

PROPOSAL TO QUANTIFY THE EFFICACY OF TECHNOLOGICAL REQUIREMENTS OF STRUCTURAL MATERIALS FOR THE NUCLEAR SECTOR

Rodríguez Prieto, A.; Camacho López, A. M.; Sebastián Pérez, M. A.

ETSI Industriales. UNED

Equivalences between different standardized specifications of materials are usually established with respect to their main chemical and mechanical properties. However, the technological requirements described by equivalent specifications sometimes exhibit significant differences between them. Additionally, publications of key importance about the influence of the chemical composition on the mechanical behaviour of material have not often been taken into account.

The aim of this work is to develop a decision tool to distinguish between two different specifications based in the quantification of the efficacy of technological requirements. We have developed a deterministic algorithm that provides a quantifiable value of the efficacy of each requirement, which has been defined as Stringency Level. This methodology has been applied to SA 508 Class 3 nuclear specification included in ASME B&PV American Code and DIN 20MnMoNi55 as described by KTA German Nuclear Safety Rules. Finally, it has been concluded that DIN specification is more suitable than SA specification to be used in the manufacture of the primary loop for PWR-Type Nuclear Power Plants.

Keywords: *Materials; Requirements; Standards; Specifications; Algorithm; Nuclear*

PROPUESTA PARA CUANTIFICAR LA EFICACIA DE REQUISITOS TECNOLÓGICOS DE MATERIALES ESTRUCTURALES DESTINADOS AL SECTOR NUCLEAR

De forma habitual, se establecen equivalencias entre distintas especificaciones normalizadas de materiales con respecto a sus principales propiedades químicas y mecánicas. Sin embargo, los requisitos tecnológicos descritos por las especificaciones equivalentes, a menudo presentan diferencias significativas. Asimismo, en determinadas ocasiones, no se han tenido en cuenta algunos trabajos clave sobre la influencia de la composición química en el comportamiento mecánico del material.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta de decisión sobre dos especificaciones normalizadas diferentes, basada en la cuantificación de la eficacia de requisitos tecnológicos. Para ello, hemos desarrollado un algoritmo determinista que permite obtener un valor cuantificable definido como Nivel de Severidad. Esta metodología ha sido aplicada sobre especificaciones de materiales destinados al sector nuclear, como son las especificaciones SA 508 Clase 3 del código de fabricación americano ASME B&PV y la especificación DIN 20MnMoNi55 descrita por las normas de seguridad nuclear alemanas KTA. Finalmente, se ha concluido que la especificación DIN es más idónea para su empleo en la fabricación del circuito primario de una central nuclear tipo PWR.

Palabras clave: *Materiales; Requisitos; Normativa; Especificaciones; Algoritmo; Nuclear*

Correspondencia: arodrigue1838@alumno.uned.es Phone: +34615023257. Álvaro Rodríguez Prieto

1. Introducción

Durante la concepción de cualquier proyecto industrial que contenga la construcción o fabricación de algún elemento que deba proporcionar una función estructural, es de suma importancia tras la selección de materiales a emplear, realizar una adecuada selección de la normativa que contiene los requisitos tecnológicos que deben cumplir, con el objeto de asegurar que son adecuados para la finalidad inicialmente prevista. La disertación desarrollada en este trabajo corresponde con una problemática de indudable actualidad, ya que recientemente, un informe oficial (FANC, 2012) ha indicado que las fisuras detectadas en la vasija del reactor de la Central Nuclear Belga de Doel III, pudieron deberse a errores cometidos en el proceso de fabricación, y que por tanto esto pudiera haber sido motivado por el empleo de ciertos requisitos tecnológicos de materiales descritos en sus correspondientes especificaciones. Aunque, en base a las principales propiedades químicas y mecánicas del material, en la práctica se establecen equivalencias entre las distintas especificaciones normalizadas de materiales. No obstante, los requisitos tecnológicos especificados por las distintas normativas para los materiales considerados como equivalentes, en muchos casos presentan diferencias significativas, que adicionalmente en determinadas situaciones adquieren una mayor relevancia al ser elaboradas sin tener en cuenta algunos trabajos clave presentados en publicaciones científicas, que limitan en mayor medida el contenido máximo de algunos elementos de aleación e impurezas que forman parte de la composición del material.

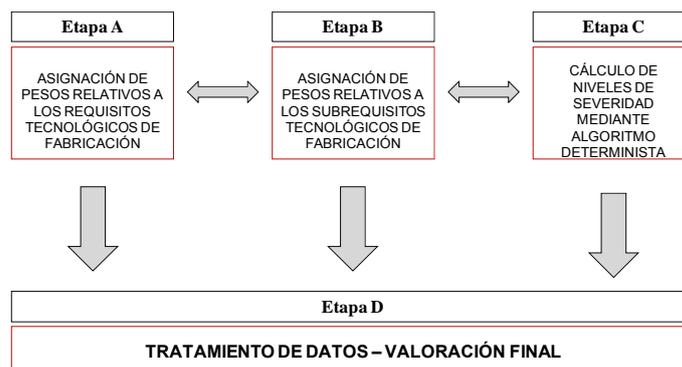
2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta de decisión sobre dos especificaciones normalizadas diferentes, basada en la cuantificación de la eficacia de requisitos tecnológicos. Para ello, por medio de un algoritmo determinista, de acuerdo con el esquema propuesto en la figura 1, se obtiene un valor cuantificable, definido como Nivel de Severidad (NS) para cada requisito evaluado. La metodología se ejemplifica en una aplicación particular sobre especificaciones de materiales forjados destinados a la fabricación de componentes del circuito primario – específicamente la vasija del reactor – de una central nuclear tipo PWR, como son las especificaciones equivalentes SA-508 Clase 3 del código de fabricación americano ASME B&PV y la DIN 20MnMoNi55 (IAEA, 2003) descrita en las normas de seguridad alemanas KTA.

3. Metodología

La metodología de análisis se basa en un proceso de ponderación numérica y cálculo de NS (figura 1), y se desarrolla empleando subrequisitos previamente definidos como se verá durante el desarrollo del apartado 3.

Figura 1: Desarrollo de la metodología basada en Niveles de Severidad de requisito



Por tanto, según se muestra en la figura 1, se proceden a desarrollar las cuatro etapas:

En las Etapas A y B, se procede a la asignación de pesos relativos, tanto para los requisitos como para los subrequisitos considerados en el análisis. La elección de requisitos y subrequisitos y la asignación justificada de pesos relativos, se han llevado a cabo mediante la metodología Delphi de juicio de expertos propuesta por Dalkey & Helmer (1963), en la cual han participado una selección de 5 expertos que destacan por su experiencia en selección de materiales para la fabricación de recipientes a presión destinados al sector nuclear. Así, los valores de ponderación elegidos han correspondido con las asignaciones que han presentado mayor frecuencia absoluta (Moda estadística) de entre las asignaciones propuestas por el panel de expertos. Finalmente, se ha obtenido para todas las valoraciones realizadas, una desviación típica (σ) menor del 0.1, aceptada por la totalidad de expertos.

Etapa A – Ponderación numérica de requisitos

La asignación se realiza de forma relativa con respecto a un peso total igual a 1 punto. Por tanto, el panel de expertos ha establecido como premisa los siguientes pesos relativos, con respecto a cada uno de los siguientes requisitos tecnológicos:

Requisitos químicos

Dada la importancia que adquiere la composición química sobre el comportamiento de los materiales de la vasija, sometida a las severas condiciones de operación. Se ha asignado a este requisito de composición química del material forjado un peso relativo de 6/10.

Requisitos mecánicos

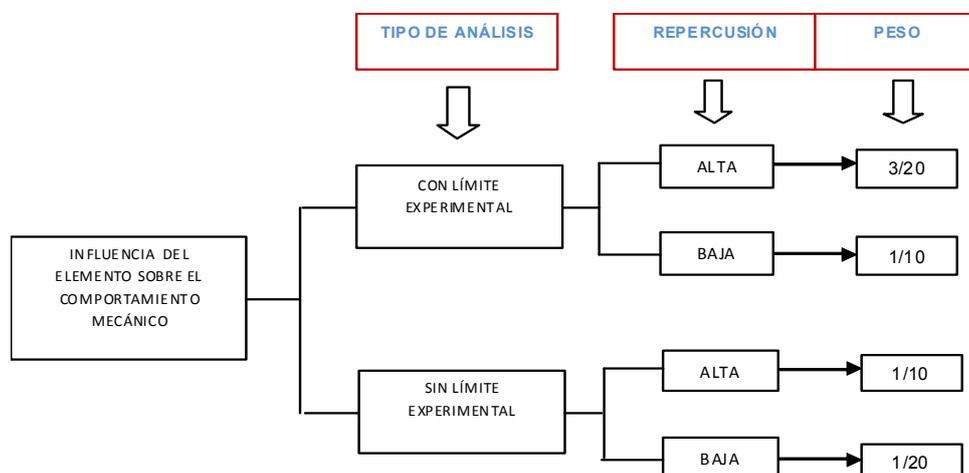
Para los requisitos mecánicos del material forjado se establece un peso de 4/10, al existir una mayor homogeneidad entre ambas normativas como se verá más adelante (tabla 2).

Etapa B – Ponderación numérica de subrequisitos

En esta Etapa, el panel de expertos ha procedido a la asignación de pesos relativos para cada uno de los subrequisitos químicos y mecánicos. Es decir, a los elementos químicos que se han considerado más importantes para ser incluidos en el análisis, debido a su posible influencia sobre las propiedades mecánicas y sobre la degradación que será causada por las condiciones de operación del reactor. Así mismo, se asignan pesos relativos a los subrequisitos mecánicos seleccionados.

- **Subrequisitos/Elementos químicos analizados:** En la Etapa B, se asignan pesos relativos, a los distintos elementos químicos de acuerdo con el diagrama presentado en la figura 2.

Figura 2. Asignación de pesos relativos a los subrequisitos químicos



Dada la ponderación numérica de subrequisitos, realizada en la Etapa A, se procede a la asignación de pesos relativos a cada uno de los subrequisitos o elementos químicos considerados, que resultan estar recogidos en alguna de las especificaciones de material forjado de empleo en la fabricación de componentes del circuito primario de una central nuclear tipo PWR. Los elementos valorados por el panel de expertos, de acuerdo con su influencia en las propiedades físico-químicas del acero, son los que se indican a continuación.

Vanadio: Se ha determinado que es necesario, un control estricto del contenido en vanadio ya que aumenta la susceptibilidad a la fragilidad por irradiación neutrónica (CSN, 2012). Por ello para este elemento, el código americano especifica un valor máximo de 0.05% para análisis de colada, con un valor permisible máximo para análisis de producto de 0.06 % de acuerdo con la norma ASTM A 788 (ASTM A 788, 2011). Por otro lado, las normas alemanas especifican un valor máximo de 0.02%. Siendo, por tanto, este último un criterio más restrictivo. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta y ya que no se procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/10 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Silicio: El valor máximo permitido por ASME B&PV para este elemento, coincide con el valor mínimo establecido por las normas alemanas, en el caso de las indicaciones realizadas por el código americano en sus requisitos suplementarios siempre y cuando el acero sea desoxidado a vacío. Siendo ASME B&PV por tanto más restrictivo, con respecto a este elemento de adición. Asimismo, en las cantidades máximas establecidas por ambas normativas, el silicio se disuelve en la ferrita y no tiene efecto apreciable sobre la estructura, ni sobre las propiedades físicas de la ferrita (Morrall F.R et al, 1985). Se ha considerado que la repercusión de este requisito es baja y ya que no se procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/20 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Azufre: El Azufre eleva la fragilidad de las virutas (Leyensetter A., 2006) disminuyendo su maquinabilidad. Asimismo, en esta clase de aceros reduce la energía absorbida por impacto (Hawthorne J.R, 1982). El material amparado por las normas KTA es más restrictivo, controlando el contenido de esta impureza. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta y ya que se considera límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/10 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Fósforo: La importancia del contenido en Fósforo sobre el comportamiento mecánico es un hecho comprobado, ya que, aumenta la fragilidad del material a partir de un umbral de 0.02% de contenido porcentual en peso del elemento (Steele L.E, 1993). Asimismo, el fósforo aumenta la susceptibilidad del material a la fragilidad por irradiación neutrónica (Hawthorne J.R, 1982). Teniendo en cuenta esto, los requisitos especificados por ASME B&PV para el material SA-508, tanto para análisis de colada como de producto no son suficientemente restrictivos. Sin embargo los requisitos especificados por las normas KTA, indican que el contenido en Fósforo no debe exceder de 0.012% en peso. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta, por tanto se establece un peso relativo de 3/20 ya que se considera límite experimental en su análisis de acuerdo con la figura 2.

Molibdeno: ASME B&PV requiere que el contenido en Molibdeno se encuentre entre 0.45% y 0.60% para análisis de colada, pudiendo alcanzar un valor de 0.68% en el caso de análisis de producto teniendo en cuenta las variaciones permisibles establecidas por la norma ASTM A 788 (ASTM A 788, 2011). Especificando las normas KTA, por otro lado, un rango de 0.40-0.55 %. Aunque pudiendo admitir valores hasta 0.63% siempre y cuando el inspector autorizado de la Agencia de Inspección Independiente, lo acepte. La diferencia de los requisitos de porcentajes de Molibdeno no es relevante, en las cantidades previstas. Se ha

considerado que la repercusión de este requisito es baja y ya que no procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/20 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Manganeso: El Manganeso en los aceros aleados, y en los contenidos porcentuales previstos, mejora su templabilidad y rebaja las temperaturas de transformación. En consecuencia, suele añadirse en proporciones superiores al 1% (De Garmo E.P et al, 2012). Con respecto a los requisitos de ASME B&PV y KTA, cabe señalar que son suficientes para proporcionar una mejora de la templabilidad. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta y ya que no se procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/10 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Nitrógeno: El nitrógeno reduce la ductilidad y la tenacidad (Kalpakjan S. & Schmid S.R., 2011) y proporciona fragilidad a los aceros. Se suele encontrar en forma combinada, formando nitruros. Las normas KTA, establecen como requisito de contenido máximo en Nitrógeno un valor de 0.013% para análisis de colada y análisis de producto. Sin embargo, para este último análisis, las normas permiten que el contenido de Nitrógeno sea superior a 0.013%, siempre y cuando lo autorice el inspector autorizado de la Agencia de Inspección Independiente y no supere el valor de 0.015%. El código americano no establece requisito sobre contenido máximo de Nitrógeno, en los requisitos de composición del material. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es baja y ya que no se procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/20 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Níquel: El Níquel aumenta la susceptibilidad del material a la fragilidad por irradiación neutrónica. Es más, algunos trabajos de investigación como los de Petrequin (Petrequin P. et al, 1979), Stofanak (Stofanak R. et al, 1993) o Nikolaeva (Nikolaeva A. et al, 1994) llegaron a la conclusión de que, para valores inferiores al 1% de Níquel no se observaron efectos negativos sobre las propiedades del material. Con respecto a las restricciones propuestas por KTA y ASME B&PV, cabe señalar que, para las normas alemanas el valor máximo admisible para contenido en porcentaje de Níquel es de un 0.85%. Siendo de un 1% según el código americano. Sin embargo, este último requisito podría alcanzar el 1.03% en el caso de considerar las variaciones permisibles para análisis de producto sobre los límites máximos impuestos de análisis de colada de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM A 788 (ASTM A 788, 2011). Ambas restricciones, se consideran son suficientes, de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente en los trabajos anteriormente mencionados. Así pues, se ha considerado que la repercusión de este requisito es baja, por tanto se establece un peso relativo de 1/10 ya que no se considera límite experimental en su análisis de acuerdo con la figura 2.

Niobio: Los requisitos de Niobio, son incluidos en la especificación ASME B&PV SA-508, expresando un contenido máximo del 0.01%. No obstante, dichos contenidos no se encuentran especificados según el material DIN 20MnMoNi55. Cabe señalar que la presencia de niobio aumenta la dureza del acero (Larrea J.A, 1980). Por lo que, parece adecuado que el código americano restrinja su contenido a un valor de 0.01%, ya que se requiere un adecuado comportamiento dúctil a altas temperaturas. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta y ya que no se considera límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/10 para este elemento de acuerdo con la figura 2.

Cromo: El Cromo destaca por ser un elemento estabilizador de la fase alfa, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste. Sin embargo, el contenido en Cromo se limita, debido a que contenidos superiores favorecen la formación de óxidos de cromo que precipitan en límite de grano, provocando fragilidad, como observaron Rosario y Villacorta (Rosario S. & Villacorta H., 1999) sobre

muestras de HY-80 equivalente al SA-508-4N Clase 1 (Nisbett E.G., 2005). Se ha considerado que la repercusión de este requisito es baja, dado que el resultado para el SA 508-4N Clase 1 no es extrapolable al SA-508 Clase 3 ya que el contenido en Cromo en el primero se sitúa entre 1.5 y 2%, mientras que en el segundo caso sitúa por debajo del 0.25%. Dado que no se procede a considerar límite experimental en su análisis, se establece un peso relativo de 1/20 para este elemento de acuerdo la figura 2.

Cobre: Odette y otros (Odette G.R. et al, 1996) llegaron a la conclusión de que, para niveles de Cobre inferiores al 0.1% no se forman precipitados ricos en cobre y así el cobre tiene poco efecto en el endurecimiento por radiación. Cuando el contenido de Cobre es mayor del 0.1 %, el incremento de la temperatura de transición debido a la fragilización por irradiación es mayor cuanto mayor sea el contenido en Cobre, comprobándose que muestra un comportamiento lineal con el contenido en Cobre hasta un valor de entre 0.25 y 0.3% (Odette G.R. et al, 1997). Teniendo en cuenta lo anterior, únicamente los requisitos suplementarios de ASME B&PV, así como las restricciones impuestas por las normas KTA para contenido en Cobre en el material de empleo en la región del núcleo (zona Belt - Line). Son suficientemente restrictivos de acuerdo con el estudio llevado a cabo por Odette y otros, en 1996. Se ha considerado que la repercusión de este requisito es alta, por tanto se establece un peso relativo de 3/20, ya que se ha considerado límite experimental en su análisis de acuerdo con la figura 2.

- **Subrequisitos mecánicos más importantes:** Análogamente, se ha considerado analizar los siguientes subrequisitos mecánicos tal y como establecen las especificaciones de materiales analizadas, estableciendo los siguientes pesos relativos, de acuerdo con los requisitos establecidos a 300°C (tabla 1), debido a que dicha temperatura se encuentra dentro del intervalo de temperatura de un reactor PWR, siendo una temperatura típica de funcionamiento.

Los requisitos analizados a 300°C son el Límite elástico al 0.2% de deformación, la Resistencia máxima a tracción y el Módulo de elasticidad. Ya que el alargamiento a la fractura en porcentaje no corresponde con un requisito especificado a altas temperaturas.

Tabla 1. Ponderación numérica para el cálculo del NS de subrequisitos mecánicos

PROPIEDAD	PESO RELATIVO
Resistencia máxima (MPa)	4/10
Límite elástico – 0.2% (MPa)	3/10
Módulo de elasticidad (MPa)	3/10
TOTAL	1

Etapa C – Clasificación de acuerdo con el subrequisito a evaluar y determinación de su Nivel de Severidad

Los NS, se ha considerado presenten valores comprendidos entre 1 (Nivel de Severidad bajo), pasando por 2 (Nivel de Severidad leve), 3 (Nivel de Severidad medio), 4 (Nivel de Severidad elevado) hasta un valor igual a 5 (Nivel de Severidad máximo – $NS_{Máx}$).

La metodología para la asignación de NS a los diferentes subrequisitos tecnológicos se ha desarrollado con ayuda de los casos que se indican a continuación, en función del tipo de subrequisito y de consideraciones tenidas en cuenta en su análisis:

Caso 1.- Subrequisito tecnológico no especificado por alguna de las dos normativas

Se asigna $NS=1.00$ al subrequisito no especificado por el código/normas:

$$NS=1.00 \quad (1)$$

Para el cálculo del NS del subrequisito especificado por la otra normativa se distinguen dos subcasos, dependiendo de si se ha considerado límite experimental en el análisis realizado:

Subcaso 1.1.- Con Límite Experimental considerado

Se procede a la asignación de los siguientes NS en función del valor de L_c (Valor especificado por la otra normativa para el subrequisito) y en función del valor de L_e (Límite experimental de referencia):

$$NS=1.00 \quad \text{si } L_c \geq L_e \quad (2)$$

$$NS=2.00 \quad \text{si } 0.9 L_e \leq L_c < L_e \quad (3)$$

$$NS=3.00 \quad \text{si } 0.8 L_e \leq L_c < 0.9 L_e \quad (4)$$

$$NS=4.00 \quad \text{si } 0.7 L_e \leq L_c < 0.8 L_e \quad (5)$$

$$NS=5.00 \quad \text{si } L_c < 0.7 L_e \quad (6)$$

Como se puede observar, se considera que el Nivel de Severidad (NS) sea igual a 5, cuando el límite especificado por la normativa, L_c sea inferior a $0.7 L_e$. Es decir, se ha considerado un factor de seguridad $\delta = 0.7$, para que el NS considerado sea máximo, de tal manera que $L_c < \delta L_e$.

Subcaso 1.2.- Sin Límite Experimental considerado

En este caso, al no tener límite experimental como referencia se considera asignar un NS igual a 3, por tanto:

$$NS=3.00 \quad (7)$$

Caso 2.- Subrequisito tecnológico especificado por ambas normativas

Se distinguen dos subcasos, de acuerdo con la consideración o no de trabajos experimentales en el análisis:

Subcaso 2.1.-Con Límite Experimental considerado

De forma análoga al subcaso 1.1, se procede a la asignación NS en función del valor de L_c y en función del valor de L_e de acuerdo con las Ecs 2-6:

Subcaso 2.2.-Sin Límite Experimental considerado

Este subcaso, se divide en la asignación de NS a los subrequisitos químicos y a los subrequisitos mecánicos:

a) Subrequisitos químicos

1) *Si el elemento de adición conviene se encuentre en la mayor proporción:*

Se asigna $NS=5.00$ al subrequisito de mayor valor, y se designa éste como L_{C1} de acuerdo con la Ec.8:

$$NS_{LC1}=5.00 \quad (8)$$

Para el cálculo del NS del subrequisito especificado por el otro código/norma, se procede de acuerdo con la Ec.9:

$$NS_{LC2} = \frac{L_{C2}}{L_{C1}} NS_{Máx} \quad (9)$$

2) *Si la impureza o elemento de adición, conviene se encuentre en la menor proporción posible:*

Se asigna $NS=5.00$ al subrequisito de menor valor, y se designa éste como L_{C2} :

$$NS_{LC2}=5.00 \quad (10)$$

Para el cálculo del NS del subrequisito especificado por el otro código/norma, se procede de acuerdo con la Ec.11:

$$NS_{LC1} = \frac{L_{C2}}{L_{C1}} NS_{Máx} \quad (11)$$

b) Subrequisitos mecánicos

Se asigna $NS=5.00$ al subrequisito de mayor valor, y se designa éste como L_{C1} :

$$NS_{LC1}=5.00 \quad (12)$$

Para el cálculo del NS del subrequisito especificado por la otra normativa, se procede de acuerdo con la Ec.13:

$$NS_{LC2} = \frac{L_{C2}}{L_{C1}} NS_{Máx} \quad (13)$$

Etapa D – Tratamiento de datos y obtención de la valoración final

En la tabla 2, se presentan los requisitos químicos especificados por las dos normativas analizadas, especificando de acuerdo con la disertación realizada en el apartado 3.1, si se considera límite marcado por trabajos experimentales, y si el contenido en dicho elemento se considera beneficioso para las propiedades mecánicas del material, en un valor más cerca del límite superior o inferior dentro del rango especificado.

Tabla 2: Tabla comparativa de requisitos químicos de material forjado [Elaboración propia de acuerdo con el apartado 3.1 del presente artículo y las referencias SA 508, 2010 y KTA 3201.1, 1998]

Elemento	SA-508 (Colada)	DIN 20MnMoNi 55 (Colada)	¿Límite experimental considerado? En caso afirmativo, ¿Cuál?	¿Se considera, se debe encontrar en la menor o mayor proporción posible?
VALORES MÁXIMOS PORCENTUALES EN PESO				
V	0.05	0.02	-	<
Si	0.40	0.30	-	<
S	0.025	0.008	-	<
P	0.025	0.012	0.02	N/A
Ni	1.00	0.80	1.00	N/A
Nb	0.01	N.E	-	<
N	N.E	0.013	-	<
Mo	0.60	0.55	-	<
Mn	1.20 ^{*1} -1.50	1.20 ^{*1} -1.50	-	N/A ^{*3}
Cu	0.20/0.10 ^{*2}	0.12	0.10	N/A
Cr	0.25	0.20	-	<

Abreviatura en tabla: N.E. No Especificado; - No considerado; < Menor

NOTA ^{*1}: Se especifica valor mínimo, en este caso.

NOTA ^{*2}: Requisito sólo especificado para la Zona Belt line (barras de control).

NOTA ^{*3}: Se especifican límite inferior y superior, coincidentes entre ambas normativas.

De acuerdo con lo expuesto en la tabla 2 se procede al cálculo de los Niveles de Severidad (NS) para los subrequisitos químicos del material forjado. El cálculo del Nivel de Severidad (NS) global de requisitos químicos del material forjado, se presenta en la tabla 3 a continuación, empleando la ponderación numérica establecida en la Etapa B del proceso:

Tabla 3: Cálculo del Nivel de Severidad de requisito químico para el material forjado especificado por el código ASME B&PV y las normas KTA

ELEMENTO	CASO	ASME B&PV	KTA	PESO RELATIVO	NS RELATIVO ASME B&PV	NS RELATIVO KTA
		X_i	Y_i	p_i	$X_i \cdot p_i$	$Y_i \cdot p_i$
V	2.2 a.2)	2.00	5.00	1/10	0.20	0.50
Si	2.2 a.2)	3.75	5.00	1/20	0.19	0.25
S	2.2 a.2)	1.60	5.00	1/10	0.16	0.50
P	2.1	1.00	5.00	3/20	0.15	0.75

Ni	2.1	2.00	3.00	1/10	0.20	0.30
Nb	1.2	1.00	3.00	1/10	0.10	0.30
N	1.2	1.00	3.00	1/20	0.05	0.15
Mo	2.2 a.2)	4.60	5.00	1/20	0.23	0.25
Mn	2.2 a.1)	5.00	5.00	1/10	0.5	0.50
Cu	2.1	1.00	2.00	3/20	0.15	0.30
Cr	2.2 a.2)	4.00	5.00	1/20	0.20	0.25
		ΣX_i	ΣY_i	Σp_i	$\Sigma X_i \cdot p_i$	$\Sigma Y_i \cdot p_i$
TOTAL		28.95	52.00	1.00	2.13	4.05

Análogamente al caso de los subrequisitos químicos, se proceden a considerar los subrequisitos mecánicos mínimos especificados a una temperatura de 300°C. En la siguiente tabla (tabla 4) se muestran de forma comparativa los requisitos de resistencia máxima, límite elástico y módulo elástico a 300°C, ya que esta temperatura se encuentra en el intervalo de operación del reactor. En el caso de los valores de límite elástico especificados por ASME B&PV se ha interpolado linealmente el valor, ya que el código sólo especifica dicho valor hasta una temperatura de 275°C.

Tabla 4: Comparación de requisitos de propiedades mecánicas mínimas especificadas por ASME B&PV y KTA, a 300°C [Elaboración propia conforme a SA-508, 2010 y KTA 3201.1, 1998]

Propiedad	Especificación	
	ASME B&PV	KTA
	SA-508 Cl.3	DIN 20MnMoNi55
Resistencia máxima (MPa)	552	505
Límite elástico – 0.2% (MPa)	293	330
Módulo de elasticidad (MPa)	174	192

El cálculo del Nivel de Severidad (NS) global de requisitos mecánicos a 300°C del material forjado se presenta en la tabla 5 a continuación.

Tabla 5: Cálculo del Nivel de Severidad de requisito mecánico para el material forjado especificado por el código ASME B&PV y las normas KTA

	ASME B&PV	KTA	PESO	ASME B&PV PONDERADO	KTA PONDERADO
PROPIEDAD MECÁNICA	X_i	Y_i	p_i	$X_i \cdot p_i$	$Y_i \cdot p_i$
RESISTENCIA MÁXIMA	5.00	4.57	4/10	2.00	1.83
LÍMITE ELÁSTICO (0.2%)	4.44	5.00	3/10	1.33	1.50
MÓDULO DE ELASTICIDAD	4.53	5.00	3/10	1.36	1.50
	ΣX_i	ΣY_i	Σp_i	$\Sigma X_i \cdot p_i$	$\Sigma Y_i \cdot p_i$
TOTAL	13.97	14.57	1.00	4.69	4.83

4. Resultados

En la tabla 6, se calcula el Nivel de severidad global asociado a las especificaciones SA-508 Clase 3 descrita por ASME B&PV y DIN 20 MnMoNi55 descrita por las normas KTA.

Tabla 6: Cálculo del Nivel de Severidad global para el material forjado especificado por el código ASME B&PV y las normas KTA

	ASME B&PV	KTA	PESO	ASME B&PV PONDERADO	KTA PONDERADO
REQUISITO TECNOLÓGICO	X_i	Y_i	p_i	$X_i \cdot p_i$	$Y_i \cdot p_i$
REQUISITOS QUÍMICOS	2.13	4.05	6/10	1.28	2.43
REQUISITOS MECÁNICOS	4.69	4.83	4/10	1.88	1.93
	ΣX_i	ΣY_i	Σp_i	$\Sigma X_i \cdot p_i$	$\Sigma Y_i \cdot p_i$
TOTAL	6.82	8.88	1.00	3.16	4.36

5. Conclusiones

Con carácter general, los requisitos químicos de material forjado descritos en las normas KTA son más restrictivos, presentando un NS igual a 4.05 (Nivel de severidad elevado) significativamente superior al NS igual a 2.13 (Nivel de severidad leve) presentado por los requisitos especificados por el código ASME B&PV.

El material forjado descrito por ASME B&PV requiere unas características mecánicas que lo sitúan como más resistente que el material especificado por KTA. Asimismo, con respecto a la valoración del requisito especificado para el módulo de elasticidad a 300°C, el material DIN 20MnMoNi55 especificado por las normas KTA permite un valor de rigidez mayor asociado a un mayor valor mínimo de este requisito. Lo que implica que, para los esfuerzos constantes a los que se ve sometido el material, las deformaciones producidas serían menores que las que se generarían considerando los límites especificados por el código ASME B&PV para el material SA-508 Clase 3. Como valoración global cuantificable para los requisitos mecánicos, el NS obtenido para el material especificado por KTA es superior (4.83) al obtenido para el material descrito por ASME B&PV (4.69).

Aunque es importante reseñar que del resultado anteriormente obtenido, se deduce que los requisitos mecánicos son bastante similares, decantándose la balanza sensiblemente a favor de la especificación DIN según KTA. Resulta importante valorar asimismo, que el requisito mínimo de resistencia máxima a tracción especificado por el código ASME B&PV resulta ser un 9.3% mayor que el especificado por las normas KTA, lo que hace presumir que dicho material presente una mayor resistencia a la distorsión térmica, ya que una resistencia elevada a la tracción, compensa en cierto grado la distorsión térmica (CSN, 2012) debida al establecimiento de tensiones internas como consecuencia del elevado gradiente de temperatura que se establece a través de los elevados espesores de pared del material empleado en la fabricación de componentes del circuito primario de cualquier Central Nuclear.

Finalmente, se ha obtenido como valoración global cuantitativa que los requisitos tecnológicos del material forjado especificado por las normas KTA para su empleo en la fabricación del circuito primario de una central nuclear PWR son más severos, presentando un NS igual a 4.36 (nivel de severidad elevado), mientras que la especificación descrita en el código ASME B&PV para el mismo fin, presenta un NS igual a 3.16 (nivel de severidad medio).

Con respecto a la metodología propuesta, es importante destacar que, ésta puede aplicarse a cualquier par de especificaciones normalizadas de materiales con interés industrial, realizando para ello, una adecuada labor de investigación para definir los requisitos según norma y realizar una completa búsqueda y selección de trabajos relacionados con el comportamiento del material en las condiciones de operación del mismo.

6. Referencias

- ASTM A 788/ A 788M (2011): "Specification for steel forgings. General requirements". ASTM International, Philadelphia (USA).
- CSN (2012): "Física y Tecnología nucleares", C14, 5-6. Consejo de Seguridad Nuclear (España).
- Dalkey N. C., & Helmer O. (1963): "An experimental application of the Delphi method to the use of experts". *Management Science*, 9 (3), 458-467.
- De Garmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. (2012): "Materials and processes in manufacturing". Vol I. Ed. John Wiley & Sons, Hoboken - New Jersey (USA).

- FANC (2012): "Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3". Federal Agency for Nuclear Control (Belgium).
- Hawthorne, J.R. (1982): "Significance of selected residual elements to the radiation sensitivity of A302-B steels". *Nuclear Technology*, 59(3), 440-455.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), [2003]: "Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety – Primary components in PWRs", IAEA Publications, Vienna (Austria).
- Kalpakjian S., Schmid S.R (2011): "Manufacturing engineering and technology". Ed. Pearson Inc, New York (USA).
- KTA 3201.1 (1998): "Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors. Part 1: Materials and Product Forms". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- Larrea J.A (1980): "Niobio: Un análisis de la situación del mercado nacional e internacional". *Revista Siderurgia*, Buenos Aires (Argentina), 253-254.
- Leyensetter A. (2006): "Tecnología de los oficios metalúrgicos". Ed. Reverté, Barcelona (España).
- Morral F.R, Jimeno E., Molera P. (1985): "Metalurgia general". Tomo II. Ed. Reverté, Barcelona (España).
- Nikolaeva A., Nikolaev Y., Krjoikov A., (1994): "The contribution of grain boundary effects to low-alloy steel irradiation embrittlement". *Journal of Nuclear Materials*, 218 (3), 85-93.
- Nisbett E.G (2005): "Steel Forgings: Design, Production, Selection, Testing, and Application". ASTM International Special Technical Publications, Philadelphia (USA).
- Odette, G.R, Lucas, G., Wirth, B., Liu, C, (1997): "Current understanding of the effects of environmental and irradiation variables on RPV embrittlement". *Proceedings of the 24th Water Reactor Safety Information Meeting*. Bethesda, Maryland, 2, 1-23. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC (USA).
- Petrequin P., Soulat, P., Houssin, B., (1979): "Effect of residual elements and Nickel on the sensitivity to irradiation embrittlement of SA508 CL.3 pressure vessel steel and weld". *Thermal annealing and surveillance of reactor pressure vessels*, 18-28. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria).
- SA-508/SA-508M (2010): "Specification for quenched and tempered vacuum – treated carbon and alloy steel forgings for pressure vessels". ASME B&PV II Section A. American Society of Mechanical Engineers, New York (USA).
- Steele.L.E (1993): "In radiation embrittlement of nuclear reactor pressure vessels steels: An international review, 4, 432. ASTM International, Philadelphia (USA).
- Stofanak R., Poskie T., Li Y., and Wire G., (1993): "Irradiation damage behaviour of low alloy steel wrought and weld materials". *Proceedings of the 6th International Symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems - Water Reactors*, August 1-5, 757-763. San Diego, California (USA).