

Aproximación a la ingeniería forense mediante técnicas numérico-experimentales en el caso de impacto en una tubería

Lluís Gil y Marco A. Pérez¹

RESUMEN

La ingeniería forense en el ámbito mecánico comprende los trabajos de investigación acerca de siniestros donde aparecen roturas de elementos estructurales. La aproximación forense busca un escenario inicial plausible y un relato consistente de los hechos que derive en el resultado final que se observa en el siniestro. Durante las labores de investigación forense se necesitan ensayos de laboratorio sobre los materiales y simulaciones para comprobar las hipótesis formuladas. En este trabajo los conceptos de ingeniería forense se aplican a un siniestro donde se ha producido un impacto en una tubería. A partir de las evidencias se realizan ensayos en los materiales donde se prueba la pérdida de capacidad resistente de los materiales. También se ensaya a impacto para averiguar el umbral de penetración por impacto. Finalmente, la simulación numérica complementa la parte experimental aportando el relato de los hechos.

Palabras clave: Ingeniería forense, ensayos de impacto, simulación numérica.

¹ Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales. Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTech ETSEIAT, C/ Colom 11, 08222, Terrassa, España. E-mail: lluis.gil@upc.edu; marco.antonio.perez@upc.edu

1 Introducción

En el mundo de la ingeniería no existe la perfección, así como no existe en el mundo físico. Las idealizaciones en las fases de diseño y cálculo son aproximaciones necesarias al mundo real para manejar los problemas y llevarlos a una escala humana donde puedan ser resueltos. Así, durante el diseño y cálculo, la fabricación de los materiales, la construcción y ensamblaje de los componentes, el uso y mantenimiento de los sistemas de ingeniería, en todas estas situaciones se producen errores y/o alteraciones, algunas inevitables, que modifican la idea de la materialización de la misma.

Por ello, a veces se producen roturas en los materiales y malfuncionamiento de los sistemas que conducen a accidentes y catástrofes con las correspondientes pérdidas económicas y, en el peor de los casos, pérdida de vidas humanas. En el ámbito forense todo accidente se califica de siniestro ya que se ven involucradas compañías de seguros y a veces, se produce un litigio entre partes.

En este trabajo se va a reflexionar sobre los métodos forenses de investigación de siniestros y cómo se aprovechan las tecnologías numéricas y experimentales para construir escenarios que ayuden a crear un relato creíble de los hechos.

2 La aproximación forense

Cuando se produce un siniestro es importante determinar la secuencia de los hechos y las responsabilidades. Por un doble motivo, en primer lugar porque la detección de errores y malas prácticas redundan en una mejora de la tecnología. Conocer los errores permite la evolución de la ingeniería produciendo nuevas soluciones más robustas y fiables. Asimismo, identificar y entender los errores permite conocer con mayor detalle la fenomenología de los materiales, estructuras, sistemas, etc. En definitiva, determinar los errores permite no volver a repetirlos. Existe numerosa literatura sobre el error y la mejora tecnológica, por ejemplo Chiles, J. R. (2002); Petroski, H (1994); Schlager, N. y Petrosky, H. (1994); Brown, S. (2007). Pero en segundo lugar, los errores suelen tener culpables y en el caso de litigio este aspecto es determinante para atribuir responsabilidades judiciales y compensar en la medida de lo posible las víctimas del siniestro. La responsabilidad del análisis forense es pues grande (Kardon, J. B. 2012), ya que la emisión de un informe que determine responsabilidades influye sobre la decisión del juez. Las responsabilidades pueden ser penalizadas severamente según los códigos legislativos de cada país.

En la zona del siniestro aparecen los resultados y los indicios que permiten hallar una explicación a lo sucedido (Delatte, N. 2010). Por desgracia, no siempre el técnico puede visitar el lugar y muchas veces tiene que trabajar a partir de los datos suministrados por otros. El término indicio hace referencia a elementos de naturaleza diversa que permiten inferir el escenario y el relato de los hechos. Por ejemplo, muestras de corrosión importantes en las armaduras serían un indicio de pérdida de resistencia

de la sección. En el momento que un análisis demuestra que con unas armaduras sanas el elemento estructural no rompía, y en cambio, con una reducción de la sección, como la observada, el elemento no tenía suficiente seguridad, el indicio se convierte en evidencia. El elemento rompió porque la corrosión debilitó la armadura, sería una evidencia. Las pruebas de la evidencia serían materiales (fragmentos con corrosión) y argumentales (cálculos).

El ingeniero forense se enfrenta a un problema complejo del que únicamente tiene la certeza del resultado final pero debe ser capaz de reproducir las situaciones que han llevado hasta dicho resultado final. El ingeniero forense está pues en la casilla de llegada. En este sentido existe una posición diametralmente opuesta a la del ingeniero científico, este último se sitúa en el punto de salida y debe probar su hipótesis. Por lo tanto, el ingeniero forense debe recorrer el camino hacia atrás mientras que el ingeniero científico debe recorrer el camino hacia delante.

Para recorrer dicho camino ambos ingenieros disponen de las mismas herramientas: técnicas experimentales y técnicas numéricas. El ingeniero científico se plantea una hipótesis que debe probar. Para ello prepara un experimento material o numérico y lo ensaya. En función del resultado verifica la hipótesis que formuló al inicio. En el caso de experimentos numéricos el ingeniero simplemente verifica la bondad de su aproximación. Esto le conduce a un aumento del conocimiento y a un resultado de tipo binario: pasa o no pasa; y debe, en el peor de los casos, reformular su experimento numérico o imaginar una nueva hipótesis de partida. En el caso de un experimento material el resultado también le conduce a un aumento del conocimiento. Pero en este caso, el conocimiento tiene mayor potencial, ya que la realidad puede imponer nuevos paradigmas aún no descubiertos. No solo hay un pasa o no pasa, sino que el experimento puede producir nuevos resultados desconcertantes que le lleven a modificar aspectos fundamentales de su aproximación: nuevas teorías. El ingeniero científico conoce el escenario de salida y desconoce el escenario final. El ingeniero científico desea aumentar el conocimiento y descubrir nuevas “verdades”. Es un planteamiento absoluto, generalista y universal. El escenario de trabajo suele ser objetivo ya que no involucra intereses particulares más allá de nuevas realidades científicas o tecnológicas. Además, en este caso, resultados no positivos también son valiosos ya que el descarte contribuye a aumentar el conocimiento.

El ingeniero forense tiene que plantear escenarios iniciales y hacer evolucionar el sistema hasta conseguir el resultado final conocido. Es un problema inverso. El desconocimiento de las situaciones iniciales puede ser absoluto. Este es un punto muy débil ya que nunca se va a saber qué ha pasado realmente. Es posible, a partir de indicios, plantear escenarios plausibles; pero algunos datos pueden ser desconocidos, los testimonios pueden ocultar datos relevantes, etc. Por lo tanto, el ingeniero forense tiene un objetivo más modesto, no pretende descubrir ninguna “verdad” porque sabe que dicha verdad no existe, simplemente se plantea construir una verdad plausible, no absoluta,

no generalista y nada universal. Es una solución relativa al contexto, particular y difícil de extrapolar a otras realidades.

Un riesgo que tiene que asumir el ingeniero forense es que su escenario nunca será objetivo. El ingeniero forense siempre trabaja para una de las partes, en el momento de crear el escenario puede inconscientemente crear un sesgo en favor de su cliente; incluso el perito judicial supuestamente imparcial se verá sometido a determinados condicionantes que lo pueden alejar de la imparcialidad absoluta: noticias de prensa, entrevistas con testimonios, etc. Esta es una realidad a la que tiene que enfrentarse el ingeniero forense y ser consciente de ella para poder mantener la objetividad científica en la medida de lo posible.

Cuando el ingeniero trabaja para una de las partes se limita a construir el escenario plausible de su cliente. Al final termina por construir un escenario a partir de las condiciones iniciales que son más favorables para su cliente. El objetivo no es buscar “la verdad” sino una posible verdad. Des de un punto de vista ético es correcto, siempre que no se mienta por tergiversación (falsear datos) o por omisión (ocultar datos). Hay una clara línea roja entre la defensa de los intereses a partir de la interpretación de los indicios y la falsificación de las pruebas. No se deben obviar los indicios importantes que afecten negativamente al cliente, pero es normal interpretarlos desde una perspectiva más favorable y tratar de dar relevancia a los indicios que eximen de responsabilidad a la parte defendida.

3 El siniestro

A continuación se presenta un caso basado en una situación real. Una tubería de distribución de un fluido a presión presentaba una derivación mediante una tubuladura. Justo encima se situaba una tubería de gas. Por causas desconocidas la tubuladura se desprendió de la tubería de distribución y salió despedida hacia arriba. Durante la ascensión se vio interceptada por la tubería de gas y se produjo un impacto. La tubería de gas se inundó con el vertido del fluido y la actividad de una importante instalación industrial quedó interrumpida con riesgos laborales y pérdidas económicas importantes.

El daño en la posición inferior de la tubería es muy severo. Se observa rotura del material, apertura de labios con grandes deformaciones asociadas a plastificación del material (abolladura), e incluso pérdida de fragmentos. La inclinación de las deformaciones hacia el interior evidencia una acción desde el exterior hacia el interior de la tubería. Por consiguiente, el tipo de fallo en la parte inferior claramente se asocia a la penetración de algún objeto que, desde el exterior, golpea a la tubería, la deforma y penetra. El objeto debe poseer suficiente energía para generar todo el daño observado (fig. 1).



Figura 1: Daños observados en la tubería

Los hechos objetivos son los siguientes: en la zona del siniestro se había abierto una zanja y se estaba trabajando en la tubería de gas, el nivel del terreno llegaba a ras de la tubuladura, la tubería de gas presentaba un agujero importante en la cara inferior en la vertical de la tubuladura y el siniestro sucedió en horas intempestivas, sin que existiera ningún operario trabajando en la zona.

- Cada una de las partes presentaba su visión del siniestro.
La compañía responsable del fluido a presión afirmaba que existió el impacto pero que era imposible que la pieza de la tubuladura realizara dicho nivel de daño. Por lo tanto, el agujero en la tubería de gas era previo (por ello estaban reparando la tubería) y, en todo caso, el fluido pudo haber aumentado el daño pero no era responsable del siniestro. Si la tubería hubiera estado en buen estado no se habría producido ninguna avería.
- La compañía de suministro de gas afirmaba que el impacto perforó y dañó la tubería de gas produciendo la interrupción del servicio. Aceptaban que la presión del fluido pudo aumentar el daño, pero la responsabilidad del siniestro correspondía únicamente a la compañía que suministra el fluido.

Analizando las especificaciones del sistema se observa que la tubuladura debe atravesar la tubería y soldarse por la parte interior (Fig. 2). En este caso la tubuladura se colocó por encima y se sujetó con unas chapas soldadas perimetrales. Esta solución seguramente se improvisó ad hoc durante la instalación del sistema.

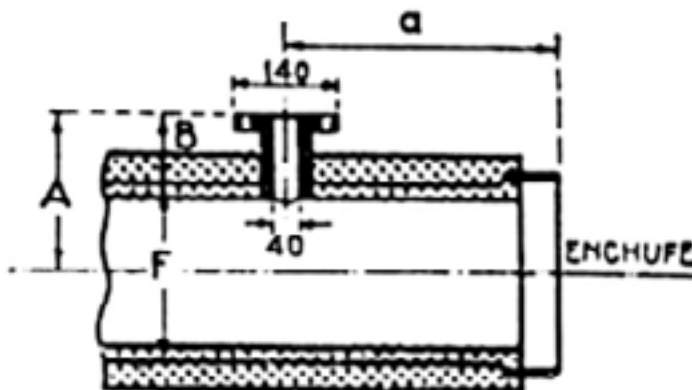


Figura 2: Imagen de las especificaciones en la realización de la tubuladura. Cotas en mm

4 Los objetivos de la investigación

Evidentemente no se dispone de datos ni sobre la tubuladura, ni sobre las actividades reales que se estaban ejecutando en la zanja. Únicamente fragmentos de la soldadura de la tubuladura, la pieza de entronque de la tubuladura y las chapas soldadas, los fragmentos de la tubería de gas y la del fluido.

El objetivo no puede plantearse en términos de encontrar “la verdad”: saber exactamente qué pasó. El objetivo es construir un escenario inicial y un relato plausible del siniestro. Hay que construir una hipótesis de trabajo.

Los trabajos en zanjas son indicios de posibles riesgos sobre las instalaciones, por ejemplo impactos mecánicos de picos y palas. Dicho escenario se descarta porque las dimensiones de la zanja son pequeñas y no permiten la maniobrabilidad de más de un operario y además, sin herramientas. Además a la hora del siniestro nadie estaba operando en la zona. Por lo tanto, el único escenario razonable es el impacto de la tubuladura y no un impacto por acciones mecánicas. Además, la existencia de desprendimiento de la pieza es una evidencia.

Una vez escogido el escenario hay que probar la capacidad de daño de la tubuladura. Para ello es necesario que se produzcan las siguientes condiciones iniciales: suficiente presión en la red (posible sobrepresión), desprendimiento brusco del sistema y capacidad de penetración y abolladura. Se verificó que la presión fue constante y que no existió sobrepresión. Por lo tanto, en el escenario inicial se conocen las condiciones de parte del sistema.

5 El apoyo experimental

Se realizan dos tipos de pruebas experimentales. Unas para verificar que la rotura fue brusca y justificar el desprendimiento e impulso de la pieza y otras pruebas para estimar la capacidad de penetración en la tubería de gas.

El estado de la tubuladura antes del siniestro es fundamental. Esta es una de las condiciones del escenario inicial que presenta incertidumbre. En inspección ocular se observa que existe una corrosión importante en algunas partes de la pieza. Por lo tanto, se procede a recoger muestras de distintas partes de la pieza y de su conexión con la tubería. Los objetivos principales son: evaluar la calidad de la soldadura y la presencia de defectos en su interior, así como el análisis micro-estructural de la propia soldadura y de la zona afectada térmicamente por la soldadura.

En primer lugar se determina la composición de los aceros mediante espectroscopia de emisión. El análisis determina que el tubo de canalización, la pieza de entronque y la chapa externa de soldadura del entronque son materiales diferentes. Dos de ellos son aceros y otro es fundición. Las conexiones entre los materiales facilitan la formación de una pila galvánica entre los materiales y la aparición de los fenómenos de corrosión asociados. Por ello, el estado de degradación es evidente y notable. La diversidad de materiales sería un indicio de corrosión que se ve demostrado por la presencia de óxido y degradación de la pieza.

Asimismo, se realizan radiografías en la zona de soldadura. La valoración radiográfica del cordón de soldadura muestra la presencia de gran cantidad de poros y una falta generalizada de fusión. Además existen profundas picaduras de corrosión en el cuerpo de la pieza desprendida. Todo ello permite determinar que la soldadura se encontraba en muy mal estado.

También se prepararon muestras para un análisis metalográfico (ASTM E3-11 2011). Dicho análisis permite caracterizar los metales de la derivación. En la zona de soldadura, el análisis micro-estructural permite revelar la presencia de diferentes tipos de defectos: micro y macro porosidades en el interior de la soldadura, como resultado de la absorción de gas por parte del cordón de soldadura; inclusiones de escoria en el interior del cordón de soldadura, como resultado de la utilización de condiciones de soldadura incorrectas; finalmente, falta de penetración de la soldadura por insuficiente temperatura o material de aporte, el metal de la soldadura no llegó a fundir correctamente quedando un hueco entre la chapa y el entronque. La superficie de fractura presentaba una clara rotura frágil asociada a un proceso de arrancamiento.

La caracterización mecánica de los materiales implicados en la fractura se llevó a cabo mediante la realización de ensayos de durezas (ASTM E384 - 11e1 2011). Dado que los materiales son diferentes se obtuvo disparidad de resistencias.

De los análisis sobre los materiales se determinó que la zona de la soldadura presentaba una clara pérdida de capacidad portante por efecto de la corrosión, en el propio anillo y en las chapas adyacentes. Esto permite inferir que la rotura fue súbita y de carácter frágil.

El otro aspecto controvertido es la capacidad de penetración de la pieza desprendida en la tubería superior. Que el desprendimiento se produjo y la pieza salió despedida, esto es una evidencia, pero según la energía del sistema el impacto pudo producir daños inapreciables o bien penetrar y abollar la tubería superior. Para eliminar la controversia y demostrar que sí se puede producir penetración y daño, se plantea una campaña experimental siguiendo las pautas de la norma ASTM D7136 (ASTM D7136/D7136M-12 2012), con el objeto de determinar el umbral de energía de impacto necesario para penetrar el material que conforma la tubería de gas. Para ello se realizan una serie de ensayos de impacto en muestras de material de la tubería original y en otras muestras de calidad y grosor equivalente como medición de contraste.

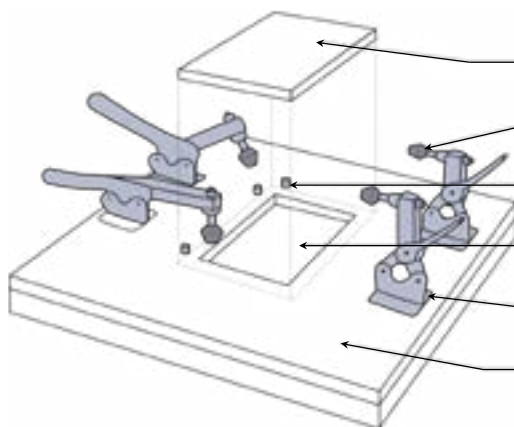


Figura 3: Esquema del dispositivo para el ensayo de impacto (izquierda). Espécimen sujeto y posición del impactador antes de iniciar el ensayo (derecha).

Se dispone de una torre de impacto para realizar los ensayos de impacto. La torre consta de un sistema para realizar el impacto formado por una masa, un sistema de guía, un sistema de fijación del espécimen y un sistema de posicionamiento y lanzamiento del elemento impactador (fig. 3). En los ensayos normativos para certificación de materiales la masa impactadora consiste en un cilindro con una punta redondeada normalizada. Dicha punta es notablemente diferente de la punta del elemento de entronque. La geometría de la punta es muy importante porque en el momento del impacto una punta roma produce un mayor daño por abolladura y disminuye la penetración, mientras que una punta muy afilada aumenta notablemente la capacidad de penetración por un efecto de concentración de tensiones en la zona del impacto (Mitrevski, T. et. al. 2006). Por ello, para poder reproducir el impacto real se mecanizó una punta como reproducción exacta de la llave de paso del entronque. Esta geometría garantiza que en el momento del impacto se reproduzcan fielmente las condiciones del siniestro.

El umbral de energía señalado con una línea discontinua (fig. 4) marca la separación entre los elementos que sufren la penetración (fig. 5) y los que se deforman sin llegar a la penetración. Este umbral se sitúa en este caso entre 157 J y 160 J, por lo tanto se adopta un valor medio de 158,5 J.

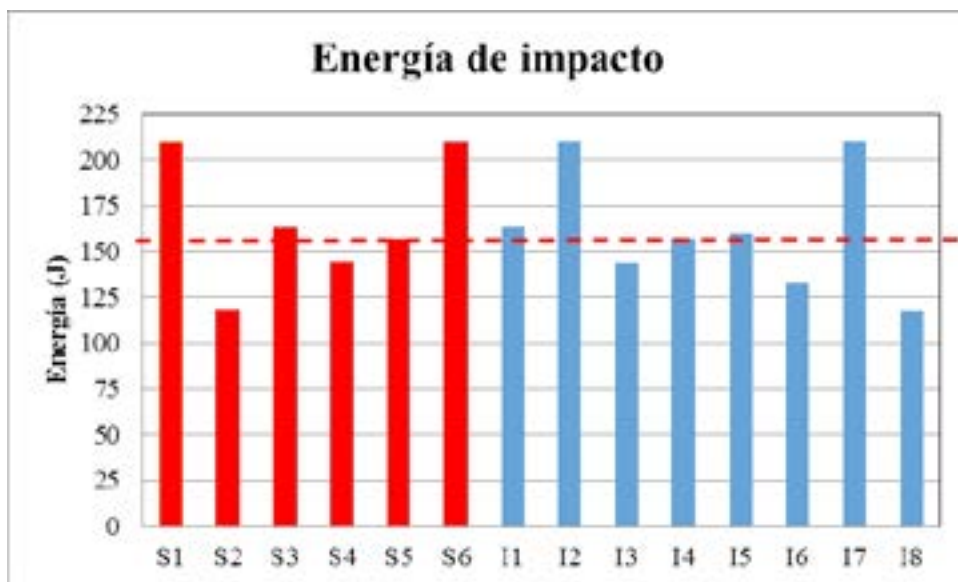


Figura 4: Resultados de los ensayos de impacto con diferentes especímenes



Figura 5: Espécimen S6 después del impacto (210 J)

6 La aproximación numérica

Para reforzar el escenario se utilizan los métodos numéricos para demostrar que la tubuladura tenía capacidad de penetrar y realizar unos daños parecidos a los observados en el siniestro. Cuando un objeto choca con otro se produce una transferencia de energía. Se define impacto como la fuerza impulsiva creada por la colisión de cuerpos en un breve intervalo de tiempo que provoca ondas de tensión que se propagan desde la zona de contacto (Goldsmith, W. 2001). Generalmente los impactos son clasificados según los rangos de velocidad en: impactos a baja, media y alta velocidad (Sjoblom, P.O. et. al. 1988). Sin embargo, no existe una clara transición entre las categorías ni una definición ampliamente aceptada por la comunidad científica.

Muchas veces el tipo de impacto se clasifica de acuerdo con la morfología del daño inducido, especialmente si el daño inducido es la principal preocupación (Pérez, M.A et. al. 2012). De esta manera los impactos a alta velocidad se caracterizan por la penetración completa del espécimen y los impactos a media y baja velocidad, por la deformación plástica inducida. No obstante, los efectos del daño dependerán de las características geométricas del espécimen: para una misma velocidad incidente, pueden suceder deformaciones plásticas o la penetración completa de la muestra dependiendo del espesor y de las propiedades del material.

La energía incidente de un impacto se disipa principalmente en forma de energías calorífica, acústica, de fractura interna del material, de deformación plástica, y/o con la penetración del cuerpo impactado o la fragmentación de uno o ambos cuerpos. Dada la ductilidad de los metales, éstos son capaces de absorber la energía incidente de un impacto de media y baja energía disipándola principalmente en forma de deformación plástica. La deformación plástica induce un daño permanente e irreversible en la estructura, identificable mediante inspección visual, cuyos efectos pueden ser generalmente predichos a partir de los principios de la mecánica de fractura.

La respuesta frente a un impacto transversal a alta velocidad en un metal está dominada por la propagación de ondas de compresión que se generan en la proximidad del punto de contacto y se transmiten a través del espesor a la velocidad del sonido (Robinson, P., y Davies, G. 1992). A tales velocidades el material no dispone de tiempo suficiente para responder y alcanzar un equilibrio, por lo que se originan daños muy localizados en la proximidad del punto de contacto.

Cuando el impacto se realiza a través de una superficie de contacto muy pequeña, por ejemplo cuando el elemento que impacta es punzante. A pesar de que la energía incidente pueda ser menor, la localización del impacto genera una concentración muy alta de tensiones que puede conducir a la destrucción local del material. En este caso la penetración también sería posible sin alcanzar altas velocidades.

Por ello, en el caso que nos ocupa, la geometría punzante de la tubuladura presentaba una alta capacidad de penetración, incluso para baja energía tal y como se demostró en la campaña experimental.

El análisis computacional de una simulación de impacto para tuberías (Corbett, G.G. et. al. 1996) requiere de un método de cálculo que sea capaz de reproducir el fenómeno físico anteriormente descrito. En este estudio se ha empleado un método explícito de integración de las ecuaciones de la mecánica. La principal diferencia de la simulación numérica explícita, con respecto a la implícita, radica en el camino utilizado en la integración del tiempo para realizar el cálculo. Las aplicaciones más usadas para la simulación explícita son las pruebas de caída y los ensayos de impacto y penetración. Por lo tanto, dadas las evidencias del siniestro se llevó a cabo una simulación explícita.

El proceso de la simulación explícita empieza con la elaboración de la malla, a la cual se le asignan las propiedades del material, las sollicitaciones y las condiciones de contorno. A partir de dicha definición se sigue el algoritmo de la fig. 6. El proceso de solución es repetido cíclicamente hasta que el cálculo alcanza el tiempo final especificado.

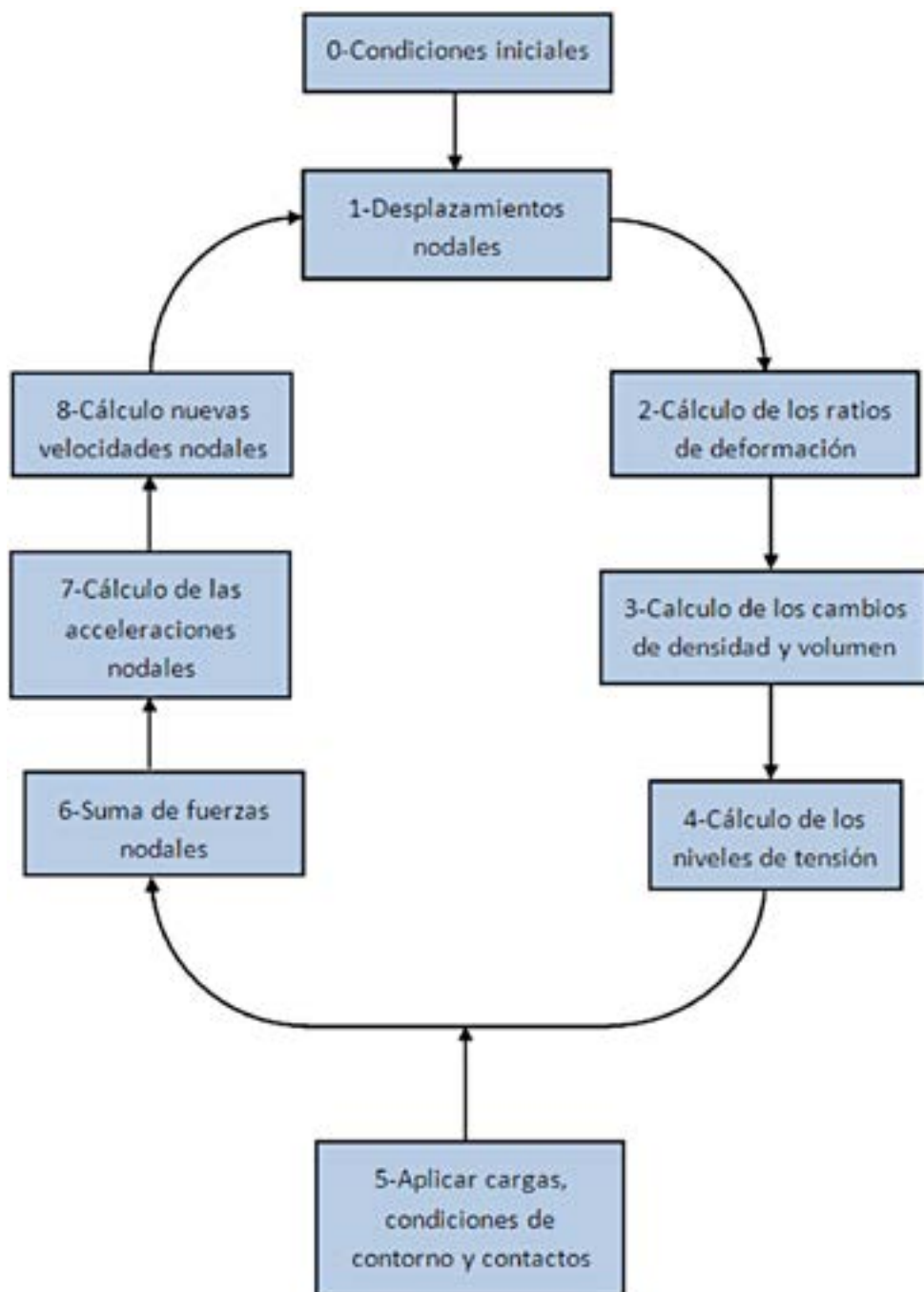


Figura 6: Algoritmo de cálculo para impacto

Las ecuaciones básicas resueltas por un análisis dinámico explícito expresan la conservación de la masa, el momento y la energía en las coordenadas de Lagrange. Estas, junto con las propiedades del material, las condiciones iniciales y las condiciones de contorno, definen la solución completa del problema. Para las formulaciones de Lagrange, la malla se mueve y se distorsiona, por lo que la conservación de la masa se satisface automáticamente. La densidad en cualquier instante se puede determinar a partir del volumen en dicho instante y de su masa inicial. Las ecuaciones diferenciales parciales (ecuación (1)) que expresan la conservación del momento relacionan la aceleración $\ddot{x}_i$ con el tensor de tensiones σ_{ij} , siendo b_i las fuerzas externas por unidad de volumen y ρ la densidad:

$$\rho \ddot{x}_i = b_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Por otra parte, el incremento de energía de deformación por unidad de masa se expresa mediante la ecuación (2), siendo $\dot{\epsilon}_{ij}$ el incremento en el tensor de deformaciones.

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (2)$$

Para cada tiempo y para cada elemento, estas ecuaciones se solucionan explícitamente, basándose en los valores de entrada que provienen del fin de la etapa de tiempo anterior. Sólo la conservación de la masa y del momento se cumple estrictamente en cada paso. Sin embargo, en el planteamiento de la simulación explícita, se debe conservar también la energía. Para ello, se controlan las variaciones de la energía en cada paso para garantizar la conservación de todos los principios físicos fundamentales. El motor de cálculo de la simulación explícita dinámica utiliza un esquema de integración de tiempo diferencial basado en el método de *Leapfrog*. Después de realizar el cálculo de fuerzas en los nodos (como resultado de las tensiones internas, contactos o condiciones de contorno), las aceleraciones nodales ecuación (3) se obtienen dividiendo la fuerza por la masa.

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m_i} + b_i \quad (3)$$

Siendo F_i las fuerzas nodales y m_i la masa del nodo i .

Conociendo las aceleraciones en el tiempo $n - \frac{1}{2}$, las velocidades en el tiempo $n + \frac{1}{2}$ se pueden hallar con la siguiente ecuación (4).

$$\dot{x}_i^{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_i^{n-\frac{1}{2}} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \quad (4)$$

Finalmente, las posiciones se actualizan a tiempo $n+1$ mediante la integración de las velocidades según la ecuación (5):

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Las ventajas de utilizar este método para la integración en el tiempo para problemas no lineales son:

- Las ecuaciones se pueden desacoplar y se puede resolver directamente (explícitamente). No hay necesidad de iteración durante el tiempo de integración.
- Las comprobaciones de convergencia no son necesarias ya que las ecuaciones se desacoplan.
- No se requiere la inversión de la matriz rigidez. Todas las no linealidades (incluyendo el contacto) están incluidas en el vector de fuerza interna.

7 Descripción del modelo de cálculo

Para analizar el efecto del impacto en el extremo inferior de la tubería se estudió un modelo numérico 3D simulando el comportamiento de la tubería de gas frente a impacto con el programa de elementos finitos ANSYS *Explicit Dynamic*. Para ello se representó la tubería y la pieza de la tubuladura que impactó con ella. La discretización se realizó con elementos de tipo *Shell* para la tubería de gas que en el tramo del siniestro estaba conformada en acero de calidad AISI 1008. El material se ha considerado acero con comportamiento elastoplástico, límite elástico de 200 MPa y límite de rotura de 240 MPa. Mientras que el elemento impactador se ha considerado como un sólido rígido; a pesar de ser también de acero, pero al ser másico se ha despreciado su capacidad de deformación. Esto permite simplificar el tiempo de cálculo restando importancia a los efectos sobre la pieza impactadora, ya que el estado final de ésta no era motivo de la investigación.

Durante el proceso de impacto, el criterio de Von Mises se emplea para determinar la entrada del material en régimen plástico. A medida que se produce el contacto y la penetración, las deformaciones plásticas se acumulan hasta llegar al límite del material situado en 0,07. A partir de dicho instante se considera que el material fractura y se permite la separación física de la malla.

Mediante la simulación numérica del impacto, se reprodujo el estado final de la tubería de gas comparando los resultados obtenidos con las imágenes del siniestro, siendo la única variable de entrada la velocidad de impacto. A partir de la velocidad de impacto de la pieza y conocida su masa, se realizó posteriormente un cálculo para determinar la posible presión en la tubería del fluido que permitiera alcanzar dichas velocidades de impacto. Con ello se contrastó la presión necesaria con la presión inicial en el escenario de cálculo. Se realizaron dos modelos de contraste, media tubería y una cuarta parte (Fig. 7).

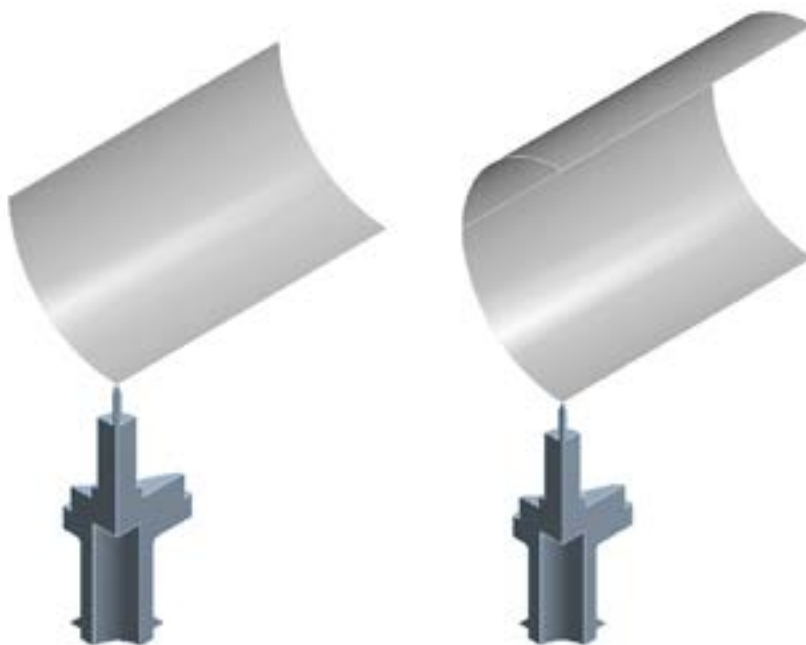


Figura 7: Geometría del impacto en las dos simulaciones

En la elaboración de ambas mallas se utilizaron elementos de tipo *Shell* de 5 nodos para la tubería de gas, con diferentes tamaño de elemento que varían de 5 mm a 1 mm. La pieza se discretizó con elementos tetraédricos cuadráticos de 10 nodos con un tamaño de elemento máximo de 20 mm. Como se observa en la fig. 8, se han refinado las mallas en la zona de impacto para obtener mayor precisión en el análisis.

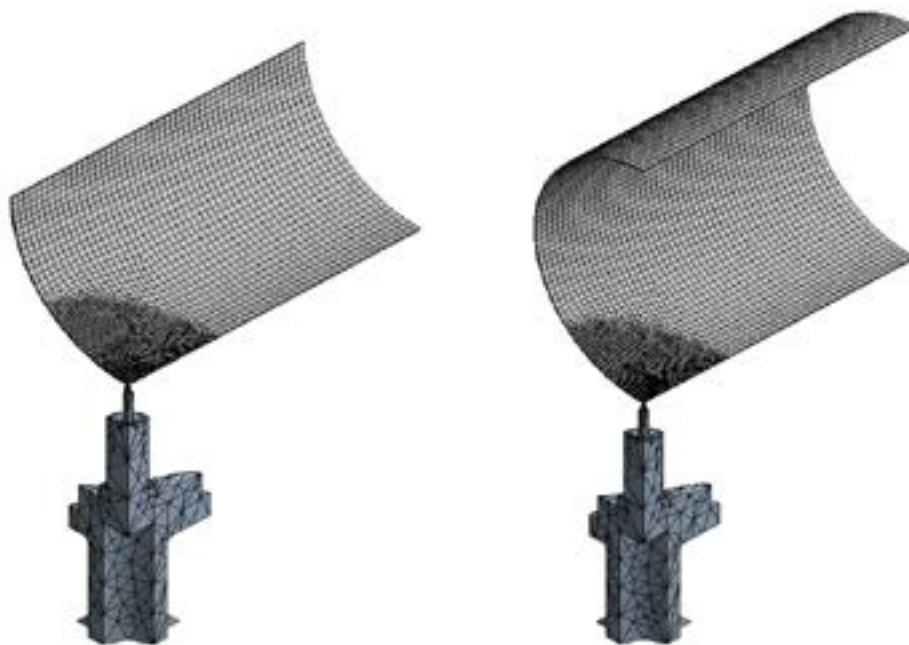


Figura 8: Discretización de las mallas empleadas en ambos modelos.

El primer resultado que se ha obtenido es la cota inferior de energía del elemento de la tubuladura para penetrar en la tubería de gas. En este caso se obtuvo 160 J y una velocidad umbral de 12,8 m/s. Para velocidades inferiores la pieza difícilmente penetra y simplemente genera abolladura. Para velocidades superiores la penetración es progresivamente más violenta. Para la velocidad umbral inferior los daños que se visualizan en la simulación son claramente inferiores a los detectados en la inspección del siniestro. Es necesario llegar a una energía de 310 J y una velocidad de 17,6 m/s para reproducir un alcance del daño similar al observado en el siniestro. Estos valores son lógicamente superiores a los de la campaña experimental para asegurar el alcance de los daños reales.

En la fig. 9 se muestran diferentes perspectivas del estado final de la simulación con dicha velocidad. La imagen ha sido reconstruida a partir de las opciones de simetría del programa para observar la geometría completa. Se puede apreciar como la pieza penetra en la tubería de gas provocando una perforación en la zona central del impacto y una gran abolladura alrededor de la zona afectada.

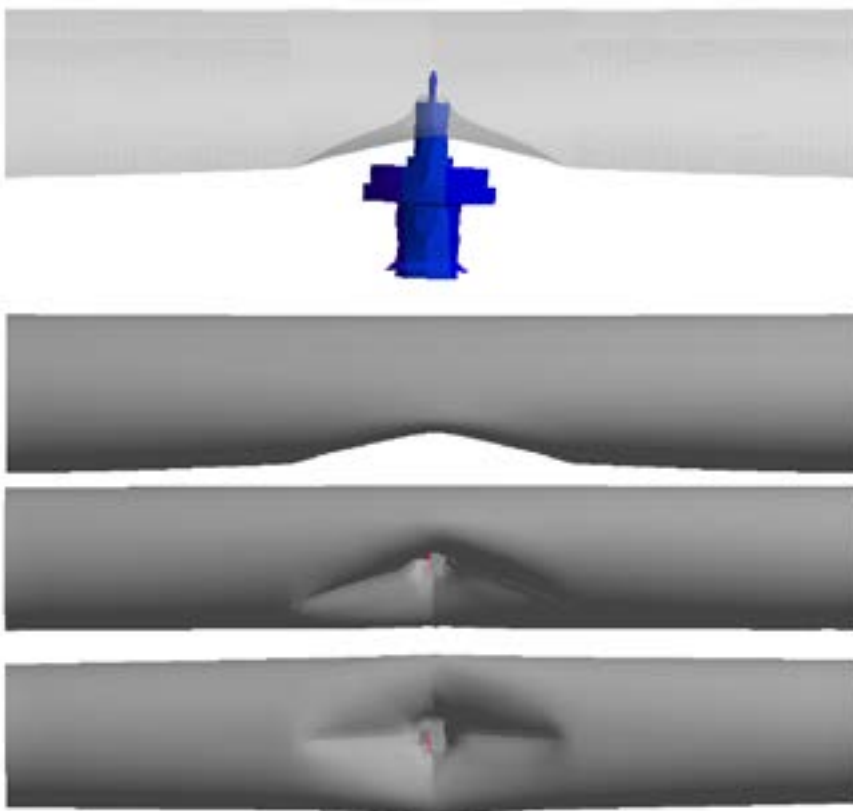


Figura 9: Estado final del proceso de impacto a una velocidad de entrada de 17,6 m/s.

Si se compara el resultado de la simulación con el espécimen de tubería siniestrada, se puede observar que la magnitud del daño es parecida. En la fig. 10 se muestra la comparativa del daño a nivel longitudinal, siendo éste de unos 300 mm de longitud.

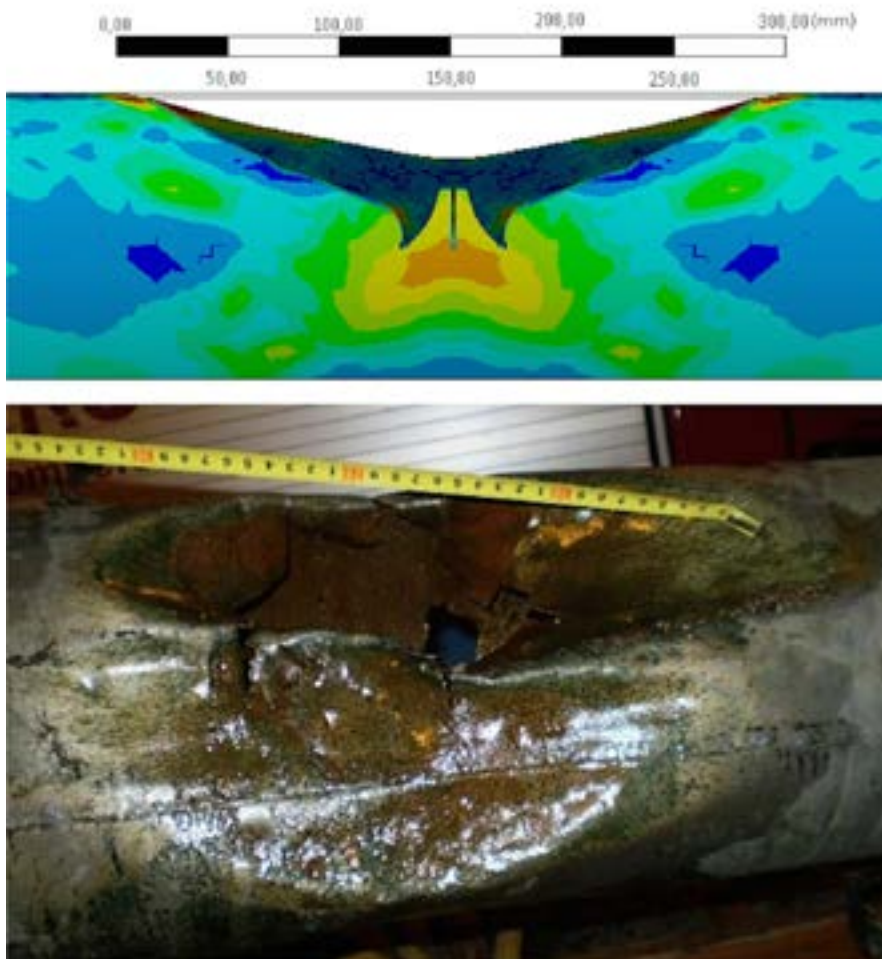


Figura 10: Comparación del estado final de la simulación con la tubería siniestrada.

A nivel transversal la tubería queda totalmente afectada (fig. 11) en unas dimensiones similares a la realidad observada.

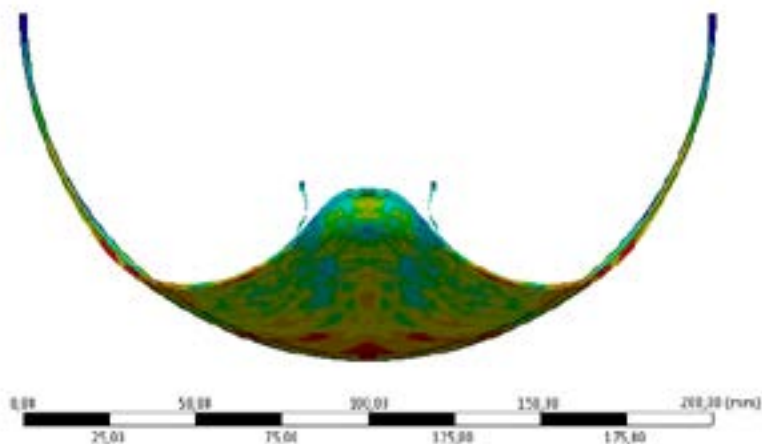
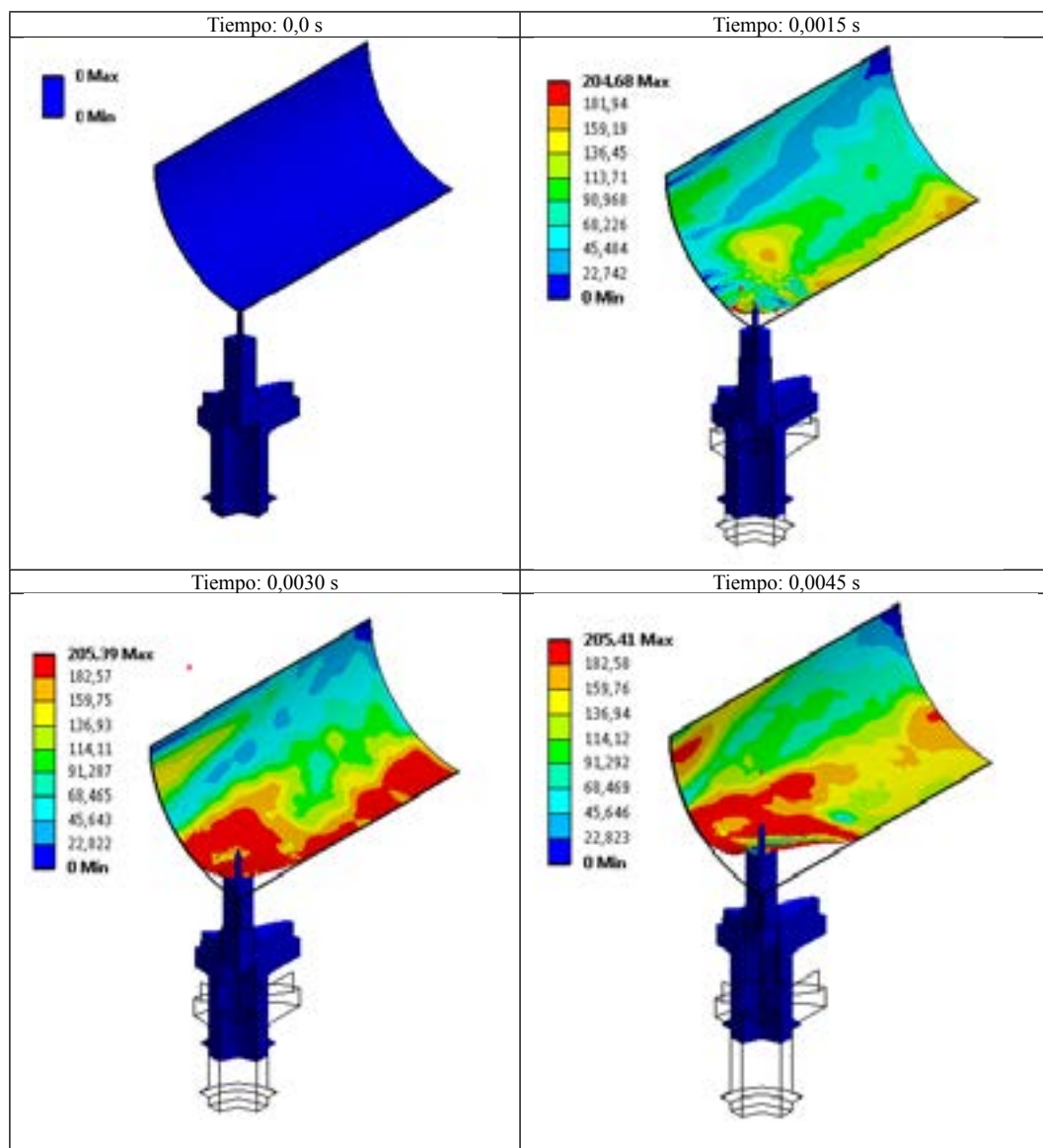


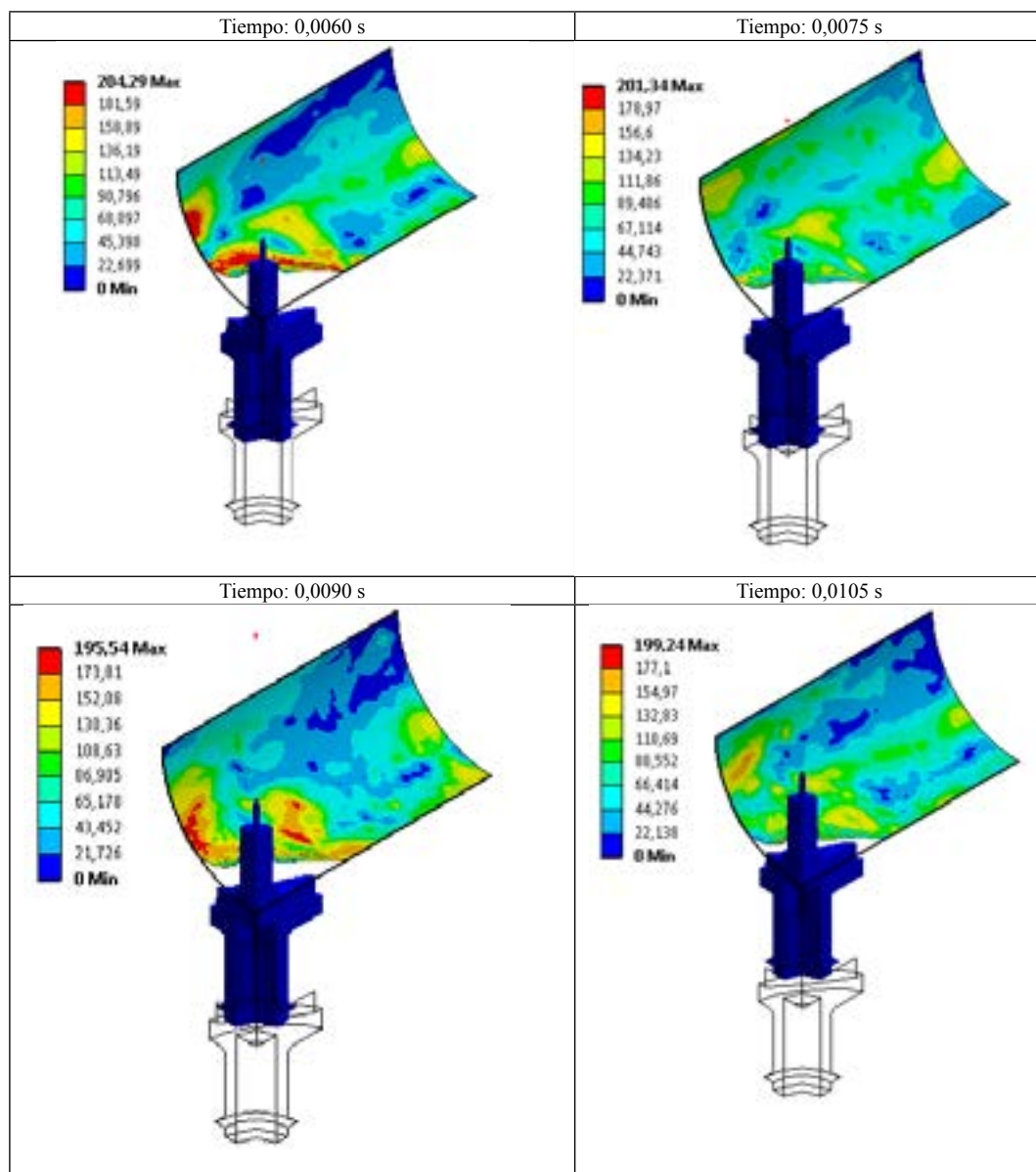
Figura 11: Estado final de la simulación numérica. Vista transversal.

En resumen, dadas las características geométricas y de materiales del problema; se observa que la velocidad de impacto que es necesaria para penetrar en la delgada chapa de la tubería de gas es de solo 12,8 m/s (compárese con la velocidad balística que suele superar los 200 m/s). Por lo tanto, el extremo punzante se convierte en un elemento muy perjudicial para el problema del impacto y la pieza puede penetrar en la tubería con relativa facilidad. Los daños observados para dicha velocidad son inferiores a la abolladura observada en la obra. Por consiguiente, la velocidad debía ser mayor.

La simulación reproduce el alcance de los daños observados en la parte inferior de la tubería con notable similitud para una velocidad de 17,8 m/s. Por lo tanto, para dicha velocidad es posible penetrar a la tubería de gas y generar la deformación plástica en un área similar a la observada en el siniestro.

A continuación se recrea el proceso de impacto (fig. 12) correspondiente al desplazamiento del accesorio impactando sobre la tubería de gas a una velocidad de 17,8 m/s. El tiempo total del impacto es de 0,015 s. Las unidades del mapa de tensiones de Von Mises se expresan en MPa.





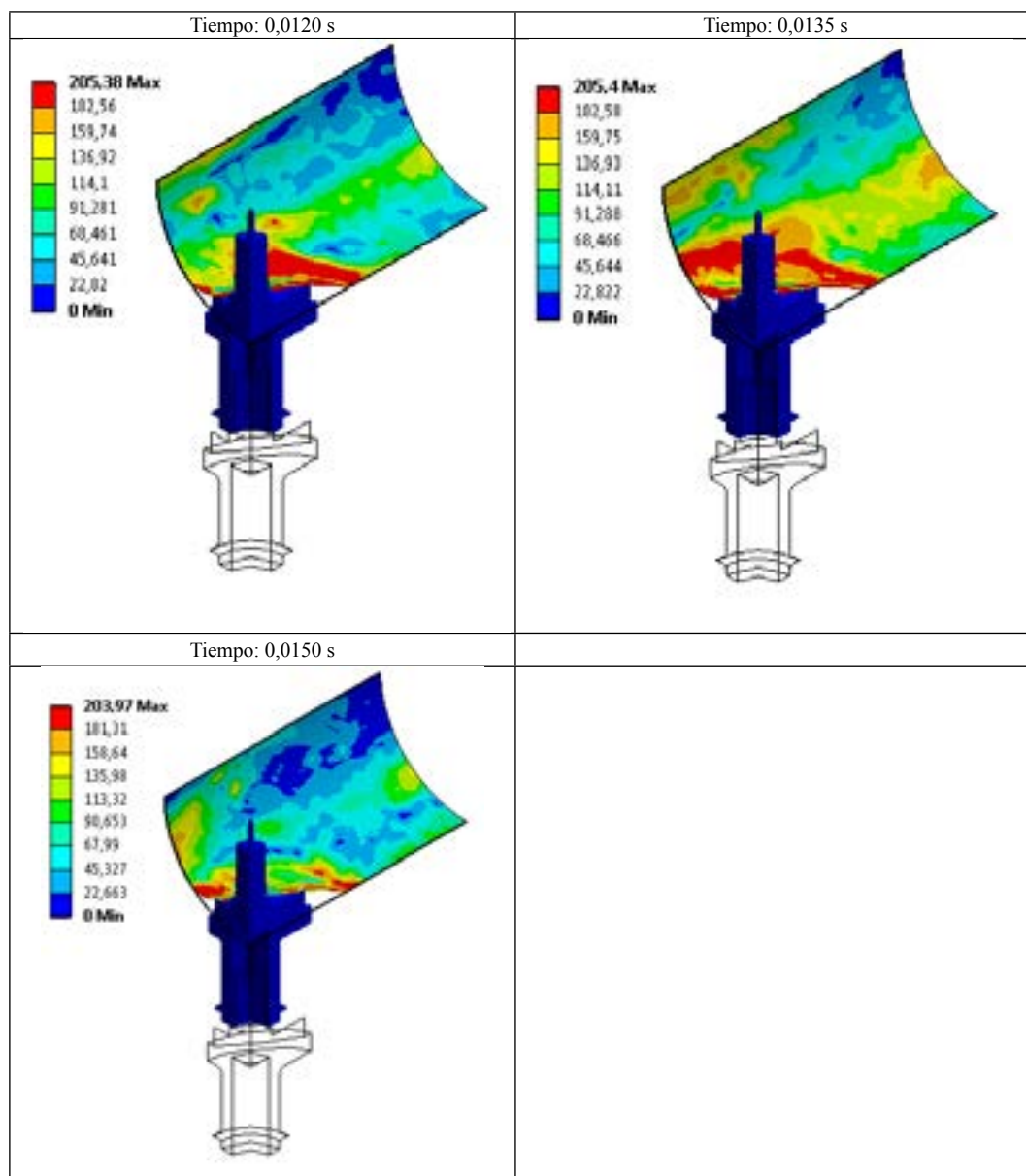


Figura 12: Etapas de la penetración durante el impacto

8 Conclusiones

La ingeniería forense utiliza métodos experimentales, numéricos y analíticos similares a la ingeniería de investigación científica. No obstante, los objetivos de la ingeniería forense se limitan a evaluar los posibles escenarios y su plausibilidad atendiendo el resultado final del siniestro.

En este trabajo se ha presentado una investigación forense donde se han combinado simulaciones y ensayos experimentales. El objetivo de la investigación era determinar la plausibilidad de un impacto en una tubería.

Los ensayos sobre los materiales han servido para demostrar que los elementos resistentes presentaban un deterioro que limitaba enormemente la seguridad de los mismos. Por ello, se considera probado que la pieza salió despedida de forma brusca con una rotura frágil en la zona de la soldadura y chapas adyacentes.

Asimismo, se ha demostrado experimentalmente el umbral de energía de penetración en el material de la tubería. Dicho dato se ha contrastado con simulaciones de impacto para evaluar el alcance de la penetración y el daño. Los resultados obtenidos demuestran que sí se podía producir penetración y que los daños asociados a la abolladura son del orden de los observados en el lugar del siniestro.

Así, mediante la simulación y la experimentación, y en base a las evidencias, es posible establecer un escenario inicial y estudiar su evolución hasta justificar el resultado final observado en el siniestro. De esta manera se puede afirmar que la hipótesis de la investigación es plausible y queda confirmada.

Referencias

ASTM E3-11 (2011) Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/E0003-11.

ASTM E384 - 11e1 (2011) Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/E0384-11E01.

ASTM D7136/D7136M-12 (2012) Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D7136_D7136M-12.

Brown, Sam. (2007) Forensic engineering: Reduction of risk and improving technology (for all things great and small). *Engineering Failure Analysis*, v. 14, n. 6, p. 1019-1037.

Chiles, James R. (2002) Inviting Disaster: Lessons from the Edge of Technology. Harper Business.

Corbett, G.G, Reid, S.R. y Johnson, W. (1996) Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review. *International Journal of Impact Engineering*, v. 18, n. 2, p. 141-230.

Delatte, Norbert. (2010) Failure literacy in structural engineering. *Engineering Structures*, v. 32, n. 7, p. 1952-1954.

Guidelines for Forensic Engineering Practice. (2012). Forensic Practices Committee of the Technical Council on Forensic Engineering; ASCE. Edited by Joshua B. Kardon.

Goldsmith, W. (2001) Impact. Dover Publications.

Mitreviski, T., Marshall, I., and Thomson, R. (2006) The influence of impactor shape on the damage to composite laminates. *Composite Structures* v. 76, n. 1-2, p. 116-122.

Pérez, M.A.; Gil, L.; Oller, S. (2012) Evaluación del daño por impacto en laminados de material compuesto mediante la respuesta dinámica. *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*. ISBN: 978-84-95999-00-9.

Petroski, Henry. (1994) *Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgment in Engineering*. Cambridge University Press.

Robinson, P., and Davies, G. (1992) Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. *International Journal of Impact Engineering* v. 12, n. 2, p. 189-207.

Schlager, Neil y Petrosky, Henry. (1994) *When Technology Fails: Significant Technological Disasters, Accidents, and Failures of the Twentieth Century*. Gale Group.

Sjjoblom, P. O., Hartness, J., and Cordell, T. M. (1988) On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of Composite Materials* v. 22, n. 1, p. 30-52.

A forensic engineering approach using numerical - experimental techniques in the case of impact in a pipeline

ABSTRACT

Forensic engineering in the mechanical field includes research on disasters where structural elements are broken. Forensic approach looks for a plausible scenario in the starting point and a consistent story of events that ends with the outcome observed in the incident. During the work of forensic investigation, hypotheses are validated with laboratory tests on materials and computer simulations. In this paper, the concepts of forensic engineering are applied over an accident of an impact on a pipe. From evidences, several tests are performed on materials and a loss of strength capacity was found on them. It was also tested the threshold of penetration on materials by impact. Finally, numerical simulation complemented the experimental part of the story.

Keywords: Forensic engineering, impact testing, impact simulation

In the forensic field, most structural accidents end as claims because insurance companies are involved and litigation between parties occurs. This paper will present some forensic methods of investigation of accidents and how the numerical and experimental technologies are exploited to build scenarios that help to create a consistent account of events. When an accident occurs it is important to determine the sequence of events and responsibilities. For two reasons: Firstly because the detection of errors and poor practices result in an improvement of the technology. The detection of errors and their solution produce more robust and reliable engineering solutions. What is more, the identification and understanding of mistakes provide insight into the phenomenology of materials, structures, systems, etc. Secondly, errors define responsibilities, and in the case of litigation, this aspect is crucial because responsibilities can have legal consequences and ought to include victim compensation. Therefore the work of forensic engineers has a deep social responsibility, since the delivery of a report might identifies responsibilities and influence over the judge's decision.

The forensic engineer faces complex problems that have only the certainty of the outcome. But the engineer should be able to reproduce the situations and the step progress that have led to this outcome. The forensic engineer has to imagine initial scenarios, leave them to evolve and finally, find the outcome. Forensic engineer solve inverse problems. In this sense he/she is diametrically opposed to the scientific engineer position that starts from the initial conditions and must prove his/her hypothesis. To travel along the road both kinds of engineers have the same tools: experimental techniques and numerical techniques.

The unknown of the initial conditions can be absolute. This is a very weak point because the engineer will never know what really happened. It is possible, from hints to build plausible scenarios; but some information may be lost, witness may be confused, evidences can hide relevant data, etc. Therefore, the forensic engineer has a more modest goal; he/she does not intend to discover "the truth" because he/she knows that it does not exist. The engineer may merely build a plausible situation, relative and under some circumstances.

A case based on a real situation arises. Distribution of a pressurized fluid by piping had a tubulature. Directly above a gas pipe was located. For unknown reasons the tubulature came off of the distribution pipe and was thrown upward. During the ascent was intercepted by the gas pipe and there was an impact. Fluid flooded into gas pipe and the activity of a major industrial installation was interrupted with personal hazards and significant economic losses.

To proof the damage of the accident some things are needed in the starting scenario: enough pressure on the network (excess pressure), abrupt release of tubulature and penetration capability by impact. It was verified that the pressure was constant.

Two types of tests are performed. Some of them pretended to verify that the break was sudden and justify the release. Others assessed the penetration capability into the gas pipe. The state of the tubulature before the incident is critical. This is one of the conditions of the initial scenario that presents uncertainty. Visual inspection shows that there was significant corrosion in some parts of the piece. Some samples were taken from the piece and the area of connection. Test of emission spectroscopy, X-ray analysis, metallographic test, hardness test and surface analysis determine that different metals produced a galvanic pile. Corrosion was severe and welding was full of defects. The second objective was to find the energy threshold that produces penetration by impact. Several samples of the gas pipe material were tested in an impact tower.

Finally, numerical methods were used to demonstrate that the tubulature had ability to penetrate and produce damage similar to that observed in the incident. Explicit simulation can be used for drop tests and impact tests and penetration. The simulation process begins with the development of the grid, the material properties, the stresses and boundary conditions. From this definition, the algorithm runs following fig. 6.

Conclusions

Forensic engineers, like scientific engineers, use experimental, numerical and analytical methods to prove their hypothesis. However, forensic engineering objectives are limited to evaluate possible scenarios and proof their plausibility attending the final outcome of the incident.

This paper presented a forensic investigation that has combined simulations and experimental tests. The objective of the research was to determine the plausibility of an impact on a pipe.

The tests on the materials have been used to demonstrate that the structural elements were under their strength limit. Therefore, it is considered proven that the piece involved was broken with a sudden and brittle fracture in the weld zone and its adjacent plates.

Also, it has been experimentally found the penetration energy threshold in the pipe material. This data has been compared with simulations of impact to assess the capability of penetration and damage. The results show that the tubulature could penetrate and damage in an area equivalent at those observed in the scene.

Thus, by simulation and experiment, and based on evidences, it is possible to establish a starting point scenario and study its evolution to justify the outcome observed in the incident. Thus we can say that the research hypothesis is plausible and confirmed.