerate, in quanto si riteneva sufficiente procedere alla scelta di materiali immuni da tensocorrosione nell'ambiente di esercizio. Questo tipo di approccio pragmatico non è più sufficiente in molti casi, per diverse ragioni:

1) Non si può ritenere, alla luce dei risultati più recenti, che una qualunque coppia materiale-ambiente sia immune da EAC; il concetto di materiale immune va rivisto considerando l'effetto di carichi variabili nel tempo e dell'evoluzione che il materiale e l'ambiente di lavoro possono subire nel tempo.

2) avviene sempre più spesso che si mantengano in funzione impianti anche dopo il termine della vita prevista in sede di progetto; in questi casi, la probabilità che durante l'esercizio si creino condizioni favorevoli alla formazione di cricche aumenta col tempo, a causa delle modifiche allo stato di sforzo (sono particolarmente importanti le fermate e gli avviamenti degli impianti), delle variazioni ambientali, dell'evoluzione delle proprietà del materiale.

3) l'estensione della vita utile e l'evoluzione dei metodi di controllo non distruttivo porta alla necessità di 'convivere con le cricche' e quindi di prevedere l'evoluzione nel tempo di difetti, in materiali che possono aver subito cambiamenti di microstruttura durante l'esercizio.

Per lo sviluppo di metodologie da utilizzare per la previsione di vita, è necessaria la conoscenza dei meccanismi di crescita dei difetti [1], conoscenza che per quanto riguarda l'EAC è meno avanzata di quella raggiunta sia nel campo del creep che in quello della fatica [2]. Per un piano integrato di controllo della frattura, vanno presi in considerazione tutti quei componenti che lavorano a contatto con ambiente aggressivo. In questi componenti, la nucleazione di cricche può avvenire in corrispondenza di cavità (pit) causate da fenomeni di corrosione localizzata sulla superficie del metallo [3], o in seguito a meccanismi innescati dai processi di ossidazione superficiale [4]. L'importanza della fase di propagazione rispetto a quella di nucleazione dipende sia dallo stato del materiale, che dallo spessore del componente e dal livello di sforzo. In questo campo si possono distinguere situazioni ambientali: ambiente acquoso a temperature fino a 200°C, e alta temperatura.

Nel seguito si cercherà di delineare quali devono essere le linee di azione per la pianificazione di un programma di prove che tenga conto delle conoscenze acquisite nel campo dell'interazione tra sollecitazioni meccaniche e processi corrosivi, mettendo in evidenza quali vantaggi possono essere ricavati, in sede di progetto e di gestione degli impianti, dall'uso delle metodologie di prova e dei risultati nel campo dell'"Environmentally Assisted Cracking". Quanto discusso deriva in parte dai risultati dell'attività del gruppo di lavoro "Fracture mechanics techniques for environmentally assisted cracking", recentemente formatosi in ambito ESIS.

2. FILOSOFIA DAMAGE-TOLERANT

Per quanto riguarda il progetto, si tratta di passare da un approccio del tipo "SAFE-LIFE", ad un approccio del tipo "DAMAGE-TOLERANT", nel quale si tenga conto della possibile esistenza di un difetto, già presente all'atto della messa in opera o, come avviene spesso in presenza di ambiente aggressivo, formatosi in esercizio.

I metodi di progetto del tipo "DAMAGE-TOLERANT" sono basati sulla meccanica della frattura. In Fig.1 [5] sono riassunti i principali aspetti ingegneristici riguardanti la presenza di cricche nelle strutture, e le domande a cui la meccanica della frattura può dare risposta. Per rispondere a queste domande, occorre conoscere le proprietà del materiale a due livelli: la crescita sottocritica delle cricche, e la frattura veloce dovuta a sovraccarichi.

La risposta alle domande 1 e 2, relative alla frattura veloce, è ottenibile utilizzando tecniche consolidate e spesso standardizzate; le domande dalla 3

alla 5, di interesse per la filosofia di progetto tipo "DAMAGE TOLERANT", si riferiscono alla propagazione sottocritica dei difetti. Le proprietà del materiale in questo campo sono molto più difficili da valutare, soprattutto quando si vuole tener conto dell'influenza dell'ambiente.

Una valutazione delle problematiche relative all'EAC viene fatta più facilmente in sede di progetto (soprattutto per quanto riguarda la scelta dei materiali). Per il caso di componenti in esercizio, un piano di controllo della frattura può essere impostato seguendo le linee guida mostrate nello schema a blocchi in Fig.2. Per impostare correttamente lo studio di un problema in cui è importante l'interazione tra carichi e ambiente aggressivo, occorre conoscere i principali aspetti del fenomeno.

3. PARAMETRI IN GIOCO E METODI DI PROVA

Come schematizzato nel diagramma in Fig.3, per l'instaurarsi di un fenomeno tipo EAC occorre la presenza di tre gruppi di parametri che devono contemporaneamente assumere valori critici. Si tratta di:

- 1) Parametri di carico
- 2) Parametri ambientali
- 3) Parametri caratteristici del materiale

Il fenomeno EAC può venire attenuato o eliminato agendo anche su uno solo dei gruppi di parametri indicati. E' chiaro perciò che da una parte è realistico pensare a interventi in campo che permettano di tenere sotto controllo eventuali difetti, e dall'altra è molto importante conoscere con precisione le proprietà del materiale in esame, quando interagisce con l'ambiente di esercizio.

3.1. Piano di prova

I parametri di interesse sono molti, ma è possibile selezionare i più importanti e stabilire un piano di prove mirato. In Fig.4 è riportato uno schema riassuntivo delle diverse tecniche di prova e dei parametri che esse permettono di determinare. Lo schema è stato ripreso da un lavoro di Erlings [6], in cui l'autore ha cercato di stabilire una gerarchia dei metodi di prova, a proposito della quale occorre però evidenziare alcuni punti importanti:

1) è noto che le prove SSRT forniscono soprattutto una discriminazione in prima battuta sulla suscettibilità del materiale in un determinato ambiente; studi recenti hanno dimostrato che in alcuni casi la risposta non è sufficiente a provare la non suscettibilità di una coppia materiale-ambiente, e che altre tecniche, messe a punto in funzione del particolare problema affrontato, possono essere maggiormente consigliabili

2) nella maggioranza delle prove indicate nello schema, la velocità di deformazione gioca un ruolo fondamentale. Questo è vero in particolare nel caso in cui i processi dipendenti dal tempo (corrosione/ossidazione) sono dominanti

3) le prove SSRT non permettono in linea di principio di determinare i parametri caratteristici (soglie di carico, velocità, tempo di incubazione) della nucleazione e della crescita sottocritica dei difetti. Utilizzando la meccanica della frattura [7] si possono però ottenere risultati quantitativi.

4) i parametri che definiscono il comportamento ad EAC dal punto di vista quantitativo, e che permettono quindi di utilizzare la filosofia DAMAGE TOLERANT, sono più facilmente determinabili con prove ad hoc, tra cui si sono rivelate particolarmente promettenti quelle "classiche" di meccanica della frattura (determinazione della curva J-R) in ambiente. In presenza di EAC, è

stato dimostrato che la velocità di trazione diventa un parametro importante, che il valore di K all'inesco corrisponde al K_{Isc} del materiale, e che la plasticità del materiale diminuisce notevolmente [8,9].

3.2 Ambiente di prova

Ogni campagna di prove deve essere eseguita in ambiente il più possibile rappresentativo; in generale, per ogni componente da esaminare l'ambiente può appartenere ad una delle seguenti tre categorie:

- a) l'ambiente caso "peggiore"
- b) l'ambiente di esercizio
- c) l'ambiente di fondo intaglio.

L'ambiente di tipo a) è particolarmente aggressivo, e viene scelto tra quelli che possono, anche con probabilità molto bassa, entrare in contatto con il componente in questione (magari in caso di malfunzionamento). Tipicamente si usa l'ambiente NACE (soluzione contenete acido acetico e acido solfidrico) per i materiali del petrolchimico, acqua di mare per l'aeronautica, condizioni di transitorio nel caso degli impianti di generazione di potenza, e così via.

L'uso di questo tipo di ambiente sottintende una filosofia di tipo "SAFE-LIFE", soprattutto in sede di scelta del materiale.

Per passare ad una filosofia del tipo "DAMAGE-TOLERANT", la caratterizzazione del materiale va fatta in ambiente il più possibile rappresentativo delle reali condizioni di esercizio (ambiente di tipo b)), con eventualmente la simulazione completa anche di particolari condizioni che possono verificarsi solo raramente, come ambienti locali (ad esempio prima condensa di vapore per le palette di turbina), ecc.

L'ambiente di tipo c) va preso in considerazione soprattutto per lo studio dei meccanismi di nucleazione e crescita dei difetti, per capire le reazioni chimiche ed elettrochimiche che sono responsabili della velocità di questi processi. A volte può essere utile fare prove su campioni lisci, in ambiente che simula quello di fondo intaglio. La caratterizzazione dell'ambiente a fondo intaglio può essere fatta tramite calcoli teorici [10] o con misura diretta [11].

3.3 Parametri di carico

I parametri di carico e il tipo di campione vanno scelti in funzione del problema che si intende affrontare. In particolare, per quanto riguarda i metodi della meccanica della frattura, in Fig.5 sono riportati i disegni e le modalità di carico per i più comuni campioni precriccati, il cui utilizzo è conforme alle normative attuali [12]. Questi campioni sono in uso da molto tempo, ma non sempre i risultati vengono "letti" alla luce della meccanica della frattura. I parametri di prova vanno determinati in modo molto preciso, ad esempio a partire dai risultati dell'analisi di rotture avvenute in campo. Una lista dei parametri che possono essere determinati e delle variabili che hanno maggiore influenza su di essi è riportata in Tabella 1 [5]. Un'analisi più approfondita sulle singole variabili esula dagli scopi di questo lavoro; va comunque messa in evidenza la necessità di approfondire il significato meccanico di ognuna di esse. Ad esempio, il parametro K_{Isc} è stato definito storicamente come una proprietà del materiale (valore di K al di sotto del quale non si ha propagazione sottocritica della cricca per una determinata coppia materiale-ambiente). Studi più recenti, e soprattutto il confronto con il comportamento a fatica, hanno dimostrato abbastanza chiaramente che il suo valore è influenzato in modo notevole dalla velocità di deformazione, e che quindi la sua determinazione spesso non è univoca. Questa osservazione del resto è abbastanza ovvia se si fa il confronto con le proprietà misurate senza l'effetto

ambientale, quando si considerano ad esempio il K di soglia per la fatica, la tenacità statica e la tenacità dinamica. La necessità di approfondire lo studio delle tecniche di prova e la significatività dei risultati è ancora più evidente qualora si vogliano estrapolare alle condizioni di esercizio i risultati di laboratorio.

4. UTILIZZO DELL'EAC PER LE PROBLEMATICHE DI ESERCIZIO: LA PREVISIONE DI VITA

E' stato visto finora come il fenomeno dell'interazione tra carichi applicati e ambiente aggressivo sia estremamente complesso; lo studio di queste problematiche richiede infatti una impostazione multidisciplinare, in quanto non si può prescindere nè dalla valutazione della resistenza meccanica del materiale, che spesso contiene difetti, nè dalla comprensione dei meccanismi di tipo chimico ed elettrochimico, nè dalla conoscenza precisa dei parametri ambientali.

Necessità di ordine pratico e la maggiore conoscenza dei meccanismi di degrado che hanno luogo durante l'esercizio, spingono verso un sempre maggiore utilizzo dei componenti, e verso un approccio al progetto che non può più limitarsi ad essere semplicemente conservativo. Diventa perciò importante, per l'estensione di vita dei componenti di impianto, tener conto anche del degrado causato dalla corrosione. Le interazioni tra proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione possono essere studiate con metodi analoghi sia per quanto riguarda gli ambienti acquosi [13] che per quanto riguarda l'alta temperatura [14].

Un piano integrato per l'ottimizzazione della vita di componenti in esercizio dovrà comprendere interventi a diversi livelli, tra cui in particolare:

- 1) monitoraggio in campo di parametri ambientali e/o di carico;
- 2) prove di laboratorio, programmate e svolte in modo estremamente mirato e utilizzando quando necessario le tecniche di meccanica della frattura, con lo scopo di ottenere risposte quantitative e non soltanto valutazioni di massima del comportamento del materiale;
- 3) studio del problema nel suo complesso, da parte di esperti delle diverse discipline, che abbiano a disposizione sia i dati di esercizio che le proprietà dei materiali.

In Fig.6 si può vedere a titolo di esempio lo schema a blocchi di un sistema di monitoraggio e previsione di vita messo a punto e utilizzato dalla General Electric per gli impianti nucleari. Questo sistema (sistema SMART) tiene conto di tutti i livelli di intervento che sono stati menzionati in precedenza. A questo proposito va ricordato che per una visione completa non vanno trascurati nè il problema della significatività del campione rispetto al componente, nè quello delle modifiche microstrutturali a cui il materiale va incontro durante l'esercizio.

5. CONCLUSIONI

Nei paragrafi precedenti si è cercato di offrire una panoramica il più possibile esauriente, anche se per forza di cose ridotta, dei problemi che possono sorgere in componenti di impianto a causa dell'azione combinata di carichi applicati e di ambiente aggressivo.

Queste problematiche, che in una visione del tipo Safe-Life vengono esaurite in sede di progetto, sono invece oggi, a causa del passaggio ad una filosofia del tipo Damage-Tolerant e all'aumento di vita dei componenti di impianto, da considerare abbastanza importanti, dato che causano buona parte delle fermate degli impianti e che rivestono una importanza fondamentale dal punto di vista della sicurezza.

La panoramica dei metodi e delle caratteristiche di prova presentata nel paragrafo 3 è servita a mostrare come esistano da tempo tecniche consolidate per

la valutazione del comportamento dei materiali metallici sotto l'azione combinata di carichi applicati e ambiente aggressivo; tuttavia, non sempre i risultati vengono elaborati in modo da ottenere informazioni di tipo quantitativo. A questo scopo, sono molto importanti i metodi della meccanica della frattura, che vanno utilizzati comunque tenendo conto dei diversi meccanismi di crescita dei difetti.

Occorre quindi uno sforzo per approfondire le conoscenze in questo campo, tenendo anche conto della possibile estensione delle stesse tecniche ai problemi dell'ossidazione ad alta temperatura.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare i componenti del gruppo di lavoro "Fracture Mechanics Methods for Environmentally Assisted Cracking", e in particolare il dr. R.J.H.Wanhill, per aver fornito spunti di discussione che sono stati utilizzati in questo lavoro.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] R.B.Thompson, "Recommendations" in "Life prediction", special issue of Material Science and Engineering, Vol.A103, pag.207-211, 1988.
- [2] R.Viswanathan, "Residual Life Techniques for Plant Life Extension", ib. pp.131-139.
- [3] M.O.Speidel, J.Denk and B.Scarlin, "Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue of Steam Turbine Rotor and Blade Materials" Report EUR 13186 EN, 1991.
- [4] J.E.King e P.J.Cotterill, "Role of oxides in fatigue crack propagation", Materials Science and Engineering, Vol.6, 1990.
- [5] R.J.H.Wanhill, "Fracture Control guidelines for Stress Corrosion cracking of High Strength Alloys", NLR Technical Publication TP1006, 1990.
- [6] J.G.Erlings, H.W.DeGroot, J.Nauta, "The effect of slow plastic and elastic strain on sulphide stress cracking and hydrogen embrittlement of 3.3% Ni steel and API %L X60 pipeline steel", Corrosion Science, Vol.27, pp. 1153-1167, 1987.
- [7] G.Gabetta, D.Pozzi, "Some Considerations on Different Test Techniques for Stress Corrosion/Corrosion Fatigue", Environmentally Assisted Fatigue, EGF7, 1990, MEP, London.
- [8] G.Gabetta, C.Rinaldi, M.M.Radaelli, "Stress Corrosion Tests in Water at 288°C, using the Unloading Compliance Technique", Proceedings of ECF 8, Turin, 1-5 October 1990.
- [9] M.Rottoli, F.Sigon, "Low pressure steam gravity; behaviour of the chemical species in condensing steam", 49th IWC, Pittsburgh (PA), Oct. 24-26, 1988
- [10] D.D.MacDonald and Mirna Urquidi-MacDonald "Modeling of Electrochemistry of Stress Corrosion Cracks in Sensitized Type 304 SS in Boiling Water Reactors", Final Report SRI Project PYG- 4032, Oct.1988.
- [11] G.Gabetta, "A Method to Measure Electrochemical Potential at the Tip of a Growing Crack during an Environmental Fatigue Test " Fat. of Engng. Mater. and Struct., Vol.5 N.3, pp.215-220, 1982.

[12] British Standard BS 6980, 1990 / ISO 7539-6 : 1989 "Corrosion of Metals and Alloys - Stress Corrosion Testing"

[13] Proceedings della conferenza "Life prediction of corrodible structures" tenutasi a Cambridge (U.K.), dal 23 al 26 Settembre 1991.

[14] "Corrosion and mechanical stress at high temperatures", V.Guttman e M.Merz, ed., Applied Science Publishers, London, 1981.

[15] P.L. Andresen and F.P.Ford, "Life Prediction by Mechanistic Modeling and System Monitoring of Environmental Cracking of Iron and Nickel Alloys in Aqueous Systems", special issue of Material Science and Engineering, Vol.A103, pp.167-184, 1988.

Tabella I : Parametri e variabili di prova per prove di EAC

PARAMETRI	VARIABILI
K_{Isc}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Materiali e ambienti</i>
t_{inc}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Geometria del campione</i>
da/dt versus K_I	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Forma e dimensione della precraccatura</i>
ΔK_{th}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rapporto R (Pmax/Pmin)</i>
da/dn versus ΔK	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Frequenza, Forma d'onda, Hold time</i>
ΔK_{scc} (if appropriate)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Storie di carico realistiche e semplificate</i> • <i>Prove su componenti</i>

LA MECCANICA DELLA FRATTURA TENTA DI RISPONDERE A QUESTE DOMANDE:

- ① QUAL'E' LA RESISTENZA RESIDUA IN FUNZIONE DELLA DIMENSIONE DELLA CRICCA?
- ② QUAL'E' LA DIMENSIONE MASSIMA DI CRICCA TOLLERABILE IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO?
- ③ QUANTO IMPIEGA UNA CRICCA A CRESCERE DA UNA DIMENSIONE INIZIALE, CORRISPONDENTE ALLA DIMENSIONE MINIMA RIVELABILE, ALLA DIMENSIONE MASSIMA TOLLERABILE?
- ④ QUALE E' LA VITA PREVISTA IN ESERCIZIO, NEL CASO IN CUI SI ASSUME CHE ESISTA UNA CRICCA DI UNA CERTA DIMENSIONE (DIFETTO DI FABBRICAZIONE)?
- ⑤ DURANTE IL PERIODO DI TEMPO DISPONIBILE PER INDIVIDUARE LA CRICCA, QUAL'E' IL GIUSTO INTERVALLO TRA LE ISPEZIONI?

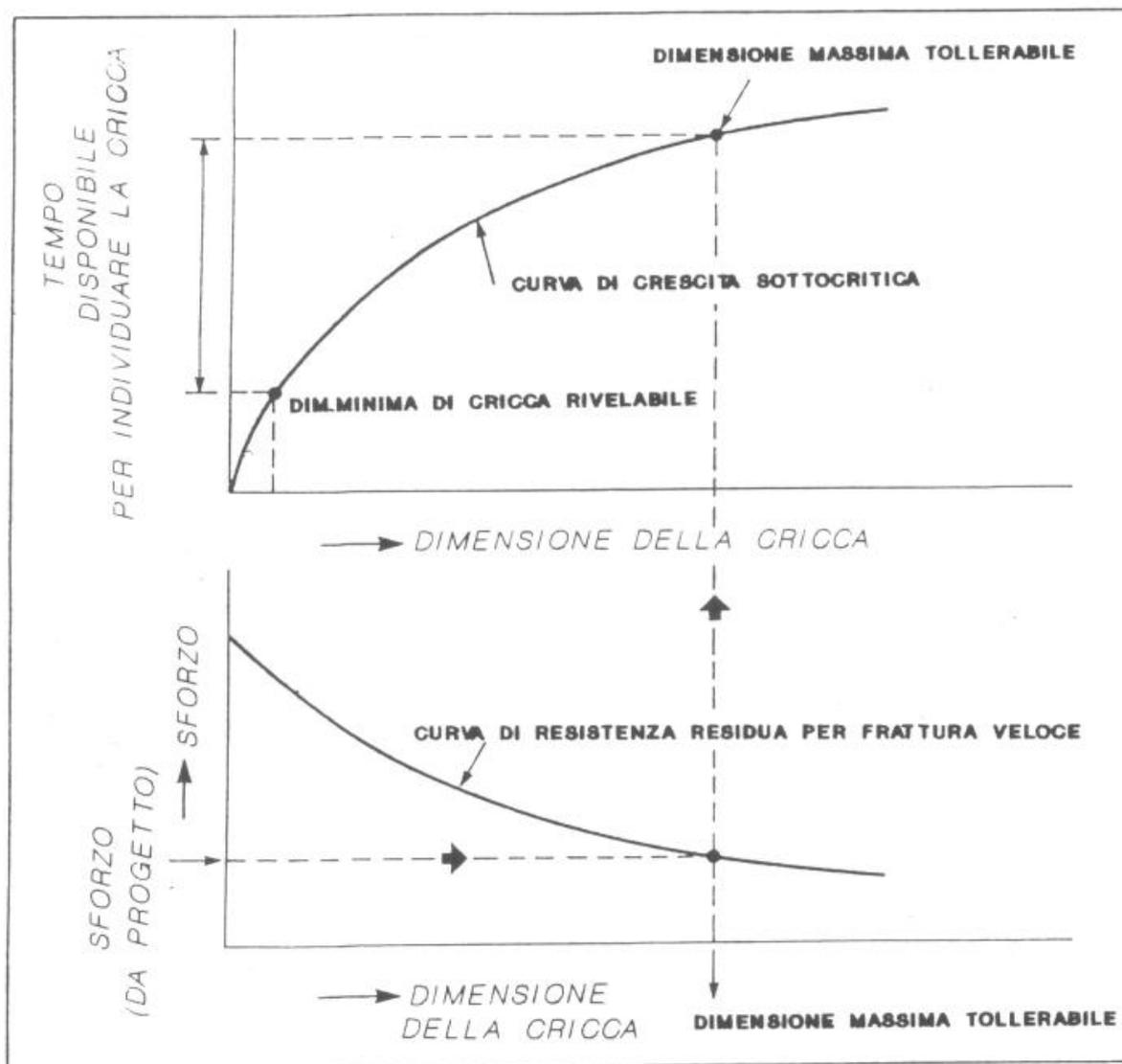


Figura 1: Applicazione ingegneristica della meccanica della frattura.

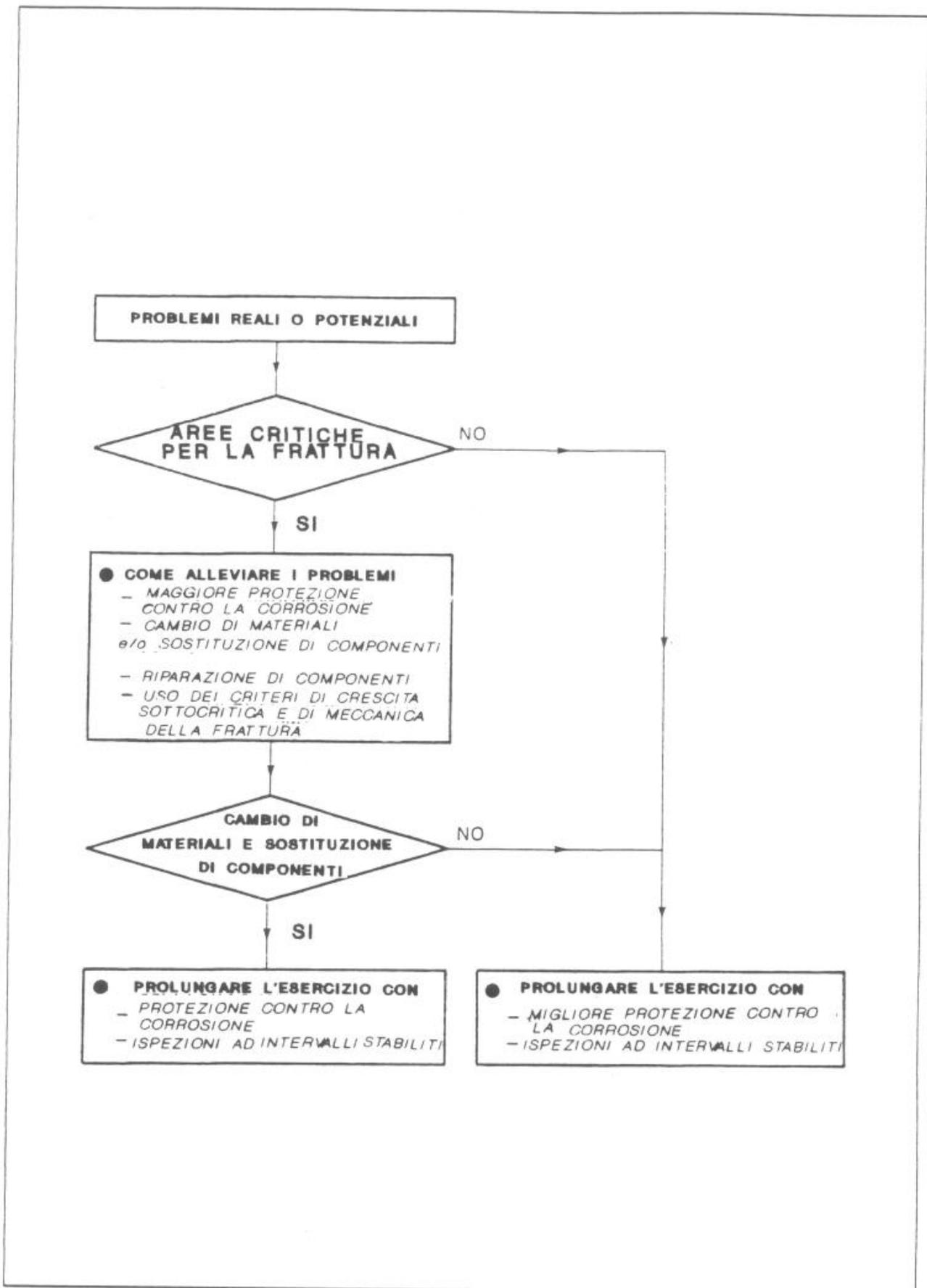


Figura 2: Schema a blocchi per il controllo della frattura (in presenza di EAC) nel caso di componenti in esercizio



Figura 3: Diagramma in cui si indica la necessità di tre categorie di parametri per avere EAC.

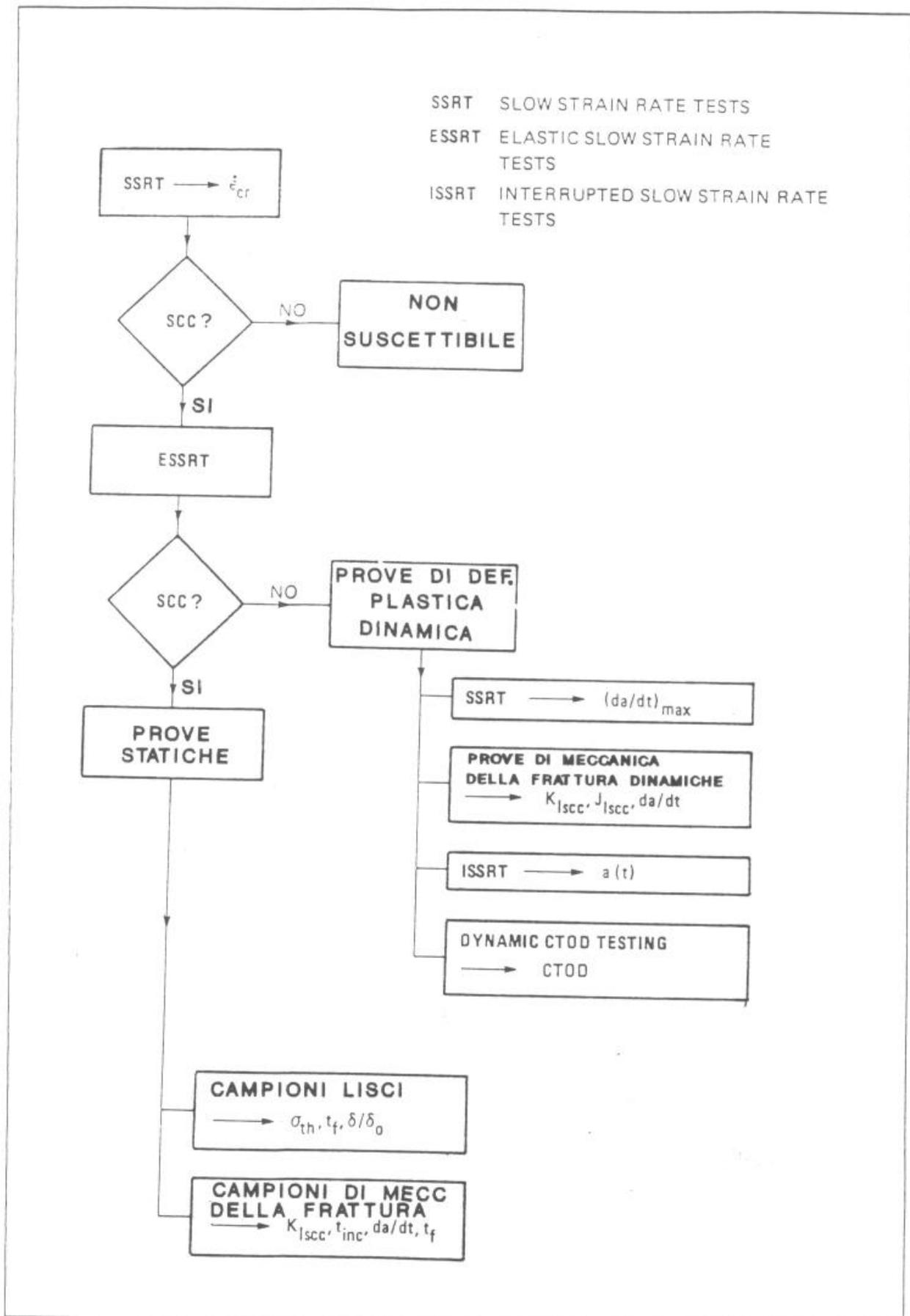


Figura 4: Gerarchia dei metodi di prova per la valutazione del comportamento a EAC.

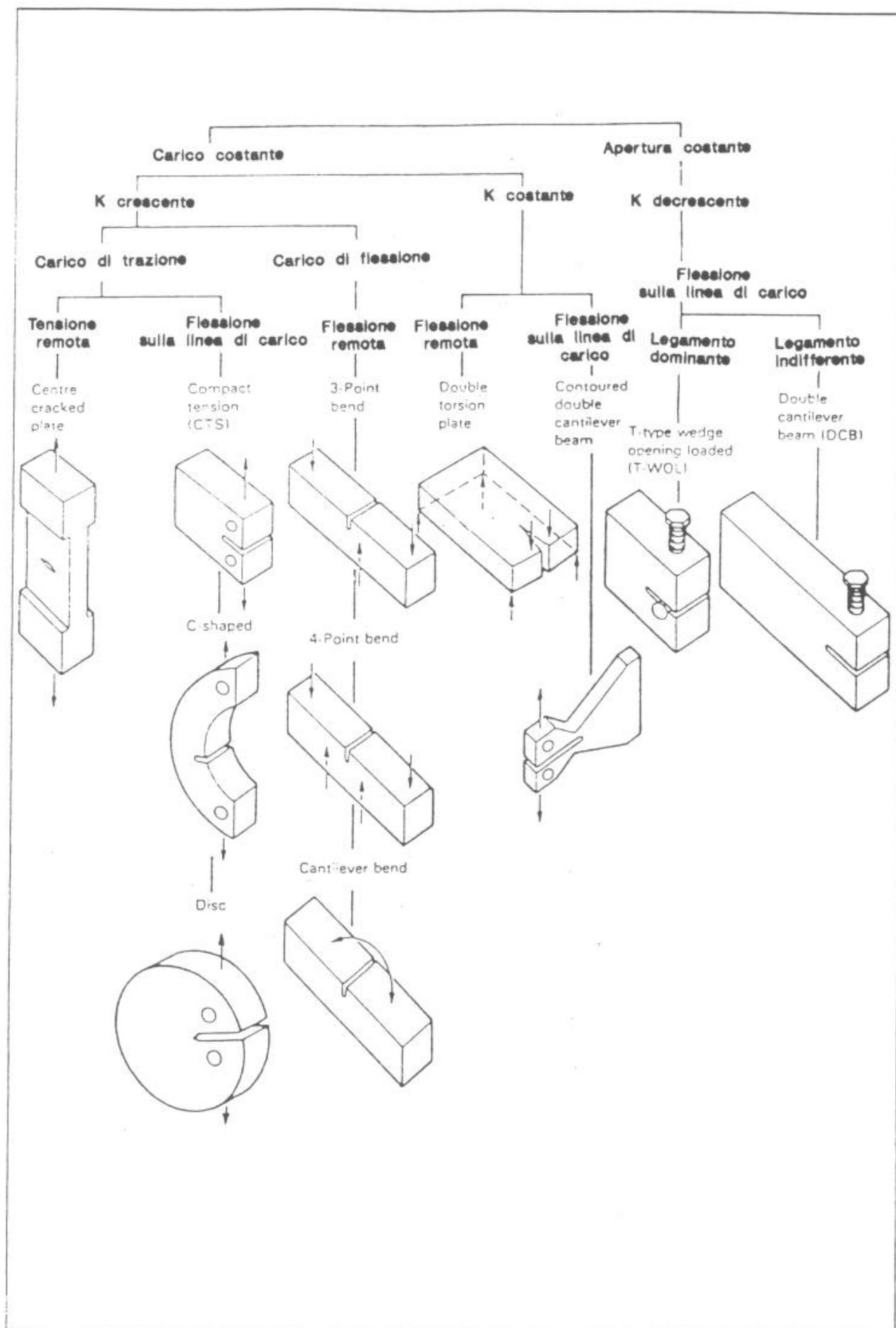


Figura 5: Campioni precriccati per prove di EAC

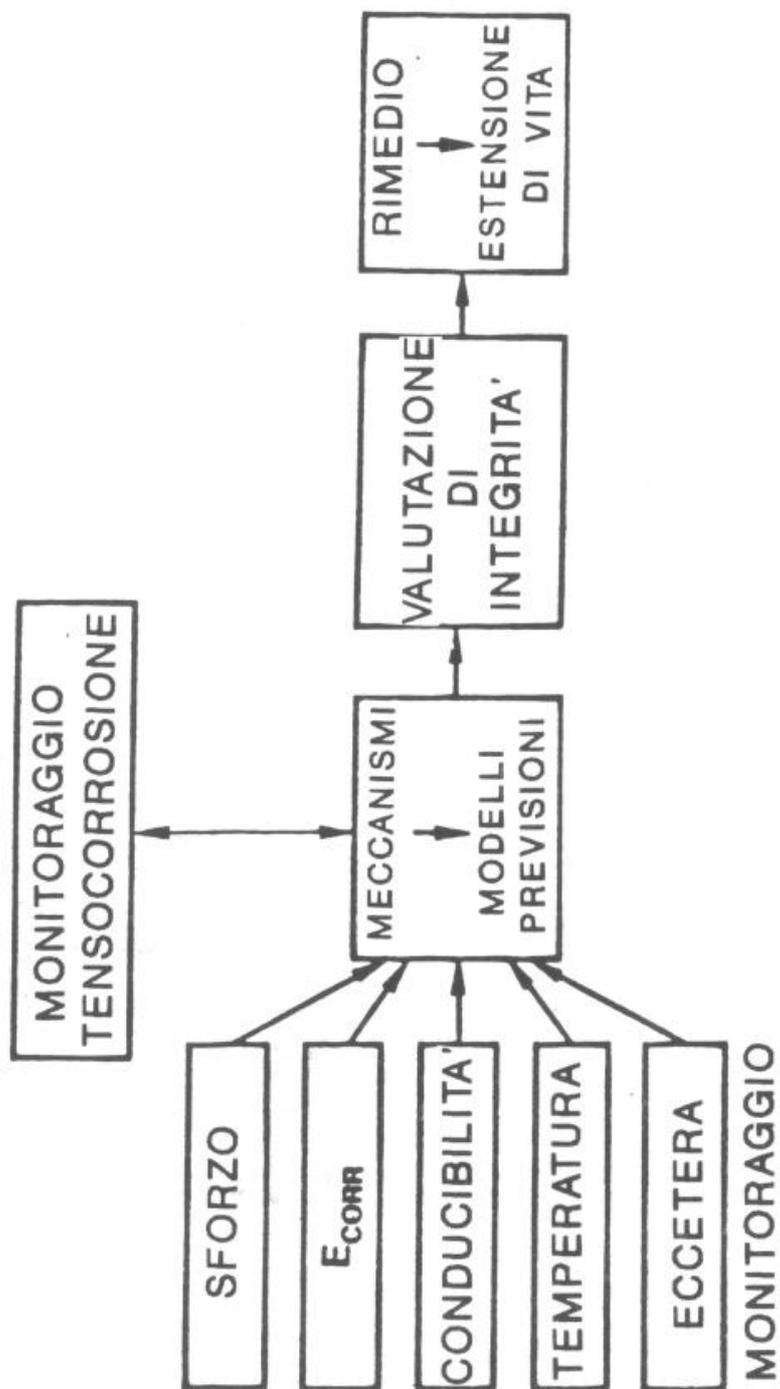


Figura 6: Schema a blocchi del sistema SMART (GE)