

Determinación de la soldabilidad de un acero

INMACULADA ROMERO DIAZ (*)

RESUMEN. En este artículo se trata el tema de la soldabilidad de los aceros dada la creciente demanda de los nuevos aceros soldables en el mercado de los productos siderúrgicos.

Se presentan algunos métodos y ensayos que permiten evaluar esta característica, así como algunos de los factores que influyen a la hora de conseguir una unión soldada satisfactoria y apta para el servicio que haya sido diseñada.

DETERMINING THE WELDING CAPACITY OF STEEL

ABSTRACT. *This paper examines the welding capacity of steels, taking into account the increasing demand for new weldable products for reinforced concrete in the Siderotechnical Market.*

Some methods and tests are presented, with a view to assessing that capacity. Likewise, some factors are analyzed, that influence the quality of the welded union, in order to obtain a well designed and suitable union for service.

1. INTRODUCCION

La recomendación ISO 581/80 define así la soldabilidad: «Un acero se considera soldable en un grado prefijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la continuidad metálica de la unión, de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de que forma parte integrante».

Al realizar una soldadura hay que tener en cuenta los cambios que se producen en las características del metal base utilizado. No basta que un material posea buenas propiedades mecánicas para que sea soldable, sino que es necesario además que esas características no se vean alteradas.

Para que un acero pueda considerarse soldable, es preciso que cumpla las condiciones impuestas por la soldabilidad operativa, la soldabilidad metalúrgica y la soldabilidad constructiva o de servicio.

La soldabilidad operativa se refiere a la posibilidad de unir los metales mediante la operación de soldadura a fin de lograr una unión continua y sin defectos.

La soldabilidad metalúrgica estudia las transformaciones físico-químicas que se producen en las zonas afectadas por la soldadura por efecto del ciclo térmico a que se ven sometidas para prevenir la aparición de cons-

tituyentes indeseables y asegurar que las propiedades mecánicas de la unión serán las deseadas. Así, por ejemplo, la formación de martensita en los aceros al carbono puede dar lugar a una unión frágil, o la precipitación de carburos en los aceros austeníticos al cromo-níquel ocasiona una disminución en la resistencia a la corrosión.

La soldabilidad constructiva o de servicio se refiere a la capacidad de la estructura soldable completa para soportar con éxito las condiciones impuestas en servicio durante el tiempo especificado.

2. ENSAYOS DE SOLDABILIDAD

La amplitud del término soldabilidad hace que no exista un determinado ensayo con el que se pueda evaluar esta característica, dada la diversidad de variables que influyen en una unión soldada.

Sin embargo, existe una serie de ensayos que proporcionan datos útiles, los cuales permiten conocer con cierto grado de confianza valores a considerar durante la realización de las soldaduras, tales como: proceso adecuado, diseño de la unión, aporte térmico, etc.

La American Welding Society clasifica estos ensayos en tres grupos:

- Ensayos teóricos.
- Ensayos simulados.
- Ensayos sobre soldaduras.

2.1. ENSAYOS TEORICOS

Tales como el ensayo de Jominy, que sirve para predecir la velocidad de enfriamiento de la zona térmicamente

(*) Licenciada en Ciencias Químicas, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Sector de Ciencia de Materiales (MOPT).

afectada a partir de tablas experimentales que relacionan dicha velocidad con el aporte térmico, precalentamiento y espesor del material. El ensayo se realiza sobre una serie de probetas de plegado entalladas que se someten a una austenización a 1.150 °C. Posteriormente se enfrían de forma tal que se consigan unos valores de dureza iguales a los que se esperan en las zonas térmicamente afectadas. Si estas probetas pueden soportar un plegado entre 10 y 20 grados, se las considera suficientemente dúctiles para la mayoría de las aplicaciones.

Otro ensayo teórico consiste en predecir la dureza de la zona afectada por el calor a partir de la composición química del material base. Para ello se emplea una fórmula modificada del carbono equivalente junto con la ecuación del flujo térmico aplicable a una determinada soldadura. La conclusión de este ensayo se resume en que si los valores de dureza, de la zona afectada por el calor, son menores de 300 Vicker, el agrietamiento por absorción de hidrógeno no va a ocasionar ningún problema, mientras que si la dureza es mayor de 400 Vicker, existe el riesgo de que se produzca agrietamiento.

2.2. ENSAYOS SIMULADOS

Para reproducir el efecto del calor durante la soldadura, y por lo tanto realizar un ensayo simulado de soldabilidad, se emplean dos métodos:

- calentar y enfriar una probeta a lo largo de un ciclo térmico semejante al que se produce durante una soldadura; y
- además de someter las probetas al ciclo térmico anterior, aplicar una carga controlada en diferentes momentos del ciclo térmico.

Estos ensayos proporcionan una valiosa información sobre las propiedades mecánicas de las zonas afectadas por el calor, tanto durante la realización de la soldadura como una vez finalizada la misma. Sin embargo, en estos ensayos no se consideran las tensiones residuales, absorción de hidrógeno y otras condiciones que pueden originarse en una soldadura.

2.3. ENSAYOS SOBRE SOLDADURAS

Existe una gran variedad de ensayos que se realizan sobre soldaduras con el fin de:

- Valorar el grado de soldabilidad de diferentes materiales e incluso de diferentes coladas.
- Establecer la combinación entre metal de aporte, metal base y condiciones de soldadura que aseguren uniones soldadas satisfactorias.

Podemos, por lo tanto, dividir los ensayos sobre soldaduras en dos grandes grupos: los que permiten determinar la soldabilidad del conjunto y los que miden la soldabilidad en servicio, es decir, del primer grupo de ensayos sabremos cuando un material y proceso pueden ser utilizados para obtener una unión satisfactoria, y del segundo grupo obtendremos resultados que nos permi-

tan saber si la unión es apta para el servicio que ha sido diseñada.

3. SOLDABILIDAD DE ACEROS

El principal problema que nos podemos encontrar en la soldadura de un acero es la aparición de áreas martensíticas, muy frágiles, en las zonas fundida y térmicamente afectada. Por lo tanto, la soldabilidad de los aceros es tanto peor cuando las condiciones de ejecución de la unión soldada supongan velocidades rápidas de enfriamiento, o cuanto mayor sea el contenido en carbono y elementos de aleación.

La formación de martensita será gobernada por la templabilidad del acero. Los elementos que tienen mayor efecto sobre la templabilidad del acero son el carbono, manganeso, molibdeno, cromo, vanadio, níquel y silicio. La acción de estos elementos controlando la tendencia a formar martensita en la zona afectada térmicamente se expresa mediante el carbono equivalente (C.E.), cuyo valor se calcula aplicando una fórmula que recoge los elementos que componen químicamente el acero con sus ponderados coeficientes de influencia en el agrietamiento durante la soldadura en relación al carbono.

Existe una gran variedad de expresiones para calcular el carbono equivalente, pero solamente vamos a exponer la recomendada por el Instituto Internacional de la Soldadura, ya que es la más empleada y aceptada en la actualidad:

$$\% \text{ C.E.} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

en donde los elementos que forman parte de la composición química del acero están expresados en %.

En la norma UNE 36-068 se considera que se satisfacen las exigencias de soldabilidad si se respetan los límites para la composición química y el carbono equivalente dados en la tabla 1.

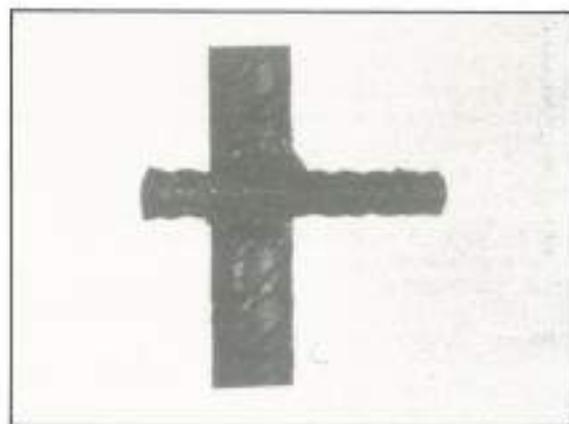


FOTO 1. Soldadura en cruz de barras conegadas.

COMPOSICION QUIMICA (% máx.)					
ANALISIS	% C	% P	% S	% N*	% C.E.
COLADA	0,22	0,050	0,050	0,012	0,50
PRODUCTO	0,24	0,055	0,055	0,013	0,52

TABLA 1.

(*) Si existen elementos fijadores del nitrógeno, en cantidad suficiente, se pueden admitir contenidos superiores.

Por otro lado, la martensita formada con contenidos de carbono mayores resulta ser más dura y con más tendencia a fisurarse en frío.

Por lo tanto, el carbono influye en el agrietamiento en frío por partida doble, facilitando la aparición de martensita en la zona térmicamente afectada y haciendo que sea más propensa a fisurarse.

Por ello, un acero con un porcentaje de carbono y manganeso mayor, y por tanto, mayor carbono equivalente será más difícil de soldar.

La soldabilidad de los aceros bajos en carbono (% C < 0,25 %) es excelente. Su templabilidad baja y su martensita tenaz reducen mucho la posibilidad de agrietamiento en frío.

Los aceros medios en carbono (0,25 < % C < 0,50) conservan una buena soldabilidad hasta 0,30 % C y 1,40 % Mn, pero al aumentar el % C la tendencia a la fisuración crece rápidamente, con lo cual los procedimientos de soldadura deben ser pensados de manera que eviten la formación de grandes cantidades de martensita en la zona afectada térmicamente.

En estos casos, el metal base debe someterse a un precalentamiento para así limitar la velocidad de enfriamiento del ciclo térmico de soldeo y disminuir la amplitud de las tensiones residuales de contracción, con lo cual se mejora enormemente su soldabilidad, especialmente en aquellos aceros que puedan tomar fácilmente el temple o también en grandes espesores.

La velocidad de enfriamiento después de la soldadura será tanto menor cuanto a mayor temperatura se haya hecho el precalentamiento, con lo cual la sección afectada por el calor se mantiene más tiempo en la zona de temperaturas de 550 a 650 °C y de esta forma la austenita se descompone en ferrita, perlita e incluso bainita, pero no da lugar a estructuras frágiles como la martensita.

El precalentamiento reduce también las contracciones que pueden originarse en las piezas soldadas durante el enfriamiento y en muchas ocasiones pueden ser origen de fisuras. Adicionalmente el precalentamiento ayuda a difundir el hidrógeno fuera del área de soldadura y reviene a la martensita, si la hubiera. El procedimiento de soldadura recomendado es el de bajo hidrógeno.

En las soldaduras de gran sección o muy embridadas,

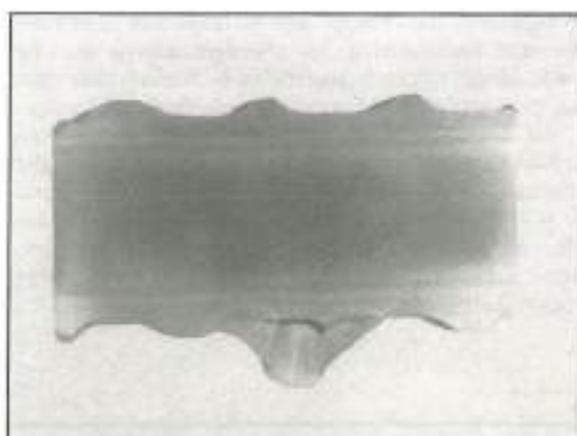


FOTO 2. Macrografía de una soldadura en cruz.

donde las tensiones residuales son muy elevadas, o que vayan a trabajar bajo cargas dinámicas o de impacto, se recomienda un tratamiento térmico de relajación de tensiones (600 °C) si es posible nada más acabar el soldeo, sin esperar a que se enfríe. Así se evita que el hidrógeno agriete la zona afectada térmicamente.

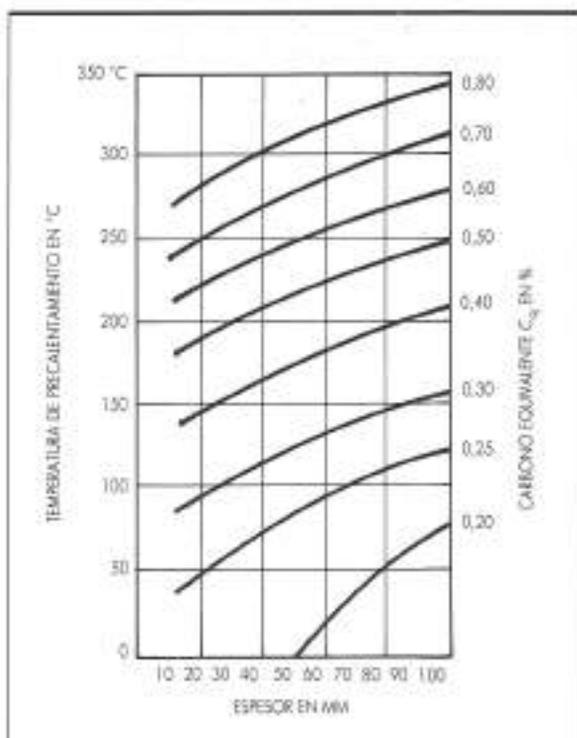


FIGURA 1. Temperatura de precalentamiento en las soldaduras en función del C_{eq} y del espesor de las chapas.

Cuando el tratamiento término inmediato no es posible, una prolongación del precalentamiento durante cierto tiempo reduce la posibilidad de formación de grietas. Pero esto no sustituye al tratamiento de relajación.

La soldabilidad de los aceros altos en carbono (0,5 %) es pobre debido a su templabilidad y a la alta dureza de la martensita. En este caso las temperaturas de precalentamiento deben ser más altas, y resulta imprescindible el tratamiento térmico de relajación de tensiones así como la selección de un proceso de soldadura bajo en hidrógeno.

4. CALCULO DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

Como orientación se indica que los aceros con un carbono equivalente comprendido entre 0,45 y 0,6 % deben precalentarse a temperaturas entre 100 y 200 °C, mientras que los aceros con un carbono equivalente superior al 0,6 % exigen precalentamientos del orden de 200-400 °C.

Existen numerosas fórmulas y monogramas para determinar la temperatura de precalentamiento más conveniente a cada caso particular. Estas fórmulas no

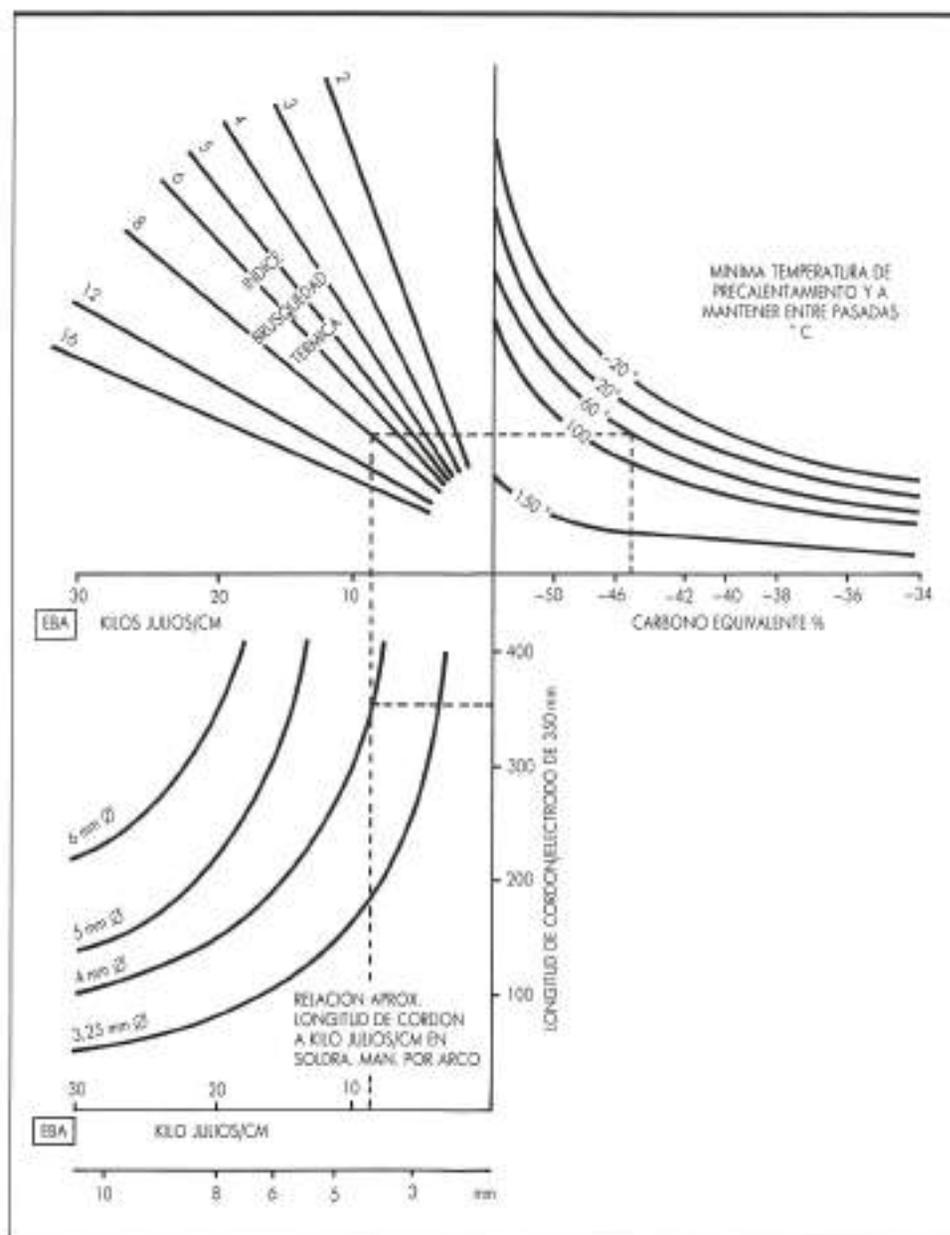


FIGURA 2.

sólo contemplan la composición química del acero, sino también otros factores que influyen directamente sobre la velocidad de enfriamiento, tales como el espesor de la junta, el aporte térmico, el contenido de hidrógeno del arco, etc. A continuación veremos algunos de ellos.

4.1. METODO DE SEFERIAN

Este método propone la siguiente expresión para el cálculo de la temperatura de precalentamiento:

$$T_p = 350 \sqrt{C_t} - 0,25$$

en donde C_t es el equivalente total del carbono, suma del equivalente químico C_q y del equivalente en carbono del espesor C_e , que depende a su vez del propio espesor y de la templabilidad del acero.

$$C_t = C_q + C_e$$

$$C_e = 0,005 \times e \times C_q$$

con lo cual

$$C_t = C_q(1 + 0,005e)$$

donde e está expresado en milímetros.

Seferian determina gráficamente la temperatura de precalentamiento mediante la Figura 1, donde:

$$C_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

Las temperaturas resultantes de este método, al no haberse tenido en cuenta la energía neta aportada en el proceso de soldeo, son superiores a las realmente necesarias.

4.2. METODO DEL INSTITUTO INTERNACIONAL DE LA SOLDADURA

Este método sí considera el aporte de calor a la pieza de soldar como se observa en la Figura 2.

Por este método se calcula la temperatura de precalentamiento mínima recomendada. La geometría de la pieza viene determinada por el IBT o Índice de Brusquedad Térmica. Se define como IBT = 1 al flujo de calor a través de una sección de espesor de 6 mm (1/4") en sentido unidireccional. El IBT = 2 será el flujo térmico a través de dos secciones de 6 mm de espesor o de una sección de 12 mm (1/2").

La Figura 3 muestra las diferentes posibilidades de disipación de calor según la geometría de la junta. La parte inferior izquierda del gráfico, referente a soldaduras manuales por arco, indica la energía con que se ha depositado un cordón por su longitud en relación a la del electrodo de que procede, en cada uno de los diámetros comercialmente disponibles. La línea inferior muestra la garganta del cordón depositado en ángulo, de útil aplicación en soldadura de estructuras metálicas.

Se puede afirmar que la temperatura de precalentamiento será más elevada cuanto mayor sea el IBT, ya sea debido al espesor de la pieza a soldar o al número de caminos posibles de disipación del calor aportado.

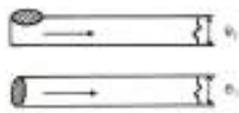
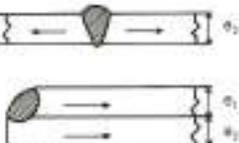
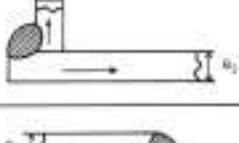
TIPO DE JUNTA	IBT
	$\frac{e_1}{0}$
	$\frac{e_1 + e_2}{0}$
	$\frac{e_1 + e_2 + e_3}{0}$
	$\frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{0}$
NOTA	$e_i =$ ESPESOR EN MM

FIGURA 3.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presenta el estado actual de los conocimientos sobre soldabilidad, válidos para cualquier tipo de acero.

Abordar la soldadura de estos materiales supone diseñar unos procedimientos que alteren en la menor cuantía posible, y de forma controlada, sus características microestructurales, que son las responsables últimas de las propiedades mecánicas y, al mismo tiempo, seleccionar los materiales de aportación que cumplan con las exigencias tecnológicas requeridas.

Si bien la composición química del acero es uno de los factores importantes de la soldabilidad, también in-

tervienen en ella otros que es preciso tener en cuenta, como son la geometría de la construcción, las tensiones desarrolladas por la temperatura por efecto de la operación de soldeo, la velocidad de enfriamiento y el riesgo de agrietamiento en frío incluyendo el efecto adicional del hidrógeno.

Por lo tanto, la soldabilidad no es sólo una propiedad del material, sino la capacidad de un material para ser soldado estimando las prestaciones en servicio de la junta soldada a partir de su microestructura y de las tensiones residuales originadas durante la soldadura.

En el campo específico del hormigón armado, la soldadura se ha venido utilizando en armaduras de construcción. La presencia en el mercado de los nuevos aceros soldables para hormigón armado, clases AEH-400S y AEH-500S, va a influir decisivamente en el futuro inmediato de la construcción en hormigón armado. En

este sentido, la normativa y reglamentación vigente deberá necesariamente realizar un esfuerzo de adaptación a esta nueva situación para así poder dar respuesta técnica a los problemas que pudieran plantarse.

6. BIBLIOGRAFÍA

Procedure Handbook of Arc Welding, Design and Practice. 8.^a edición. The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio, USA.

Curso Master en Soldadura «Welding Engineers» (1991). Centro Español de Soldadura y Tecnologías de Unión. Madrid.
REINA GOMEZ, M. *Soldadura de los Aceros, Aplicaciones*. 2.^a edición (1988). Gráficas Lorno, Madrid.

SEFERIAN, D. *Las soldaduras*. Ediciones Urno (1965).

Steel Handbook for Materials Research and Engineering. Volume 1: Fundamentals. Deutscher V. Düsseldorf (1982).

ZABARA CZORNA, O. *Soldadura y Técnicas Afines*. Tomo 1 (1989). Libería Editorial Bellisco. Madrid.



tecnoambiente, s.a.

CONSULTORES
ESTUDIOS TECNICOS
SOBRE MEDIO AMBIENTE

C/ Lepanto, 173, entresuelo
Tels.: 246 08 02 - 246 02 01
Fax: 246 02 01
08013 BARCELONA

• AGUA

- Aforo de caudales (ríos, colectores, etc)
- Caracterización de aguas residuales (análisis físico, químico y biológico)
- Control de la eficacia de los sistemas de depuración
- Determinación de cambios ecológicos
- Análisis de microcontaminantes y trazas
- Ensayos de toxicidad (Daphnia, Microtox)

• IMPACTOS AMBIENTALES

- Realización de estudios de evaluación ambiental, en cumplimiento de la normativa (RD 1303/86)
- Diseño de programas de vigilancia ambiental.
- Desarrollo de las medidas correctoras propuestas en las declaraciones de impacto.

• SERVICIOS A LA INDUSTRIA

- Control y diagnóstico de la situación medioambiental
- Auditorías ambientales
- Asesoramiento técnico en medio ambiente
- Tramitación de expedientes
- Asistencia a la industria en los inspectores oficiales

• MEDIO MARINO

- Calidad del aguaitoral
- Cartografía del fondo marino (batimetrías y reconocimiento morfológico)
- Estudios del fondo marino (sedimentos, flora y fauna)
- Estudios previos para la ubicación de estructuras y soluciones submarinas (modelos de difusión)
- Fotografía y vídeos submarinos.

TECNOAMBIENTE, S.A. dispone de laboratorios propios equipados con modernas técnicas analíticas, homologados por la Junta de Saneamiento de la Generalitat de Catalunya y por el MOPT (Entidad Colaboradora de Organismos de Control). Pertenece a AELGUELE.