

MEDIDA DE TENSIONES EN ESTRUCTURAS METALICAS MEDIANTE ULTRASONIDOS

Federico París, Ingeniero Industrial
José Cañas, Ingeniero Industrial
Manuel Fernández, Ingeniero Industrial
 Dpto. de Mecánica de Medios Continuos
 E.T.S.I.I. de Sevilla

INTRODUCCION

El conocimiento del estado tensional real en una estructura, manejando esta acepción en un sentido amplio, es un objetivo de interés prioritario para el ingeniero que realiza el análisis, diseño, mantenimiento o reparación de la misma.

Es correcto afirmar que los Métodos actuales de cálculo (Cálculo Matricial de estructuras de barras y los Métodos de Elementos Finitos y de Elementos de Contorno en estructuras continuas bi o tridimensionales) han alcanzado un nivel de desarrollo tal que el analista de estructuras puede sentir confianza sobre los resultados del modelo realizado.

Lo que evidentemente los métodos de cálculo no pueden garantizar es la correspondencia entre la situación modelada y la realidad. Esta correspondencia, a la que posiblemente no se da la importancia que requiere, se puede ver afectada, no ya por las necesarias hipótesis realizadas en el proceso de modernización de la estructura, sino por las vicisitudes propias de la ejecución y uso de la estructura. La medición del estado tensional en la estructura real es la manera de discernir sobre la correspondencia entre la forma de trabajo real de una estructura y la predicha por el modelo.

Los métodos experimentales de medida de tensiones han venido dando sólo una

respuesta parcial a esta demanda. Así, el empleo de bandas extensométricas ha sido habitual en la realización de pruebas de carga de estructuras. Es obvio, sin embargo, que la extensometría entendida en su sentido habitual sólo puede medir situaciones relativas de cambio de carga. Así, durante la realización de la prueba de carga, se medirán las tensiones originadas por la actuación de la carga de prueba, pero no se podrían detectar las tensiones de montaje o las tensiones aparecidas por asentamientos en los apoyos acaecidos durante la fase de construcción posterior a la instalación del elemento objeto de estudio. Resulta igualmente imposible, aplicando esta técnica, determinar en un instante dado de la vida de una estructura el estado tensional existente en un elemento de la misma.

Las técnicas para medir estas tensiones tienen que estar asociadas a las desarrolladas para la medida de las tensiones residuales, si bien en el caso que nos ocupa el carácter de método no destructivo debe tener aún un papel más prioritario. En este sentido es obvio que la relajación de tensiones es desde un punto de vista conceptual un método aceptable de medida del estado tensional.

Dentro de este rango de métodos, la técnica del **agujero ciego** [1] podría ser considerada como la más fiable, midiendo mediante bandas extensométricas la liberación de tensiones que aparece al ejecutar un orificio no pasante de pequeñas dimensiones (diámetro = 1,5 mm y profundidad

= 1,8 mm) en un elemento estructural. Aunque de gran utilidad y aún admitiendo su carácter cuasi no destructivo, la puesta en servicio del equipo necesario para la realización del ensayo limita en cierta medida su aplicabilidad fuera del Laboratorio. Limitaciones de esta índole descartan por completo la utilización de rayos-X por reflexión usada en la medida de tensiones residuales originada por la soldadura.

Aunque la aplicación de ultrasonidos para la predicción de defectos en materiales metálicos y compuestos es una técnica bien establecida, es sólo en los últimos años cuando la medida de tensiones residuales por ultrasonidos experimenta un gran auge, comenzando a ser utilizada a nivel industrial en diferentes procesos de fabricación (cilindros) o control del estado del material (ruedas de ferrocarril [2]) y evaluación de tensiones residuales originadas por la soldadura [3]. En este trabajo se van a poner de manifiesto los fundamentos del método de medida así como la estrategia y requisitos de medición, para pasar finalmente a realizar una valoración de su aplicabilidad a la determinación experimental de los estados tensionales en estructuras metálicas.

FUNDAMENTOS DE LA MEDIDA DE TENSIONES POR ULTRASONIDOS

La técnica de medida de tensiones residuales por ultrasonidos descansa en la variación de la velocidad que experimenta

una onda ultrasónica cuando se propaga en un medio elástico cuando éste experimenta deformaciones relacionadas con el estado tensional. La sensibilidad de esta variación se representa en la Figura 1 pudiendo observarse que aunque pequeña en todos los casos, toma los mayores valores para ondas longitudinales (OL) o transversales (OT) pero que vibran en la dirección de la tensión que se pretende medir, (1) y (3) respectivamente.

donde:

v_{ij} representa la velocidad de propagación de una onda longitudinal que se propaga en la dirección i y vibra en la dirección j .

v_L, v_T representan la velocidad de propagación en el material con deformación nula de las ondas longitudinales y transversales.

ϵ_i representa la deformación principal en la dirección i .

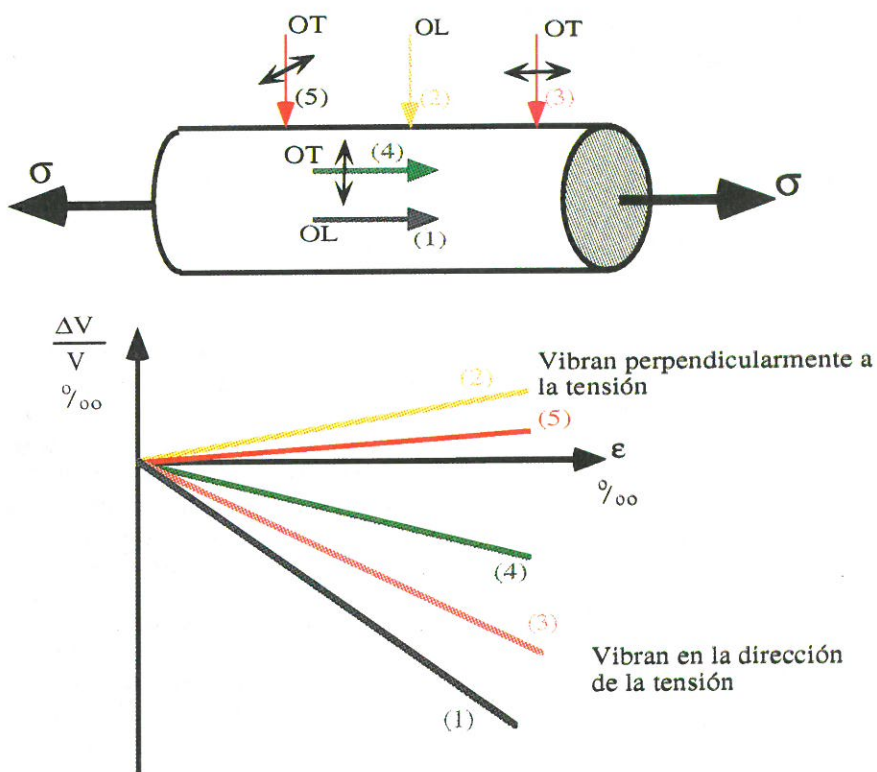


Figura 1.- Sensibilidad de la variación de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en función de su dirección de propagación y vibración con respecto al estado tensional existente.

Para proceder a una determinación del estado tensional se utilizan las ecuaciones de Hughes y Kelly [4] para ondas longitudinales:

$$\rho v_{ij}^2 = \rho v_L^2 + (21 + \lambda) \theta + (4m + 4\lambda + 10G)\epsilon_i \quad (1)$$

y para ondas transversales:

$$\rho v_{ij}^2 = \rho v_T^2 + (\lambda + m) \theta + 4G\epsilon_i + 2G\epsilon_j + 0.5n\epsilon_k \quad (2)$$

θ representa el primer invariante del tensor de deformaciones.

λ, G son las constantes elásticas del material (constante de Lamé y módulo de cizalladura respectivamente)

l, m, n son las constantes de tercer orden del material, también a veces llamadas constantes acustoelásticas.

Las ecuaciones (1) y (2), que constituyen la base de la Acustoelasticidad, pueden ser manipuladas, para obtener, introduciendo la ley de Hooke, las ecuaciones que van a constituir el fundamento de la medida del estado tensional. De (1) se puede obtener:

$$\frac{v_{ij} - v_L}{v_L} = \frac{t_L - t_{ij}}{t_{ij}} = K_L \sigma_i \quad (3)$$

y de (2):

$$\frac{v_{ij} - v_T}{v_T} = \frac{t_T - t_{ij}}{t_{ij}} = K_1 \sigma_i + K_2 \sigma_j + K_3 \sigma_k \quad (4)$$

donde las velocidades de propagación se han expresado en función de los tiempos de vuelo de las ondas ultrasónicas, que deben ser las cantidades a medir en la realización del test en la estructura a analizar.

Puede observarse que la ecuación asociada a la propagación de una onda transversal implica a todas las componentes del estado tensional. Una ecuación más útil, sobre todo para su aplicación a la medida del estado tensional en estructuras de barras donde la distribución cualitativa de las tensiones es conocida, se obtiene restando dos ecuaciones (4) asociadas a ondas que vibran en las direcciones j y k obteniéndose:

$$\frac{v_{ij} - v_{ik}}{v_{ik}} = \frac{t_{ik} - t_{ij}}{t_{ij}} = K_S (\sigma_j - \sigma_k) \quad (5)$$

observándose que, en este caso, no existe en la expresión ninguna medida asociada al estado libre de tensiones.

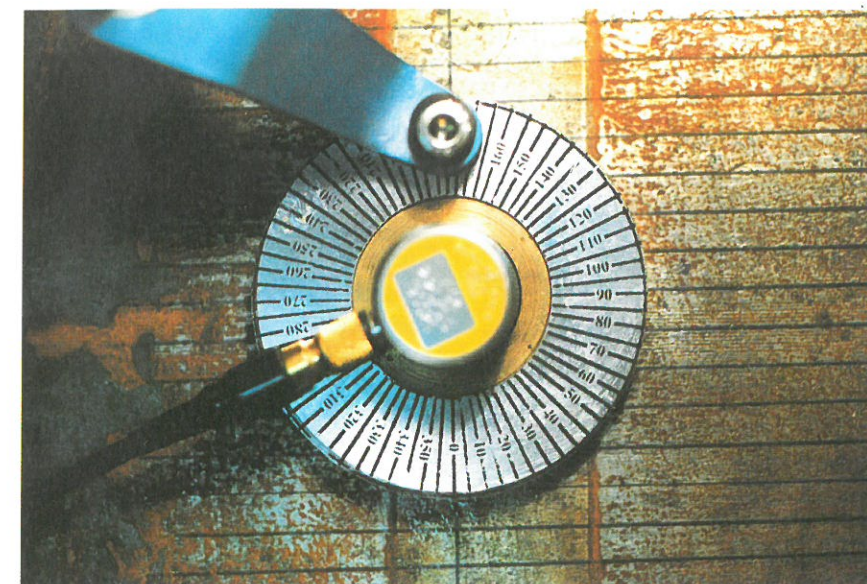
POSIBILIDADES DE MEDIDA

Las ecuaciones (3) y (5) son las de mayor aplicación para el cálculo de los estados tensionales en estructuras metálicas. La figura 2 muestra esquemáticamente las posibilidades de medida en base a estas ecuaciones. La ecuación (3) permite medir la tensión en las direcciones x e y orientando apropiadamente el conjunto de emisores que se indica en la figura. Este conjunto que se representa en la fotografía 1 está formado por un emisor y dos receptores de ondas longitudinales. Los tiempos que aparecen en la ecuación (3) se toman de las diferencias de tiempo de vuelo medido en los dos receptores, por lo que el valor

obtenido corresponde a un valor promedio en un espacio del orden de centímetros.

En la fotografía 1 se muestran: (a) un sistema que requiere agua como acoplante y (b) un sistema en que el acoplamiento se realiza con una cuña de metacrilato con la inclinación apropiada dependiente del material. Aunque esta segunda opción resulta más fácil de usar fuera del laboratorio, en superficies con cierta rugosidad las cuñas pueden quedar dañadas y en cualquier caso el acoplamiento se realiza mejor con el agua.

La ecuación (5) permite por su parte la medida de la diferencia de tensiones s_x y s_y (supuestas principales), midiendo los tiempos de vuelo de propagación de ondas transversales a través del espesor, en las direcciones x e y . La medida en las dos direcciones se realiza de forma inmediata sin más que girar 90 grados el emisor-receptor



Fotografía 2. Emisor-receptor de ondas transversales.

que, como se representa en la fotografía 2, se introduce en un soporte fijo para tener una referencia de las medidas a efectuar.

Todas las medidas deben realizarse en las direcciones principales de tensión. Estas direcciones se pueden determinar con ayuda del transductor de ondas transversales. Basta girar 180 grados el transductor obteniendo una gráfica en que las direcciones de máxima y mínima velocidad de propagación (mínimo y máximo tiempo de vuelo) corresponden a las direcciones principales de tensión buscadas, que obviamente deben formar un ángulo de 90 grados.

En un perfil de una estructura metálica el interés habitual es conocer las máximas

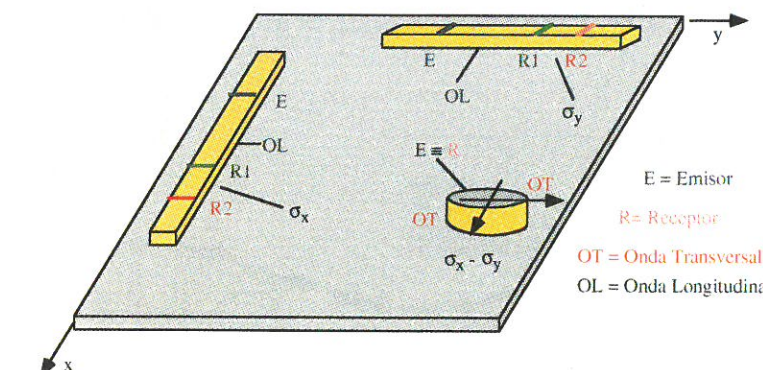
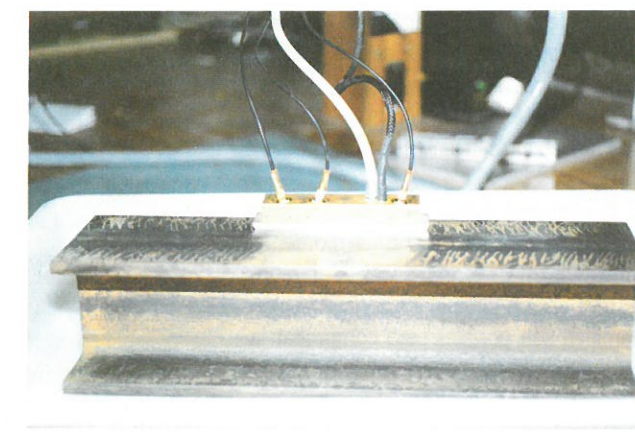
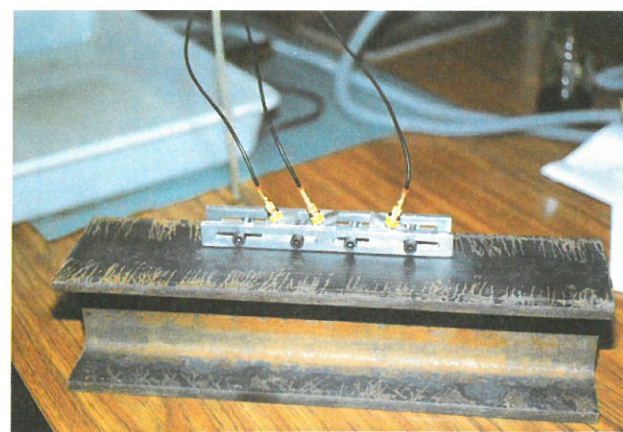


Figura 2. Esquema de las mediciones posibles a realizar en una placa.



Fotografía 1. Conjunto emisor-receptores de ondas longitudinales: (a) con agua como acoplante, (b) con cuña.

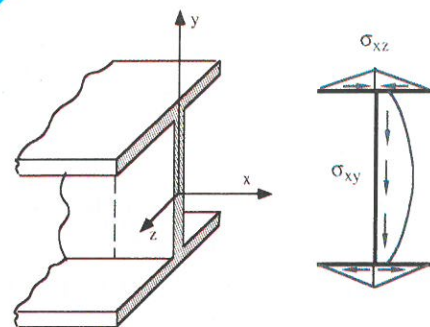


Figura 3. Medida en un perfil en doble T

tensiones normales a la sección transversal del perfil, por lo que, dado que el estado tensional es cualitativamente conocido, la medición a efectuar resulta inmediata. Así, por ejemplo, en el caso de querer determinar el estado tensional en una doble T sometida a flexión simple como se representa en la figura 3, bastaría considerar el estado tensional existente en la sección y que se ilustra en dicha figura.

Admitiendo que la máxima tensión normal se produce en las alas, los puntos donde la medida se puede efectuar de forma más simple y directa serían los bordes de dichas alas, dado que en ellos la tensión longitudinal es una tensión principal. Dado que la tensión s_z es cero, podrían emplearse indistintamente palpadores longitudinales orientados en la dirección x o palpadores transversales que darían directamente, haciendo uso de la ecuación (5), la tensión longitudinal. La única diferencia sería que el uso de la onda longitudinal daría un valor promedio en la dirección del eje x y además correspondería a valores encontrados en el material a una pequeña profundidad, que es donde las ondas longitudinales emitidas viajan. En cambio, las ondas transversales proporcionarían el valor promedio a través del espesor del ala. Ambos valores son representativos del estado tensional existente en el perfil y por tanto de plena utilidad en la Ingeniería de Estructuras.

El conocimiento de la tensión normal máxima permite establecer el momento flector que está soportando el perfil, aunque medidas en el alma según la dirección x también son posibles para comprobar la distribución de tensiones predicha por la Resistencia de Materiales. Cabe indicar que la presencia de s_{xy} en el alma exige la determinación de las direcciones principales

antes de efectuar las medidas tal y como se ha indicado con anterioridad.

Para mostrar la aplicabilidad del método se han tomado dos medidas con ondas transversales en el ala del perfil HEB-100 que se muestra en las fotografías 1 y 2 y

que se representan en la figura 4. Ambas corresponden a la sección central, una en el mismo extremo del ala y otra a 3 cm de dicho extremo. El hecho de que no se obtenga una línea recta (al girar 180° el transductor de ondas transversales), implica que hay tensiones residuales en el perfil. La otra posibilidad para que esto sucediera sería que el material tuviera textura, orientación preferente de los granos, situación que puede comprobarse en el extremo del ala de las secciones finales donde las tensiones son nulas. En este caso se puso de

manifiesto que la señal en este punto era cuasi-plana, por lo que las indicaciones que aparecen en la figura 4 corresponden a tensiones residuales. En ambos casos puede observarse, como se había indicado, que los máximos y mínimos, que están asociados a las direcciones principales forman aproximadamente 90°. En la medida en el borde del alma estas direcciones principales corresponden (de acuerdo a la condición de contorno en dicho borde), a las direcciones longitudinal (x) y transversal (z). En la medida en el interior ya puede observarse que las direcciones principales están giradas debido al efecto de la presencia de tensiones tangenciales residuales en el ala. La falta de continuidad de la pendiente está usualmente motivada por la variación de la presión en el palpador, sirviendo la obtención del mismo tiempo de vuelo a los 180° de chequeo de la medida efectuada.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En primer lugar, hay que indicar que la utilización de las ecuaciones (3) y (5) para

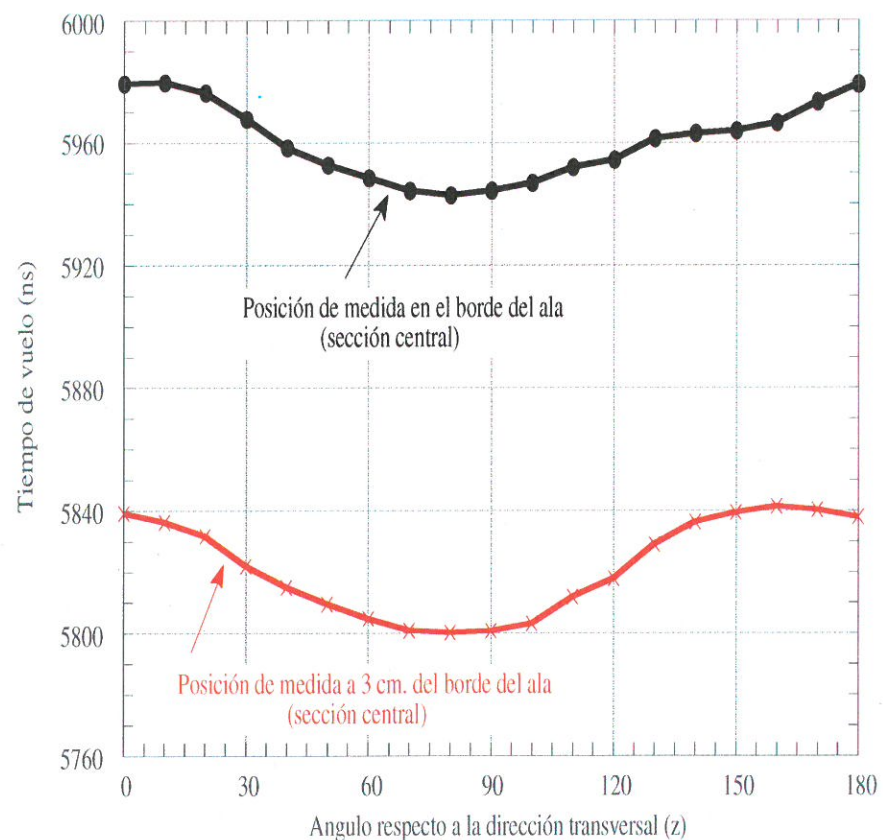


Figura 4. Determinación de las direcciones principales del estado de tensiones residuales.

determinar el estado tensional requiere el conocimiento de ciertos parámetros involucrados en las ecuaciones. Así la ecuación (3) requiere el conocimiento del tiempo de vuelo en el mismo material libre de tensiones. La manera más sencilla de realizar esta medida es tomar un testigo de la estructura de pequeñas dimensiones para garantizar su estado cuasi libre de tensiones.

Las ecuaciones (3) y (5) requieren, además, el uso de unas constantes del material. Aunque existen en la bibliografía valores de las constantes de estas relaciones acoustoelásticas, la manera más segura de evaluarlas es también a través del uso del testigo anteriormente mencionado que se sometería a un estado tensional conocido, de tal manera que las mismas ecuaciones (3) y (5) serían ahora usadas pero para determinar las constantes del material.

Como se ha mencionado, la velocidad de propagación de una onda ultrasónica en

un material se ve también afectada por la textura del mismo. La utilización de un testigo permitiría, además de lo anteriormente mencionado, el establecer la presencia de textura en el material y eliminar, en su caso, el efecto de la misma en la medida efectuada en el elemento objeto de estudio.

Con todo, las mayores limitaciones del uso de esta técnica en estructuras metálicas están asociadas en la actualidad al desarrollo del ensayo. En efecto, por un lado ambos tipos de transductores requieren de un medio acoplante, agua en el caso de ondas longitudinales y un producto de mayor viscosidad en el caso de ondas transversales. Por otro lado, la portabilidad de los equipos necesarios es, aunque posible, limitada, por lo que su mejora se considera requisito deseable para la aplicación generalizada de esta técnica. Su carácter no destructivo y la rapidez de la medida la harán en un futuro inmediato extraordinariamente

aconsejable para su uso en el campo de las estructuras metálicas.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E837, "Determining residual stresses by hole drilling strain gage method", 1989.
- [2] E. Schneider, R. Herzer, D. Bruche y H. Frotscher, "Ultrasonic characterization of stress states in rims of railroad wheels", VI Int. Symposium on nondestructive characterization of materials, USA, 1993.
- [3] J. Cañas, M. Fernández, M. Peña-fiel, F. París, "Determinación de tensiones residuales en chapas soldadas mediante ultrasonidos". Décimas Jornadas Técnicas de Soldadura, Elsevier Prensa, págs. 105-110, 1994.
- [4] Hughes, D. S. y Kelly J. L., "Second order elastic deformation of solids". Phys. Rev. 92, 1145-1149, 1953. ■

IVG GRUPO
Instituto Vasco de Gestión

European
institute of
management

TECHPRO
Técnicas de Productividad

IVC
Instituto Vasco de Gestión
de la Calidad

Formación para el perfeccionamiento de directivos y cuadros en los métodos y técnicas de dirección.

Ingeniería de la Formación.

Formación a la medida de la empresa.

Sin invertir en capitales productivos, hoy se puede aumentar de forma considerable la productividad de una empresa y por lo tanto su beneficio.

Análisis de valor.

Reingeniería de Procesos.

Diseño de proyectos a medida.

Gestión estratégica de los RRHH.

Desarrollo de la Organización y del «Management».

Gestión estratégica de la calidad.

referencias

ABB Generación, S.A. ABB Tracción, S.A. ABB Tabesa, S.A. ABB Trafonor, S.A. AFYDE, Asociación Altos Hornos de Vizcaya, S.A. Amilibia y De la Iglesia, S.A. Asociación de Empresas del Duranguesado Asociación de Marketing y Publicidad de Vizcaya Astilleros Españoles, S.A. Aurora Polar Autoridad Portuaria de Bilbao Autoridad Portuaria de Santander Banco Bilbao Vizcaya Bridgestone-Firestone Hispania, S.A. Cabot, S.A. Naturgas, EVE Bilbogas	CAF Bilbao Bizkaia Kutxa Carbureibar, S.A. CEINSA Centro Industrial y Mercantil de Vizcaya Club de Marketing de Guipúzcoa Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Alava, Guipúzcoa y Navarra Dpto. de Industria y Energía del Gobierno Vasco Dpto. de Trabajo y Seguridad Social del Gobierno Vasco Dpto. de Promoción Económica de la Diputación Foral de Bizkaia Elecnor Electrotécnica Artech Hnos., S.A. Eusko Trenbideak Fagor, S. Coop. Ltda. Federal Mogul, S.A. Grupo Argentaria	Iberdrola, S.A. José M.ª Aristaín, S.A. Kutxa - Caja Gipuzkoa San Sebastián Labein Monroe - División de Tenneco España, S.A. Parque Tecnológico, S.A. Patricio Echevarría, S.A. Seguros Bilbao Sindicato Empresarial Alavés (SEA) Tabesa Tekel, S.A. Tubacex, S.A. Tubos Reunidos Universidad de Deusto Bultz-Lan Radio Popular Obispado de Bilbao Grupo Alimentario Kinkus Lagun-Aro
---	---	--

Invertir en gestión es garantizar futuro.

Sólo las empresas bien gestionadas sobrevivirán en un entorno altamente cambiante y competitivo

Larrauri, 1 - Torre central, Planta 7.ª • 48016 DERIO (Vizcaya) • Tfnos.: (94) 454 14 01 - 454 01 90 - 454 00 37