

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE COMPONENTES FRENTE A PROCESOS DE FISURACIÓN INDUCIDA POR EL AMBIENTE

J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana y S. Cicero

División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. E.T.S.I. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Avda. de los Castros, s/n. 39005 Santander, España.

E-mail: alvareja@unican.es

Tfno: 942 20 18 19 Fax: 942 20 18 18

RESUMEN

El presente artículo expone las etapas a seguir para la evaluación de la integridad estructural de componentes cuando los mecanismos de deterioro dominantes son corrosión bajo tensión ó corrosión fatiga, globalmente incluidas dentro de la fisuración inducida por ambiente (FIA).

ABSTRACT

A summary is given of the key steps in undertaking an assessment of structural integrity where stress corrosion cracking or corrosion fatigue (collectively environment induced cracking) is the dominant failure mode.

ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS: Fractura de materiales metálicos, diseño frente a fractura.

PALABRAS CLAVE: FAD, Fisuración inducida por ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de componentes y estructuras en ingeniería debe prevenir la aparición de procesos de Corrosión Bajo Tensión (CBT) ó Corrosión Fatiga (CF), ó bien, asegurar un comportamiento en servicio bajo condiciones de seguridad idóneas. Este objetivo puede alcanzarse mediante una adecuada selección de materiales, a través del control del medio agresivo ó minimizando el estado tensional. El diseño basado en el estado tensional consiste en mantener la tensión aplicada por debajo de un umbral de iniciación (σ_{SCC}) o de propagación sostenida (K_{ISCC}) como muestra la Figura 1[1]. Este tipo de diagrama de aplicación al diseño puede obtenerse de un modo similar para condiciones de CF mediante una adecuada selección de rango de tensiones o de factor de intensidad de tensiones.

A pesar del diseño óptimo las fisuras pueden propagar ó hacerlo a velocidad superior a la esperada por varias razones: alteración de las condiciones de servicio para mejorar el proceso, presencia de áreas con soldadura inapropiada, variaciones transitorias de la temperatura ó las condiciones ambientales, cambios superficiales del material (ej: depósito de capa oxidante) ó envejecimiento; otras veces la utilización del material idóneo para la aplicación no es económicamente viable ó las predicciones realizadas en función los ensayos de verificación de propiedades no son realistas, etc. Por todo ello es necesario un procedimiento de actuación, para evaluar el riesgo de fisuración en servicio ó analizar las condiciones de fallo, cuando las fisuras son

detectadas. Este marco en el que se incluye la propuesta de European Fitness for Service Network (FITNET) que trata de proporcionar una guía de actuación sencilla frente a este tipo de procesos. Uno de sus capítulos se ocupa de los fenómenos de Fisuración Inducida por el ambiente (FIA). A continuación se presentan las características principales de dicho procedimiento.

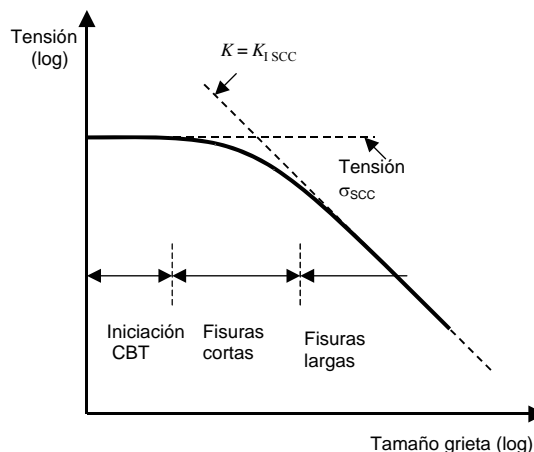


Figura 1. Esquema de la curva de Kitigawa-Takahashi, modificada para CBT, mostrando la región límite (línea gruesa) por debajo de la que las fisuras no propagan.

2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

2.1 Definición de la naturaleza de las fisuras

La primera etapa consiste en la caracterización completa de la fisura en términos de tamaño, forma y localización en relación con concentradores de tensión, áreas de soldadura y otro tipo de singularidades. En caso de presencia de varias fisuras debe evaluarse su densidad y el espacio entre las mismas con vistas a posibles interacciones presentes o inducidas durante la etapa de propagación.

2.2 Identificación de causas de la fisuración

La presencia de grietas debe asociarse a algún proceso mecánico concreto p.e.: corrosión-fatiga, corrosión bajo tensión, etc. Esta tarea no siempre resulta sencilla, a menos que las condiciones de servicio permitan discriminar alguna de las variables, como puede ser la ausencia de tensiones cíclicas con el tiempo. La identificación de mecanismos de CBT como causantes de un proceso de fisuración puede, en algunos casos, como ocurre la presencia de fisuras con ramificación, realizarse mediante inspección visual, pero en la mayor parte de los casos la experiencia previa y un examen exhaustivo son insustituibles. La presencia de tensiones cíclicas potencia la posibilidad de que el mecanismo de propagación sea corrosión fatiga. En este caso, la forma de la onda de tensión juega un papel dominante en ambientes agresivos, disminuyendo su efecto a medida que aumenta la frecuencia.

2.3 Determinación de las condiciones de servicio

Las condiciones de servicio que deben ser definidas incluyen estado tensional y ambiental. En el primer caso es necesario asumir o hacer hipótesis razonables sobre las tensiones de trabajo en la estructura, incluyendo las que aparecen durante las operaciones normales de funcionamiento (principalmente estáticas o cíclicas e carácter aleatorio), tensiones transitorias asociadas a de arranque/parada en componentes, las de tipo residual asociadas a la presencia de soldaduras ó las inducidas por el proceso de laminación y la presencia de tensiones multiaxiales. Entre todas, las tensiones de tipo transitorio resultan ser las más críticas en el proceso de iniciación y propagación de fisuras, siendo, por otro lado, las que presentan una caracterización más problemática en ensayos de laboratorio.

La definición de las condiciones ambientales puede ser un objetivo aún más desafiante. Si bien las condiciones ambientales de servicio resultan normalmente bien conocidas y caracterizadas, estas pueden variar localmente debido a cambios en la naturaleza, concentración o temperatura del medio, provocando una fuerza inductora del proceso de fisuración diferente a la calculada. Factores como el cambio en la concentración de iones, procedentes de procesos de corrosión locales, que son especialmente activos en procesos de

intercambio de calor a altas temperaturas, representan un elemento crítico en la iniciación de procesos de CBT. Otros factores a considerar son la variación de temperaturas, la presencia de oxígeno, etc. La correcta evaluación del medio requiere un análisis histórico de la evolución del mismo.

2.4 Definición de las propiedades los materiales

La primera etapa consiste en asegurar si el material actualmente existente coincide con el definido en la etapa de diseño. De igual modo debe comprobarse la orientación microestructural del material en relación con las tensiones principales aplicadas. Una característica singular de los materiales procedentes de laminación y con estructura de grano alargada es la asimetría de comportamiento frente a procesos de CBT en direcciones longitudinal y transversal.

2.4.1 Acabado superficial y trabajo en frío

En los ensayos en laboratorio las piezas presentan, normalmente, un buen acabado superficial. En servicio, los materiales no presentan la misma calidad superficial al ser suministrados tal como finalizan el proceso de laminación en frío. Debido a este factor aparecen tensiones superficiales, capas deformadas, zonas endurecidas locales, e incluso áreas con cambios de fase (P.E: austenita retenida a martensita). Por estas razones, la fisuración por procesos de CBT en servicio no siempre puede reproducirse correctamente por medio de ensayos en laboratorio, a menos que seamos especialmente cuidadosos con los detalles.

2.4.2 Soldaduras

El aspecto más importante a tener en cuenta en relación con la presencia de soldaduras es la aparición de zonas con tensiones residuales junto con cambios en la microestructura y en las propiedades mecánicas, especialmente la dureza, que conllevan comportamientos singulares a escala local frente a CBT. La problemática de las soldaduras en relación con cambios microestructurales y de comportamiento mecánico puede tener su origen en la propia cualificación de los procesos de soldadura, un aporte térmico demasiado elevado, una selección de materiales de aportación que produzca efectos de fragilización en borde de grano ó precipitación de fases pueden ser aspectos críticos en el comportamiento posterior en servicio. Todos estos factores no son siempre posibles de evaluar in-situ pero deben tenerse en cuenta a la hora de realizar ensayos de caracterización y aplicar las técnicas de integridad estructural.

2.4.3 Daño térmico y por radiación

Los materiales sometidos a efectos de altas temperaturas durante periodos de tiempo largos pueden presentar fenómenos de envejecimiento; los cambios microestructurales y micromecánicos asociados pueden, a menudo, modificar el comportamiento frente a procesos de CBT.

El daño por radiación asociado a aplicaciones de la industria nuclear conlleva un endurecimiento de los aceros y en algunos casos, en aceros austeníticos, una forma de fragilización asociada a la pérdida de cromo en borde de grano, que no implica la formación de carburos.

Además del efecto fragilizador descrito, la radiación y el envejecimiento térmico provocan la reducción de la tenacidad y, por tanto, del tamaño de fisura crítica que ocasiona la rotura inestable.

2.5 Recopilación de datos para evaluación de integridad frente a CBT

Una vez identificada la Corrosión Bajo tensión como mecanismo causante de la presencia de fisuras, es necesario obtener toda la información disponible sobre el comportamiento en CBT del material estudiado, especialmente el factor de intensidad de tensiones umbral y la velocidad de propagación.

2.5.1 Determinación de K_{ISCC}

Cuando la longitud de fisura es compatible con la aplicación de mecánica de la fractura, el factor de intensidad de tensiones umbral en CBT, K_{ISCC} , puede definirse. La Figura 2 presenta el comportamiento típico con fisuras largas.

Dicho factor no debe considerarse como una propiedad mecánica intrínseca del material debido a que presenta una fuerte dependencia de las condiciones mecánicas así como del ambiente. Los ensayos de determinación de K_{ISCC} se encuentran bien definidos pero su utilidad esta limitada a estructuras sujetas a cargas puramente estáticas y es sobradamente conocido el mismo disminuye en presencia de estados tensionales dinámicos. La norma ISO 7539 Part 6 [3] presenta la metodología de obtención de los valores de K_{ISCC} en condiciones estáticas y en la ISO 7539 Part 9 [4] los mismos pueden ser determinados en ensayos bajo condiciones de carga o desplazamiento crecientes.

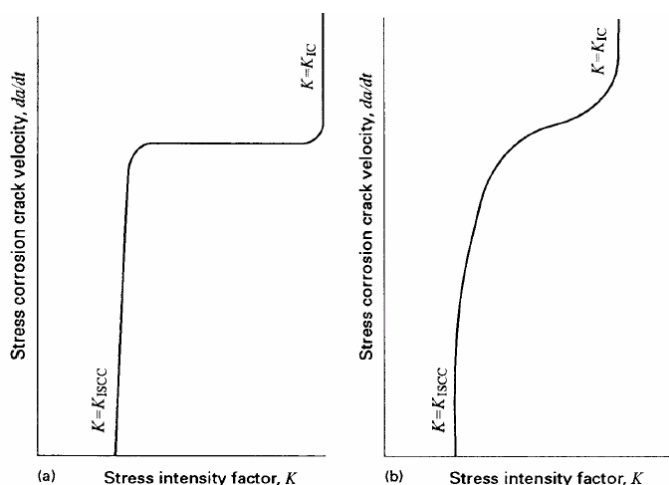


Figura 2. Comportamiento típico de materiales metálicos frente a procesos de CBT [2]

2.5.2 Determinación de la velocidad de crecimiento de fisuras

La velocidad de crecimiento de fisuras en CBT sobre probetas prefisuradas está establecida en la norma ISO 7539 Part 6. En la misma se describe el método empleado para determinar el parámetro da/dt, en función del factor de intensidad de tensiones K tal como representa la Figura 2. Debe considerarse más eficiente obtener el valor de velocidad de propagación en condiciones relevantes desde un punto de vista práctico y a partir del mismo definir una ley de propagación adecuada. Por ejemplo:

$$da/dt = C(K_I)^n \quad K_{ISCC} \leq K \leq K_c$$

es adecuada siendo C y n los parámetros de ajuste y K_c la tenacidad a fractura en condiciones dinámicas. A veces, n se considera que toma el valor cero en materiales que presentan una curva tipo “plateau”.

2.6 Recopilación de datos para evaluación de integridad frente a Corrosión-Fatiga

2.6.1 Determinación de ΔK_{th}

La obtención del factor de intensidad de tensiones umbral en corrosión fatiga (ΔK_{th}) debe tener en cuenta la influencia de la relación de tensiones y el tamaño de fisura. Es bien conocido que en presencia de fisuras cortas puede producirse propagación con valores de ΔK significativamente inferiores a ΔK_{th} debido a que este ha sido determinado a partir de fisuras largas aplicando la MFEL, que en estas condiciones no resulta adecuada (Figura 1). El valor ΔK_{th} tiende a aumentar con la relación de tensiones ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) debido a la pérdida de efectividad del cierre de grieta. Por ello, la consideración de valor umbral obtenido con valores de R elevados resulta ser una hipótesis sensiblemente conservadora.

La obtención de unas previsiones fiables de comportamiento en servicio pasa por una simulación adecuada de las condiciones de trabajo en términos de tensiones, ambiente, frecuencias, forma de onda y tiempo de ensayo; esto último es particularmente importante en los casos de depósito de productos de corrosión en la fisura. Las normas ISO sobre corrosión fatiga ofrecen una guía de uso idónea para la obtención de ΔK_{th} [5].

2.6.2 Determinación de la velocidad de crecimiento de fisuras en procesos de corrosión fatiga

La obtención de la velocidad de crecimiento debe basarse en las normas ISO [5]. La forma de las curvas de crecimiento no puede establecerse de forma general. La Figura 3 presenta algunos ejemplos de comportamiento en condiciones de amplitud de onda de constante.

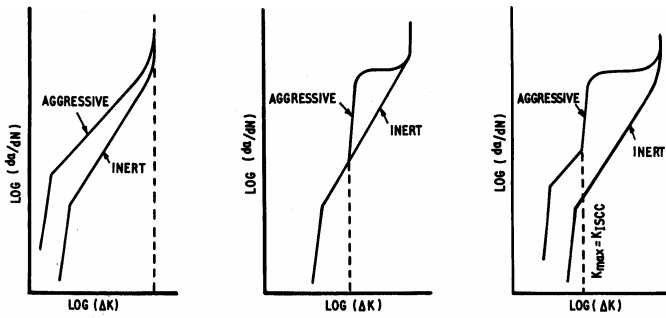


Figura 3. Tipos básicos de comportamiento en corrosión fatiga (I.M. Austen E.F. Walker [6])

La zona de comienzo de propagación acelerada queda condicionado por el factor $K_{max} = K_{ISCC}$, si bien este valor no es necesariamente el factor de intensidad de tensiones umbral en condiciones estáticas. La obtención de una ley de propagación en condiciones de corrosión fatiga debe basarse en ajustes a partir de datos empiricos, si bien, a menudo toma la siguiente forma:

$$da/dN = A(\Delta K)^m$$

Siendo da/dN la velocidad de crecimiento de fisura y A y m los parámetros de ajuste.

2.7 Determinación de la integridad estructural

El análisis de componentes y estructuras que contienen fisuras crecientes requiere cierto grado de especialización y experiencia a causa de la complejidad inherente del mecanismo de avance de fisura. El análisis incluye el uso de una caracterización de la fractura e integración numérica de una ley de crecimiento de fisura.

Paso 1 – Realización de una caracterización de fractura para el tamaño inicial de fisura, basado en el valor detectado medio o hasta un valor máximo para reflejar la incertidumbre de la medida. Si se demuestra que el componente es aceptable, es decir, se encuentra en la parte interna del límite en el diagrama de caracterización de fractura (FAD) de la Figura 4 y, donde sea factible, la profundidad de la fisura es pequeña comparada con el grosor de la pieza, entonces se debe considerar tomar medidas correctoras para evitar el posterior crecimiento de la fisura. Esas medidas correctoras deben tratar de conseguir la parada de fisura, de modo que $K < K_{ISCC}$, bien sea a través de la reducción de la tensión o modificando el ambiente o la temperatura.

Paso 2 – Si las medidas correctoras efectivas no se pueden aplicar y/o se puede tolerar un crecimiento de fisura subcrítica lento, entonces se debe seguir lo indicado en las Secciones 2.1-2.4 para caracterizar completamente la naturaleza de la fisura y las

condiciones de servicio en que se encuentra. Se establecerá si hay un crecimiento de fisura para el material y ambiente de servicio considerados, para en ese caso realizar un análisis de crecimiento hasta fractura. Si no puede determinarse, donde sea aplicable, se ha de realizar un análisis de debilitamiento antes de rotura (leak before break, LBB) para determinar si existe un tamaño máximo de fisura aceptable.

Paso 3 – Cálculo de la tensión en el defecto, incluyendo cualquier componente dinámico y basándose en las condiciones de servicio futuras. En estos cálculos se ha de considerar todas las condiciones de trabajo, incluyendo normales de servicio, de arranque, extremas o de parada.

Paso 4 – Determinar la evolución del tamaño de fisura basándose en el tamaño de defecto previo, el valor de K o ΔK y las leyes de crecimiento de fisura. Si un defecto superficial está siendo evaluado, la profundidad de la fisura se incrementa en función del factor de intensidad de tensiones en el fondo de la fisura y su longitud se incrementa en función del factor de intensidad de tensiones en la superficie. Para fisuras de corrosión-fatiga se requiere un cálculo numérico ciclo por ciclo de la extensión de la fisura, considerando la frecuencia de carga, el cociente de tensiones y los efectos de cierre.

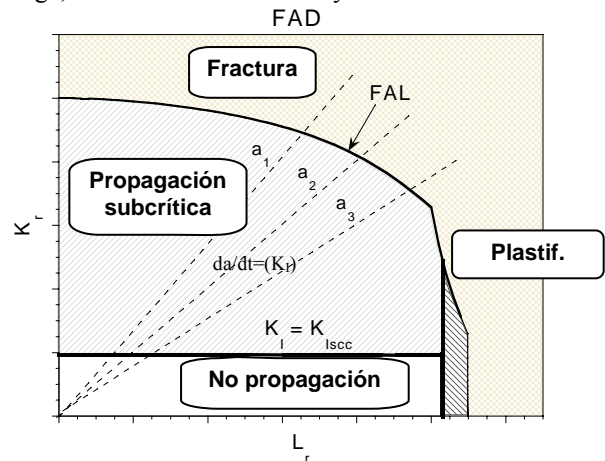


Figura 4. Diagrama de fallo FAD [7,8].

Paso 5 – Determinar el tiempo o número de ciclos de tensión para que el tamaño de fisura actual (a_0, c_0) alcance el límite de tamaño de defecto establecidos por los criterios FAD o LBB. El componente es aceptable para continuar operando si: el tiempo o número de ciclos necesarios para alcanzar el tamaño de defecto límite, incluyendo un margen de seguridad apropiado, es mayor que el tiempo de operación previsto; el crecimiento de fisura es monitorizado en línea o durante las paradas, cuando sea posible, por una técnica validada; la velocidad observada de crecimiento de fisura es menor que la usada en la predicción de vida remanente según los resultados de una inspección en línea o durante paradas; las condiciones extremas en cargas o severidad ambiental son evitables o están

consideradas en el análisis. Si la profundidad del tamaño de defecto límite es reclasificada como una fisura pasante, las condiciones aceptables para un criterio LBB deben ser satisfechas. En la próxima inspección, se establecerá la velocidad de crecimiento de fisura real y se reevaluarán las nuevas condiciones del defecto para los procedimientos de esta sección. De forma alternativa, se reparará o reemplazará el componente o se aplicarán medidas mitigadoras.

Un esquema del proceso se muestra en el cuadro de la Figura 5.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen agradecidamente las contribuciones de los miembros de FITNET TN y la financiación de la Comisión Europea al FITNET

REFERENCIAS

- [1] A. Turnbull, R. W. Koers, F. Gutiérrez-Solana and J. A. Alvarez; “Environmental induced cracking-a Fitness for Service perspective”, Proceedings of OMAE 2005.
- [2] BSI BS7910, 1999, “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”.
- [3] ISO 7539 Part 6, 1998, “Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement”, International Standards Organisation, Geneva.
- [4] ISO 7539 Part 9, 1998, “Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under rising load or rising displacement”, International Standards Organisation, Geneva.
- [5] ISO 11782-2, 1998, “Corrosion of Metal and Alloys – Corrosion Fatigue Testing – Part 2: Crack Propagation Testing using Pre-cracked Specimens, International Standards Organisation”, Geneva.
- [6] I.M. Austen and E.F. Walker, in “Proceedings of The Influence of the Environment on Fatigue”, Institute of Mechanical Engineers, London, 1997, pp 1-10.
- [7] J.A. Alvarez and F. Gutiérrez-Solana, “A elastic-plastic fracture mechanics based methodology to characterize cracking behaviour and its application to environmental assisted processes”, Nuclear Engineering and Design, 1999, pp 185-202.
- [8] FITNET, Fitnet for Service Procedure, Draft Working Document, September 2005.

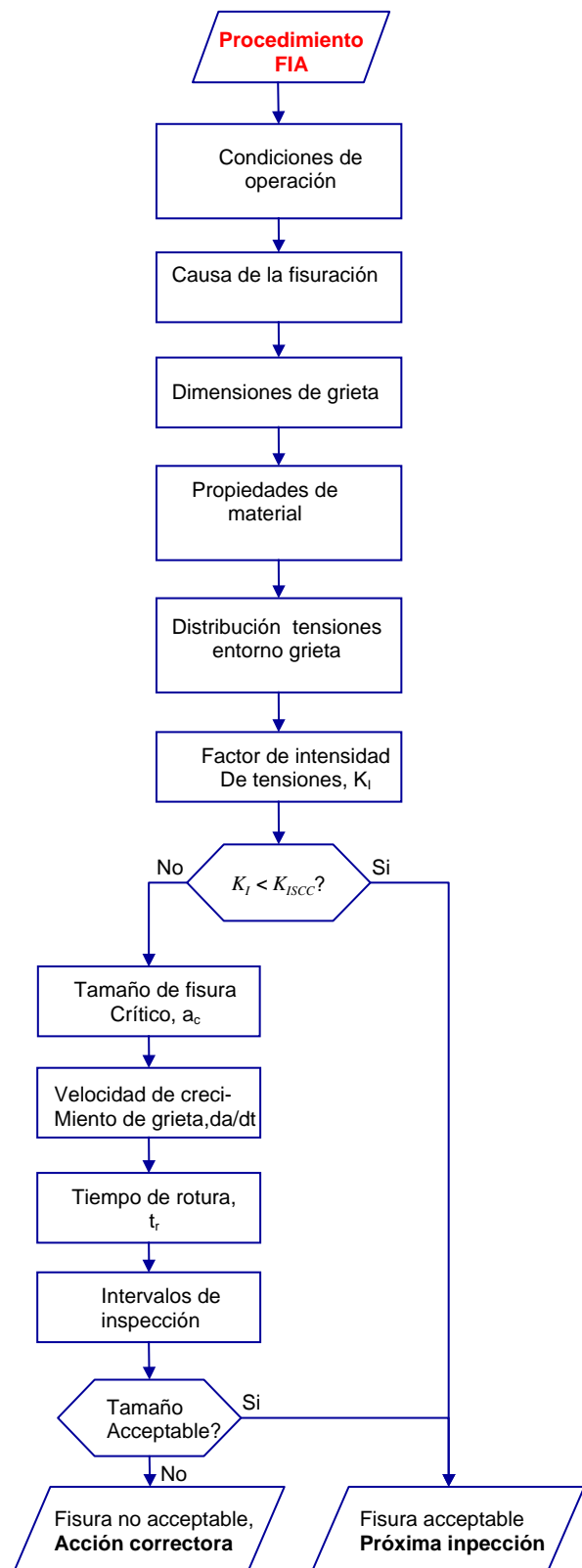


Figura 5. Diagrama de flujo de acciones en procesos de CBT