
UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS DOCTORAL:
PREDICCIÓN DE PROPIEDADES
MECÁNICAS MEDIANTE SIMULACIÓN DEL
PROCESO DE FUNDICIÓN

Autor:
D. TOMÁS GÓMEZ RODRÍGUEZ

Directores:
Dr. Jesús Manuel Alegre Calderón
Dr. Isidoro Iván Cuesta Segura

Burgos, Julio de 2023

AGRADECIMIENTOS

Como no podía ser menos, quiero agradecer en primer lugar a mi familia su cariño, paciencia y el apoyo que me han dado todos estos años. También el apoyo de mis profesores de UBU y de mi jefe de GET, que vieron un doctorado en la labor diaria de un ingeniero; en general muchísimas gracias a todos los compañeros de GET que han vivido con la misma ilusión que yo estos años de doctorado. Gracias también al mundo de la fundición en España, a todos esos amigos que me habéis acompañado estos años.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
0. NOMENCLATURA	3
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	4
1.1. INTRODUCCIÓN	4
1.2. OBJETIVOS	8
2. METODOLOGÍA	10
2.1. PIEZAS ESTRUCTURALES DE MULTIPLICADORA	10
2.2. METODOLOGÍA DE SIMULACION	14
2.3 METODOLOGÍA DE AJUSTE	16
3. CONCLUSIONES, TRABAJOS COMPLEMENTARIOS Y POSIBILIDADES DE FUTURO	18
3.1. CONCLUSIONES	18
3.1.1. Integración de la simulación de fundición en el cálculo estructural	18
3.1.1 Predicciones por defecto de MAGMA	21
3.1.3 Ajuste de la predicción de propiedades mecánicas	22
3.2 TRABAJOS COMPLEMENTARIOS NO PUBLICADOS	23
3.2.1 Predicciones por defecto sobre material EN-GJL-250. Resistencia última	23
3.2.2 Predicción de tensiones residuales	24
3.2.3 Predicción de propiedades de fractura	28
3.3 TRABAJO FUTURO.....	30
4. BIBLIOGRAFÍA	31
5. ARTICULOS PUBLICADOS	36

NOMENCLATURA

DNVGL, Det Norske Veritas. Compañía de aseguramiento de la calidad y gestión de riesgos integrada en el grupo DNV

GL, Germanischer Lloyd. Compañía de aseguramiento de la calidad y gestión de riesgos.

Precursora de DNVGL

IEC, International Electrotechnical Commission. Organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y de tecnologías relacionadas

FKM. Guías de cálculo estructural editadas por Forschungskuratorium Maschinenbau (Frankfurt/Main), bajo la supervisión principal del IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH (Dresden). Se publican por VDMA Verlag GmbH

LRF, Load Reserve Factor.

SF, Safety Factors.

LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics.

GET, Gamesa Energy Transmission. Compañía fabricante de multiplicadora eólica. Subsidiaria de Siemens Gamesa Renewable Energy, que a su vez está integrada en Siemens Energy.

PPH. Tipo de multiplicadora con dos etapas planetarias y una paralela

M_x (kN m), componente principal del par que se transmite en una turbina

M_y (kN m), componente residual del par que se transmite en una turbina

PC1, Planet carrier of the first stage. Portaplanetas de la primera etapa de multiplicación

HTC ($W/m^2/K$), Heat Transfer Coefficient. Resistencia térmica

GTE-1. Geometría modelo utilizada por GET en sus caracterizaciones de material

MAGMA, MAGMAsoft. Software de simulación del proceso de fundición desarrollado por la compañía MAGMA Gießereitechnologie GmbH

R_m (MPa). Resistencia última

K_{Ic} (MPa $m^{1/2}$). Tenacidad a fractura para condiciones de deformación plana

J_i (kJ m^2). Integral J

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria de la energía, el sector eólico es uno de los que ha experimentado un mayor crecimiento en los últimos años, convirtiéndose en un área clave para la transición energética. La energía eólica es un recurso renovable que podría cubrir un importante porcentaje de la demanda global que, a pesar de ser una tecnología consolidada, se enfrenta a una demanda constante de mejora de la eficiencia de sus instalaciones y al reto de asociar a su producción unos sistemas de almacenamiento que permitan mejorar la inestabilidad de la relación entre producción y demanda.



Figura 1.1. Multiplicadora de última generación. Tres etapas planetarias y una paralela

La exigencia del sector somete los diseños de las turbinas eólicas a certificación siguiendo los criterios de guías específicas que tienen en cuenta las particularidades de las turbinas. En estas guías de certificación, aparte de regular aspectos específicos de las turbinas, se establecen criterios de cálculo que hacen referencia a la normativa internacional de materiales. Los criterios de cálculo que se establecen dejan cierto grado de libertad al diseñador, llegando, en algunas cuestiones a que se puedan interpretar de forma ambigua, particularmente en el ámbito de los materiales.

La metodología del sector para cálculo estructural se apoya principalmente en la establecida por la compañía certificadora DNVGL [1], fundamentada a su vez en la de su precursora GERMANISCHER LLOYD [2-8], GL. La normativa internacional del sector propiamente dicha [9-13] es la desarrollada por el organismo International Electrotechnical Commission, IEC. Las guías FKM [14, 15], aunque no son específicas del sector, también suelen ser aceptadas en ciertos aspectos.

En este tipo de metodologías de cálculo, la evaluación de un cálculo estructural se fundamenta en asegurar un “load reserve factor”, LRF, concepto que representa la relación entre la resistencia que ofrece el material seleccionado y el nivel de stress/strain obtenido del cálculo numérico. En las etapas iniciales del cálculo estructural de una pieza fabricada a partir de un bruto de fundición, posiblemente no se conoce el proveedor/proveedores de fundición que van a suministrar la pieza, por lo que no es posible establecer con seguridad las condiciones de proceso que determinarán la resistencia del material. Sin embargo, es necesario establecer unos admisibles de material mínimos que permitan avanzar en el cálculo. En esas etapas iniciales, los admisibles de material mínimos se suelen tomar de las normas internacionales de material [16, 17], que los especifican en función de rangos de espesor de pieza. Teniendo en cuenta unos ciertos “safety factors” (SF), los admisibles de material mínimos de las normas internacionales pueden ser usados directamente en evaluaciones de cálculo estructural, por ejemplo, el límite elástico en la evaluación a extrema; también pueden servir para calcular otras propiedades mecánicas avanzadas sin llegar a realizar ensayos específicos, como es el caso de la resistencia última en el cálculo del límite de fatiga de una curva sintética. Los SF aplicados trabajando con los admisibles de material mínimos de las normas internacionales son conservadores; en el caso de establecer admisibles de material a partir de ensayos propios, se podría trabajar con SF menos conservadores. En cualquier caso, la aplicación de los factores de seguridad en los

cálculos estructurales de fundidos se fundamenta en una declaración de niveles de calidad definidos en las diferentes normas que regulan los métodos de inspección [18, 20].

Dependiendo del material (dúctil o frágil), de los niveles de calidad que se soliciten en pieza y del LRF alcanzado, la normativa de certificación puede exigir una evaluación de cálculo avanzada, por ejemplo, una evaluación según la mecánica de la fractura elástico lineal, LEFM. Este tipo de evaluación de cálculo avanzada necesitaría sus propios admisibles de material y, normalmente, una validación de material sobre prototipo. Las principales guías genéricas de cálculo en evaluaciones de fractura son BS7910:2019 [21] y FKM Fracture Mechanics Proof of Strength for Engineering Components [15], aunque, de forma específica para portaplanetas fabricados en el material EN-GJS-700-2, también es muy interesante la VDMA 23902: 2014 [22].

Considerando este entorno, la simulación del proceso de fundición puede ser una herramienta que se integre en el diseño de piezas estructurales eólicas, por lo que esta investigación evalúa la predicción de propiedades mecánicas de uno de los software comerciales utilizado en el sector.

Como punto de partida, se debe tener en cuenta que el software de simulación de fundidos es una ayuda que tradicionalmente suele estar ubicada en el departamento de ingeniería de procesos de las fundiciones, siendo utilizado principalmente para asegurar la ausencia de defectos internos de contracción en las piezas [23], como se puede observar en la Figura 1.2.

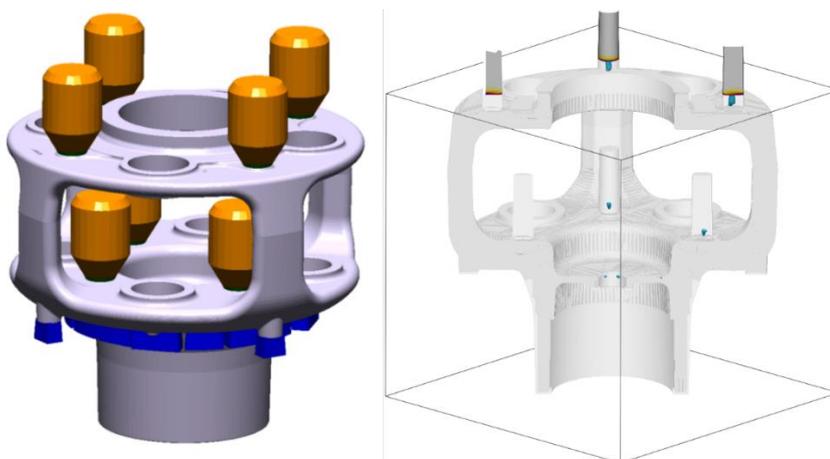


Figura 1.2. Predicción de sanidad interna de un portaplanetas

Sin embargo, como se puede ver en trabajos como los de Aloe y Antón [24], desde hace tiempo se trata de alcanzar precisión en la predicción de propiedades mecánicas de piezas fundidas. En información más reciente, se puede comprobar que la evolución de los software más avanzados se ha centrado precisamente en la predicción de propiedades mecánicas. En ese sentido, Sturm y Schaefer [25] ofrecen una buena visión general de los logros alcanzados en uno de los software comerciales más extendidos. Centrándose en la fundición nodular, el grupo de trabajo de Thomser [26] llega a proponer la predicción de propiedades de fatiga a partir del cálculo de las propiedades mecánicas básicas que puede llegar a ofrecer un software de simulación de fundido. En las investigaciones lideradas por Pusch [27], estableciendo la influencia de la microestructura en la propagación de grieta de la fundición nodular, se abre la posibilidad de calcular predicciones de las propiedades a fractura de este material. Esa misma idea es desarrollada con una visión más práctica por Langenberg [28], describiendo una nueva metodología en la que se integra la simulación de fundido en las evaluaciones estructurales a fractura.

Aunque la evolución del software ha sido extraordinaria, se debe tener en consideración que los defectos de porosidad en los que se centró históricamente la predicción, no están considerados en las predicciones. De la misma forma, la reacción molde-metal [29], que puede tener una importancia determinante en las propiedades superficiales, tampoco es tenida en cuenta en la predicción de propiedades mecánicas del software de fundidos.

1.2. OBJETIVOS

Teniendo siempre presente que en la evaluación del cálculo estructural de una pieza de fundición es imprescindible aportar unos admisibles de material que ofrezcan seguridad, Gamesa Energy Transmission, S.A. (GET) planteó una investigación centrada en los siguientes objetivos:

- Establecimiento de una base conceptual que sirva de nexo entre las guías de certificación, las normas internacionales de materiales y la simulación de fundido.
- Desarrollo de una metodología de trabajo que integre la simulación de fundido en los cálculos estructurales, centrada en la predicción de propiedades mecánicas.
- Evaluación de la predicción por defecto que ofrece el software de simulación de fundido.
- Validación de una metodología de simulación del proceso de fundición adecuada a la predicción de propiedades mecánicas.
- Ajuste de predicciones en base a una metodología que dé respuesta a los requisitos de la nueva IEC 61400-8 [13].

En función de estos objetivos, la presente Tesis se sustenta en un compendio de tres artículos de investigación publicados en la revista *International Journal of Metalcasting*, revista asociada a la American Foundry Society:

- T. Gómez, I. I. Cuesta and J. M. Alegre. Critical review on allowable material data selection in structural design of large castings for wind turbine gearboxes. *Inter Metalcast* (2022). <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00833-6> [30]
- T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Mechanical property prediction based on casting process simulation for structural parts in wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-00977-z> [31]

- T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Adjustment of mechanical property predictions for structural castings in the wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01056-z> [32]

El primer artículo técnico establece la base conceptual y la metodología que integra la simulación de fundido en los cálculos estructurales. A partir de los resultados por defecto del software, el segundo artículo ofrece una metodología de simulación adecuada a la predicción de propiedades mecánicas sobre piezas estructurales eólicas. El tercer artículo finaliza la investigación realizando un ajuste de predicciones sobre uno de los materiales utilizados en este sector industrial (EN-GJS-500-14 [16]).

Aparte de los artículos técnicos, la propia Tesis se compone de tres capítulos, sin tener en cuenta el correspondiente a la bibliografía. En el capítulo actual se realiza una introducción y se presentan los objetivos que se pretenden alcanzar con este trabajo. El Capítulo 2 ofrece unas nociones básicas sobre las piezas estructurales de multiplicadora sobre las que se ha focalizado el trabajo, sobre la metodología de trabajo seguida en la simulación de fundido y sobre los ajustes realizados. La Tesis termina con un capítulo de conclusiones que aporta además una visión sobre aspectos no recogidos en los artículos técnicos publicados y sobre posibles futuros trabajos.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. PIEZAS ESTRUCTURALES DE MULTIPLICADORA

Teniendo en cuenta la oportunidad de optimización de las prestaciones de los materiales que se plantea en el primero de los artículos publicados [30] el trabajo de investigación se centró en dos tipos de pieza que son fundamentales en el diseño de multiplicadoras para el sector eólico: Torque arm y Planet carrier. Estas piezas se fabrican habitualmente en los materiales EN-GJS-400-18-LT y EN-GJS-700-2 respectivamente. Teniendo en cuenta un diseño de máquina PPH (Figura 2.1), dos etapas planetarias y una paralela, las funciones de estas piezas se describen a continuación [30]:

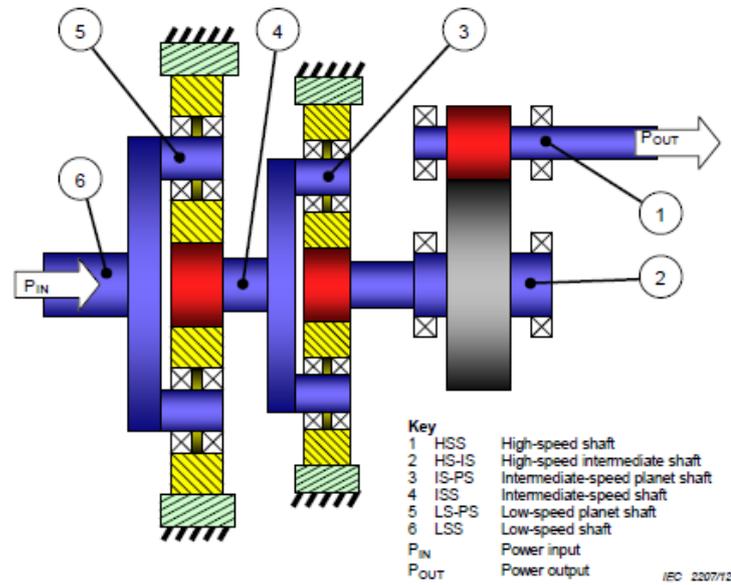


Figura 2.1. Esquema multiplicadora PPH

El torque arm (Figura 2.2) es la pieza que asegura la transmisión del par M_x a la multiplicadora mediante su conexión con la nacelle (Figura 2.3) a través de los elastómeros; esta unión no es perfectamente flexible por lo que a la multiplicadora también le llega algo de carga parásita M_y . Sus principales funciones son:

- Transmitir el momento torsor.
- Rigidizar la corona de la primera etapa de multiplicación.
- Soportar el rodamiento del portasatélites de primera etapa.
- Cierre del conjunto como sistema de engrasado.
- Permitir el izado del conjunto a la nacelle en el momento del montaje de la turbina.
- Permitir la inspección visual de la primera etapa de multiplicación.

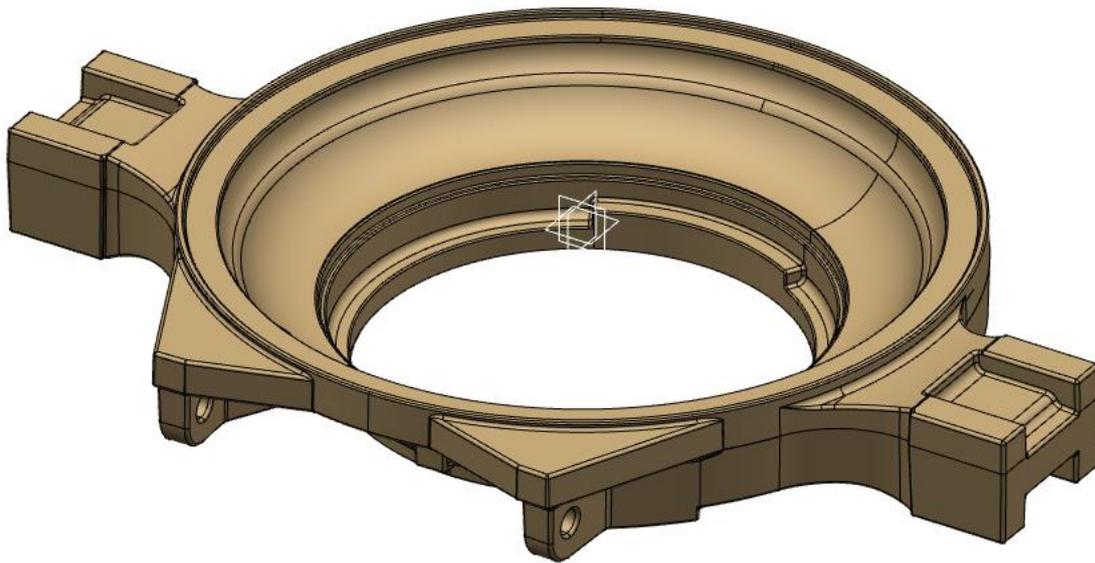


Figura 2.2. Torque arm eólico

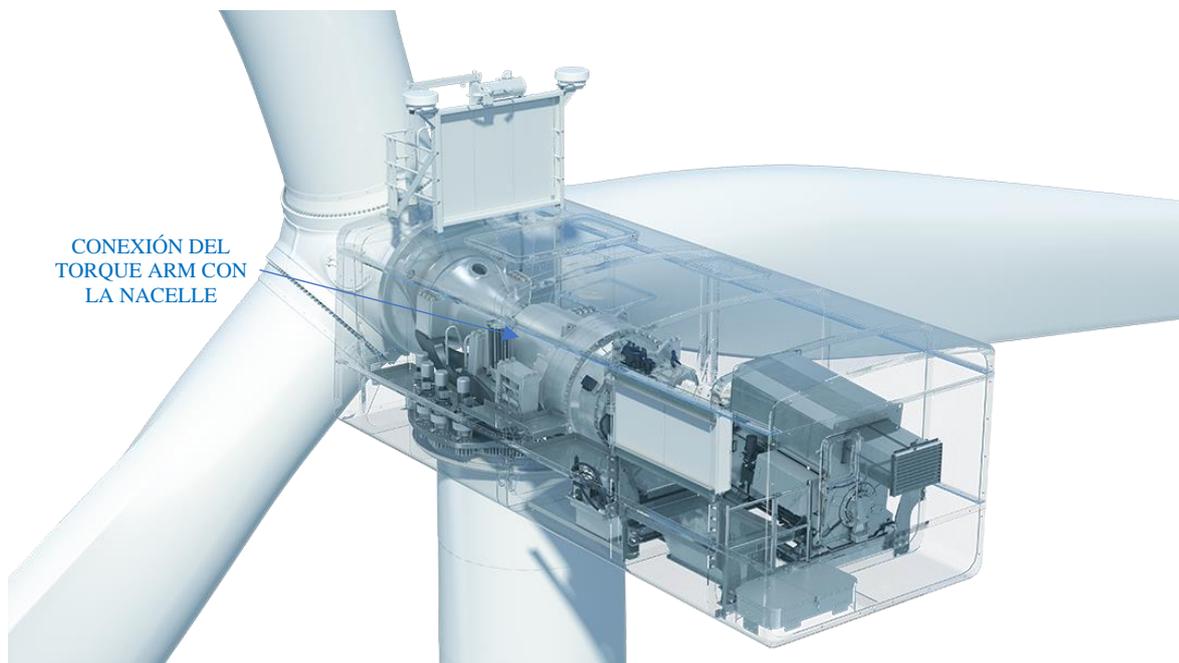


Figura 2.3. Conexión del torque arm con la nacelle

El portasatélites de primera etapa (Figura 2.4), PC1, es la pieza que transmite el par M_x a los satélites y, a través de estos, al solar de primera etapa (salida del par hacia la segunda etapa de multiplicación). Se necesita un material con un grado de resistencia importante, pero que asegure una cierta flexibilidad dentro del rango que puede ser asumido por la geometría del dentado.

Debe asegurar estas funciones:

- Conexión con el main shaft.
- Transmisión del momento torsor.
- Transmitir su propio peso y el de planetas y ejes planetas al torque arm y al transition.

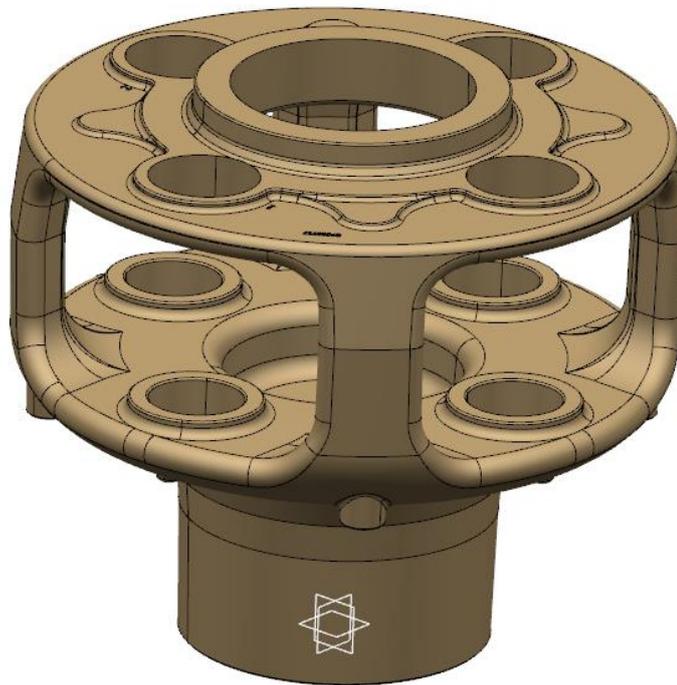


Figura 2.4. Planet carrier eólico

2.2. METODOLOGÍA DE SIMULACION

A partir del “casting background” del primer artículo [30], en el segundo artículo publicado [31] se evalúan los resultados de propiedades mecánicas que puede ofrecer por defecto un software de simulación de fundidos. Teniendo en cuenta que para la predicción de defectos de contracción Siemens Gamesa trabajaba ya con MAGMA, la predicción de propiedades mecánicas se evaluó sobre este software, pero en cualquier caso es el más extendido en las fundiciones que se dedican a piezas estructurales del sector eólico y es considerado un software adecuado para certificación de diseños eólicos.

El fundamento de cálculo de MAGMA se basa en una metodología de volúmenes finitos (Figura 2.5) muy habitual en los software de este tipo. En una publicación de Sonne [33] se puede encontrar una buena explicación de la matemática de esta metodología.

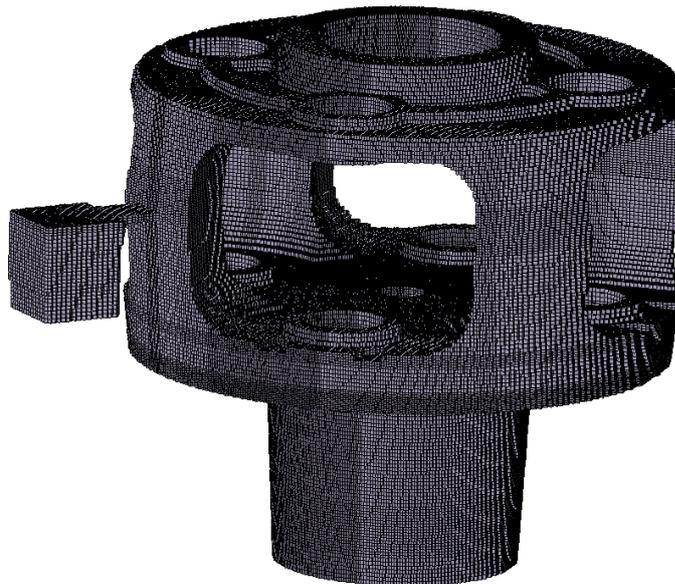


Figura 2.5. Mallado de volúmenes finitos sobre un planet carrier eólico

En función del objetivo y el grado de precisión requerido por el usuario, las simulaciones del proceso de fundición se pueden clasificar en los siguientes tipos [31]:

- **Tipo 1.** Simulaciones de solidificación sin elementos auxiliares de proceso (Naked simulations). Este tipo de simulación es la que se suele considerar como simulación inicial pues se ve la tendencia natural de un fundido sin que sea necesario forzar su

proceso de solidificación. Para esta simulación no se requiere un software con nivel de certificación.

- **Tipo 2.** Simulaciones de solidificación con elementos auxiliares de alimentación y/o solidificación dirigida. Estas simulaciones no tienen calculada la etapa de llenado, pero tienen en cuenta en la solidificación todos los elementos que definen un cierto proceso de fundición. Se establece como condición de inicio de la solidificación que todo el metal líquido está a una misma temperatura. Es una condición de contorno forzada que permite evitar la etapa de llenado en la simulación y reducir el tiempo de cálculo con una precisión suficiente para las piezas del sector. Son simulaciones en las que se va iterando hasta lograr un proceso que asegure que se satisfacen los requisitos de sanidad interna del producto. Para estas simulaciones no se requiere software con nivel de certificación.
- **Tipo 3.** Simulaciones de llenado y solidificación con todos los elementos auxiliares de proceso. Es el tipo de simulación final con la que se certifica el proceso. Los admisibles de la pieza quedan indefectiblemente asociados a los resultados de esta simulación. Estas simulaciones requieren software con nivel de certificación, lo cual las confiere “plausibilidad”, es decir, evidencias de que las prácticas de simulación conducen a resultados plausibles.
- **Tipo 4.** Simulaciones de tratamiento térmico. Son simulaciones complementarias en el ámbito de materiales que adquieren sus propiedades mecánicas definitivas después de un tratamiento térmico.
- **Tipo 5.** Simulaciones de tensiones residuales. Son simulaciones enfocadas a una predicción de tensiones residuales asociadas a la solidificación o a los tratamientos térmicos. Requieren una caracterización complementaria del material.

En base a la tipología de simulación descrita, las primeras simulaciones se fundamentaron en los parámetros de preproceso que venía utilizando GET con éxito para la predicción de defectos (principalmente simulaciones tipo 2), pero analizando resultados metalográficos y de ensayos mecánicos sobre pieza real, se estableció que para alcanzar precisión en la predicción de propiedades mecánicas habría que modificar ese planteamiento en algunos aspectos [31].

2.3 METODOLOGÍA DE AJUSTE

Comenzando por una evaluación de los resultados por defecto en propiedades mecánicas que ofrece el software, se comprobó que estos resultados pueden aproximarse en orden de magnitud con lo que se obtiene para GET en fundiciones y piezas del sector eólico [31]. Teniendo a disposición del investigador piezas de demostradores (prototipos de multiplicadoras no utilizados en serie) y los resultados obtenidos del control de calidad de piezas seriadas, la información principal para el ajuste metalográfico se obtuvo de un prototipo de PC1 (4CAGE) fabricado en material EN-GJS-700-2 [16]. El ajuste de predicción metalográfica realizado a partir de esa información [31] se validó, tanto en el material EN-GJS-700-2 [16] como en el EN-GJS-400-18-LT [16], en base al control de calidad de piezas seriadas [31].

Más allá de obtener una predicción de propiedades mecánicas más o menos correcta en orden de magnitud, la utilización de estas predicciones en cálculos estructurales eólicos requiere de un ajuste que adapte los resultados del software a la especificidad del proceso de cada proveedor [32]. Las dificultades que plantea extraer muestras de piezas reales y su heterogeneidad, evidencian la necesidad de trabajar con una pieza patrón [31]. En ese sentido, GET desarrolló una geometría, GET-1 (Figura 2.6), y su proceso de fabricación, que ofrece respuestas en los espesores de trabajo de la compañía (Figura 2.7).

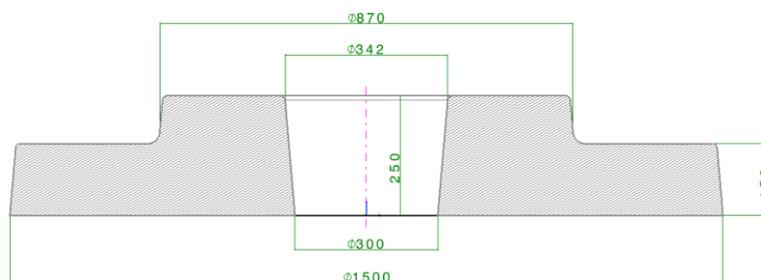


Figura 2.6. Geometría GET-1 para ajuste de propiedades mecánicas

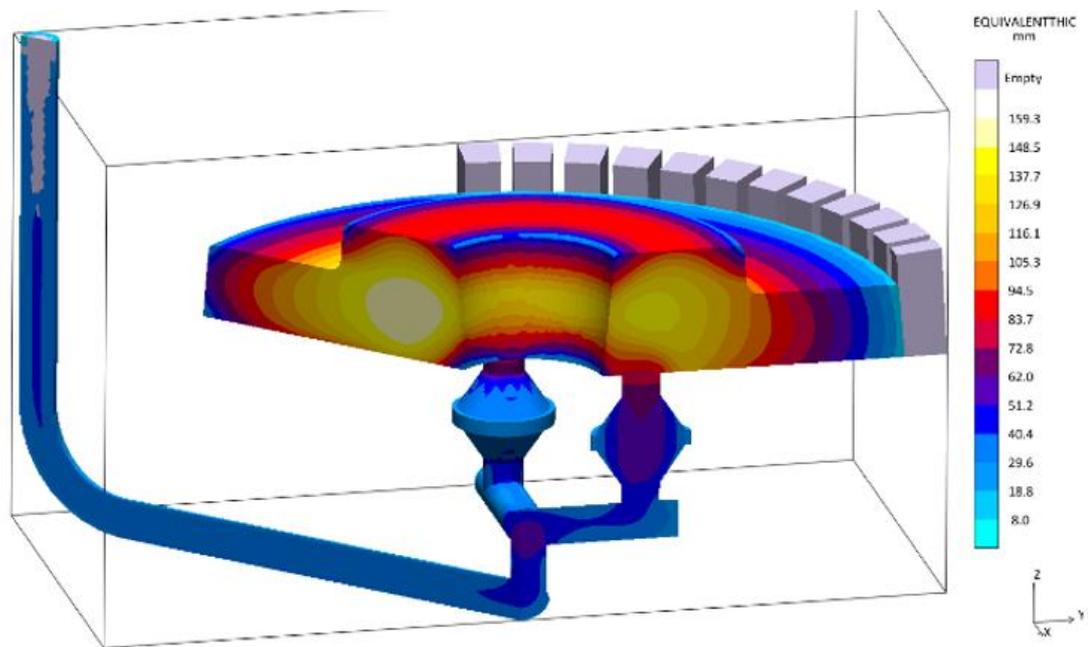


Figura 2.7. Geometría GET-1. Espesores de trabajo (mm)

De acuerdo con los requisitos de la norma eólica de cálculo estructural IEC 61400-8 [13] y de los ajustes de la norma estadística ISO 16269-6 [34], con el material extraído de al menos dos GET-1 se puede realizar un ajuste de las predicciones MAGMA a través de fórmulas “user result”.

CAPÍTULO 3

CONCLUSIONES, TRABAJOS COMPLEMENTARIOS Y POSIBILIDADES DE FUTURO

3.1. CONCLUSIONES

En este apartado se van a establecer las principales conclusiones obtenidas en la investigación.

3.1.1. Integración de la simulación de fundición en el cálculo estructural

Partiendo de la base conceptual establecida en el primer artículo publicado [30] y teniendo en cuenta el muestreo de propiedades mecánicas realizado para establecer la precisión del software en sus predicciones [31], la principal conclusión respecto de la integración de la simulación de fundición en el cálculo estructural es que postprocesar toda una pieza eólica en función de unas mismas propiedades mecánicas mínimas que aseguran las normas internacionales de material [16, 17] en el punto de mayor espesor de la pieza es excesivamente conservador. Por tanto, seleccionar las propiedades de material para la evaluación de un cálculo en función de la predicción de una simulación de proceso se postula como una opción muy atractiva, pero requiere un análisis de cada usuario, apoyado en un profundo conocimiento del proceso [30]. En ese mismo sentido, desde un punto de vista moderno, la caracterización de cualquier material debería implicar su integración en un entorno de simulación [31].

De acuerdo con el diagrama propuesto en el primer artículo publicado [30], Figura 3.1, la simulación del proceso de fundición es una herramienta accesible que puede encajar perfectamente en el flujo de diseño y cálculo de piezas estructurales.

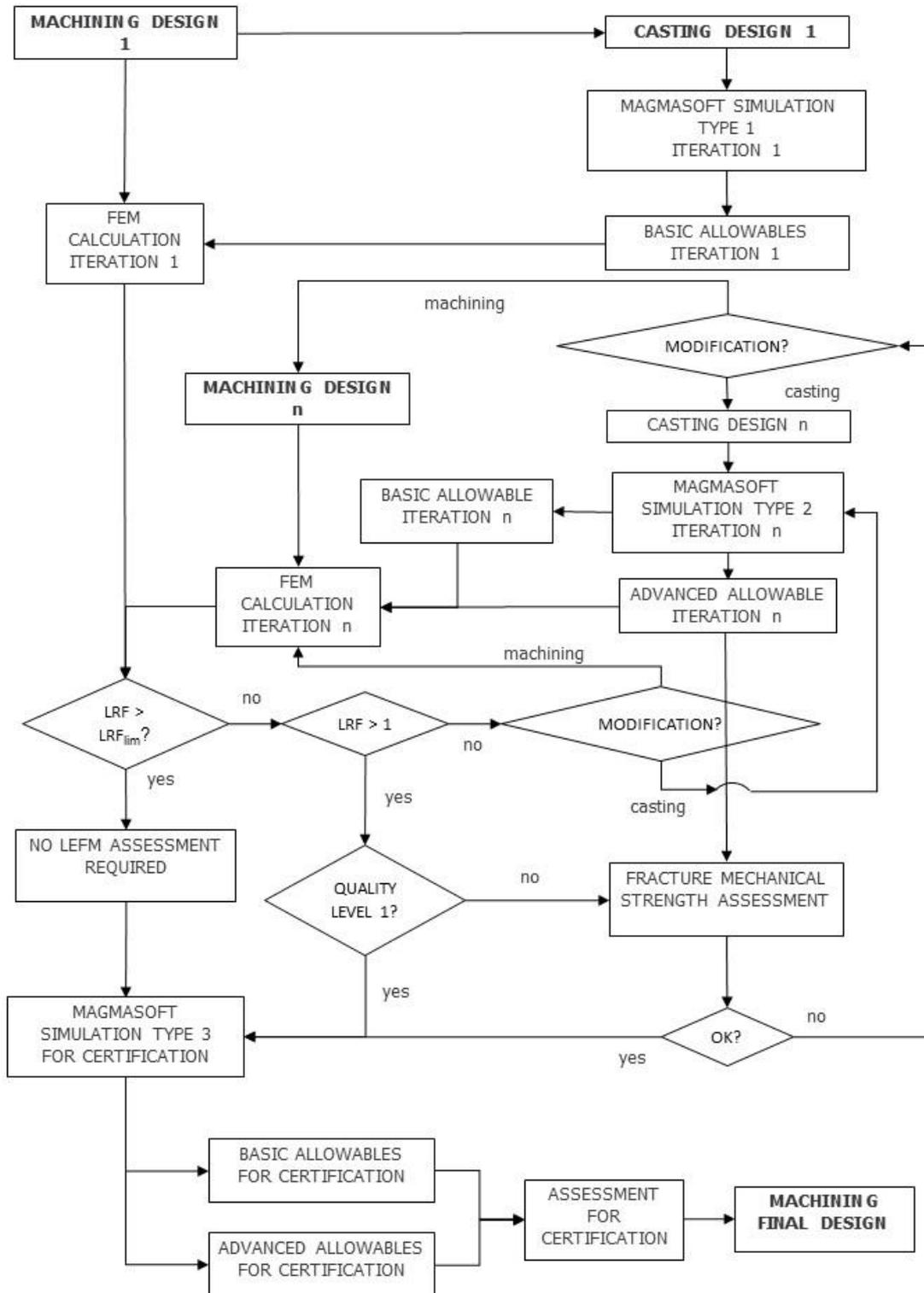


Figura 3.1. Diagrama de flujo para el cálculo de fundidos

3.1.1 Predicciones por defecto de MAGMA

En el caso de GET, teniendo en cuenta el proceso de fabricación que siguen sus proveedores, las conclusiones sobre la predicción por defecto de MAGMA en el ámbito de propiedades mecánicas se establecen en el segundo artículo publicado [31]. Las principales ideas en este ámbito son las siguientes:

- Para proporcionar una predicción correcta de las propiedades mecánicas se recomienda trabajar en base a simulaciones de llenado y solidificación (simulaciones tipo 3), ya que las simulaciones simplificadas (simulaciones tipo 2 de solidificación) generan errores en la superficie de las piezas fundidas, que son precisamente las zonas estructuralmente más cargadas.
- Antes de cualquier ajuste en la predicción de propiedades mecánicas es necesario asegurar previamente un cálculo metalográfico ajustado a la realidad de las piezas. En este sentido, obtener precisión en la densidad de nódulos es primordial, especialmente para la predicción de propiedades de fractura. La clave para obtener predicciones metalográficas ajustadas está en modificar el “heat transfer coefficient”, HTC, del contacto pieza/enfriador.
- En el caso de pieza grande eólica en moldeo furánico, tomando como referencia el proceso de fabricación que siguen los proveedores de GET, se recomienda definir la calidad metalúrgica (inoculation, treatment yield, shrinkage potential) partiendo de los parámetros inoculation/good, treatment yield/150 y shrinkage potential/very high.
- Considerando que MAGMA no tiene en cuenta la influencia de la reacción molde-metal sobre las propiedades mecánicas por defecto, no se recomienda el uso directo de dichas predicciones por defecto para superficies en bruto.
- Como el software tampoco tiene en cuenta la predicción de porosidad en su predicción de propiedades mecánicas, se recomienda no tomar decisiones respecto de propiedades mecánicas en zonas en las que a pieza es susceptible de presentar defectos.

3.1.3 Ajuste de la predicción de propiedades mecánicas

Según queda establecido en el segundo artículo publicado [31], aunque las predicciones que ofrece MAGMA por defecto son muy alentadoras, para que una predicción pueda ser utilizada en el ámbito del cálculo estructural posiblemente va a requerir de un ajuste. En el caso del material EN-GJS-400-18-LT [16], la modificación de las predicciones mediante la opción de programar “user result” puede permitir obtener propiedades mecánicas ajustadas [31]. Para el material EN-GJS-700-2 [16] especificado por GET (para el que se exige un tratamiento térmico de normalización), por el momento no es posible calcular en MAGMA admisibles porque el software no ofrece predicción de propiedades mecánicas tras el tratamiento térmico, sólo predicción metalográfica [31]. Como se determina en las referencias [35-37], la predicción de las propiedades mecánicas tras el tratamiento térmico podría programarse para el material EN-GJS-700-2 [16], pero quedaría fuera del alcance del trabajo de una oficina técnica que centra su esfuerzo en el diseño de piezas estructurales. Del mismo modo, son posibles las predicciones basadas en el desarrollo de relaciones experimentales entre la microestructura y las propiedades mecánicas [38], pero también se considera que está fuera del alcance de un departamento de diseño.

En relación con el ajuste de predicciones, en el tercer artículo publicado [32] se establece que la geometría GET-1 (Figura 2.6) proporciona material en los rangos de espesor representativos de las piezas de multiplicadora eólica y simplifica enormemente la extracción de probetas para el análisis estadístico. Su proceso de fabricación también permite estudiar los resultados asociados a la presencia de enfriadores.

Para aquellos materiales no completamente definidos en las normas internacionales, se recomienda tener en cuenta el grafito degenerado [39-42] en los acuerdos finales entre fabricante y comprador [32]. Posiblemente la causa principal de tener que realizar grandes ajustes en la predicción de propiedades mecánicas en MAGMA, al menos en el caso de fundición nodular, sea precisamente la presencia de malformaciones gráficas en el material.

3.2 TRABAJOS COMPLEMENTARIOS NO PUBLICADOS

Aparte de la información ofrecida en los artículos técnicos publicados, GET analizó también los resultados por defecto que ofrece MAGMA para el material EN-GJL-250 [17]. También se analizaron otras propiedades que podían ser obtenidas del propio software de simulación (tensiones residuales) o que podían ser calculadas a partir de resultados previos del software (propiedades de fractura). Esta información no se publicó por diferentes razones (principalmente cuestiones de confidencialidad), pero se ofrece un resumen en los siguientes apartados.

3.2.1 Predicciones por defecto sobre material EN-GJL-250. Resistencia última

El material EN-GJL-250 [17] es propio de las piezas tipo housing de terceras etapas de multiplicación. En general esta pieza soporta las fuerzas generadas en la etapa rápida de multiplicación. De forma complementaria refuerza la corona de la segunda etapa, soporta el freno de la multiplicadora y la fuerza que puede llegar a ejercer, sirviendo además de depósito de aceite. A partir de los resultados obtenidos en simulaciones tipo 3 (llenado y solidificación), la principal conclusión es que la predicción MAGMA para la resistencia última no se aproxima en orden de magnitud al material fabricado siguiendo la especificación de GET. Las predicciones se corresponderían mejor con las de un material que tuviera valores de % C mayores que los declarados en preproceso, pero además los valores en zonas superficiales son demasiado bajos comparados con los obtenidos en el centro térmico (Figura 3.2). Se considera que esta predicción requiere un fuerte ajuste.

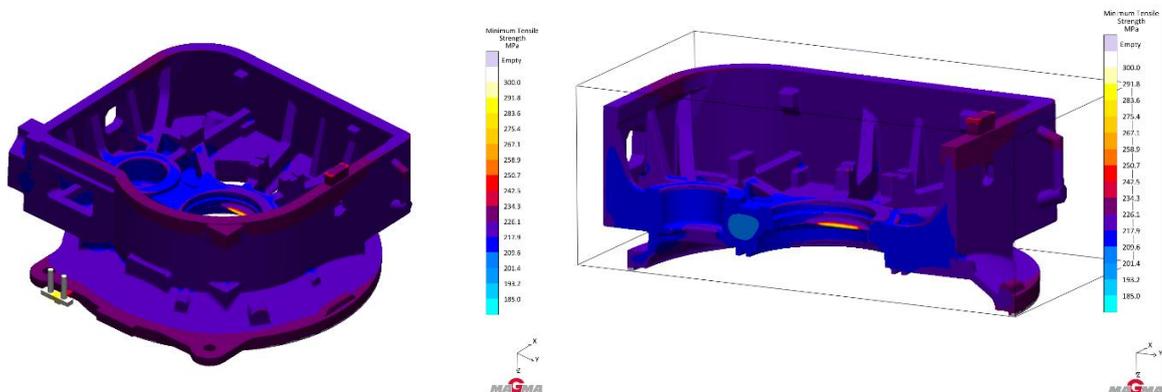


Figura 3.2. Housing 3 (Body). Material EN-GJL-250 [17]. Predicción MAGMA por defecto para resistencia última. Vista general y sección

3.2.2 Predicción de tensiones residuales

Aparte de la predicción de propiedades mecánicas, para cada uno de los materiales analizados también se evaluó la verosimilitud de la predicción de tensiones residuales en MAGMA. Se debe tener en cuenta que este software calcula las tensiones residuales con una caracterización de material cerrada, no disponible al usuario, que es diferente de la que utiliza para llenado, solidificación y predicción de propiedades mecánicas.

Las predicciones para los materiales EN-GJS-400-18-LT [16] y EN-GJS-700-2 [16] parecen verosímiles, pero el estado del arte de la medición de tensiones residuales hace que sea muy difícil comprobar en piezas estructurales eólicas si los resultados están en orden de magnitud con la realidad de las piezas. La predicción de MAGMA en tensiones residuales se refiere al estado de la pieza después de solidificar, pero esta situación se ve modificada por el granallado que introduce tensiones residuales compresivas. Al tratar de evaluar el estado tensional sin granallar, la limpieza de la pieza no permite en absoluto la medición de tensiones mediante difracción de rayos X y la hace extremadamente difícil mediante hole-drilling.

Tomando como ejemplo lo que el software predice para el material EN-GJS-700-2 [16], simulando un portasatélites parece que en algunas zonas se pueden tener tensiones tractivas de cierta entidad, aunque estarían lejos de la situación en la que se generaría grieta antes de mecanizado. De acuerdo con la secuencia de carga de la pieza, la Figura 3.3 presenta las tensiones residuales de la pieza en el molde a 400 °C (a) e inmediatamente después de desmoldear (b); la presencia de la arena hace que la pieza no pueda evolucionar geoméricamente, generándose unas tensiones residuales que se ven modificadas al desmoldear y eliminar el elemento externo que rigidizaba la pieza.

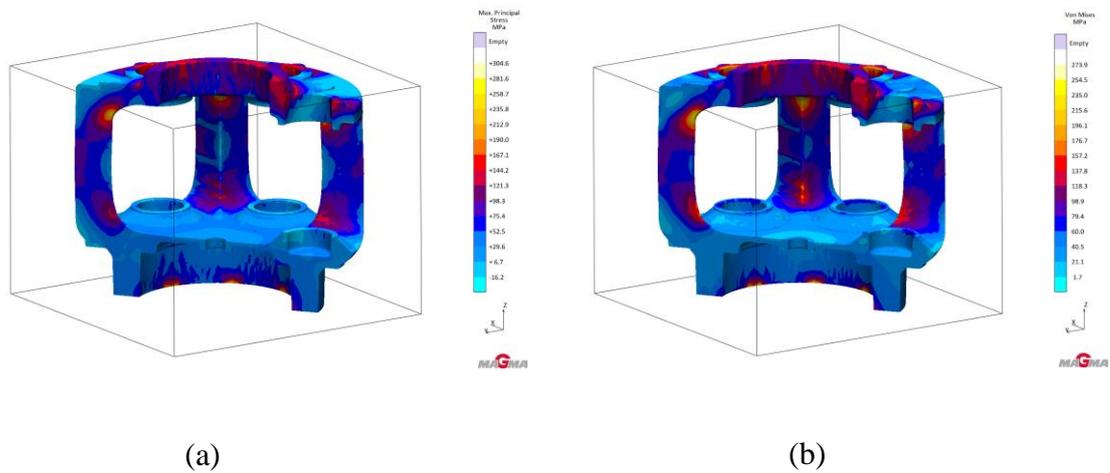


Figura 3.3. PC1. Material EN-GJS-700-2 [16]. Predicción MAGMA por defecto antes de desmoldeo (a) y después de desmoldeo (b)

Entre el momento en el que la pieza se encuentra a 400 °C fuera del molde (Figura 3.3b) y el instante en el que alcanza la temperatura ambiente (Figura 3.4), las diferencias de espesor hacen que la contracción no sea homogénea por lo que la pieza evoluciona tensionalmente. La Figura 3.4a presenta la predicción del software en tensión máxima principal y la Figura 3.4b en Von Mises; para un material como el EN-GJS-700-2 [16] considerado como frágil, la evaluación de tensiones se debería realizar en base a máxima principal.

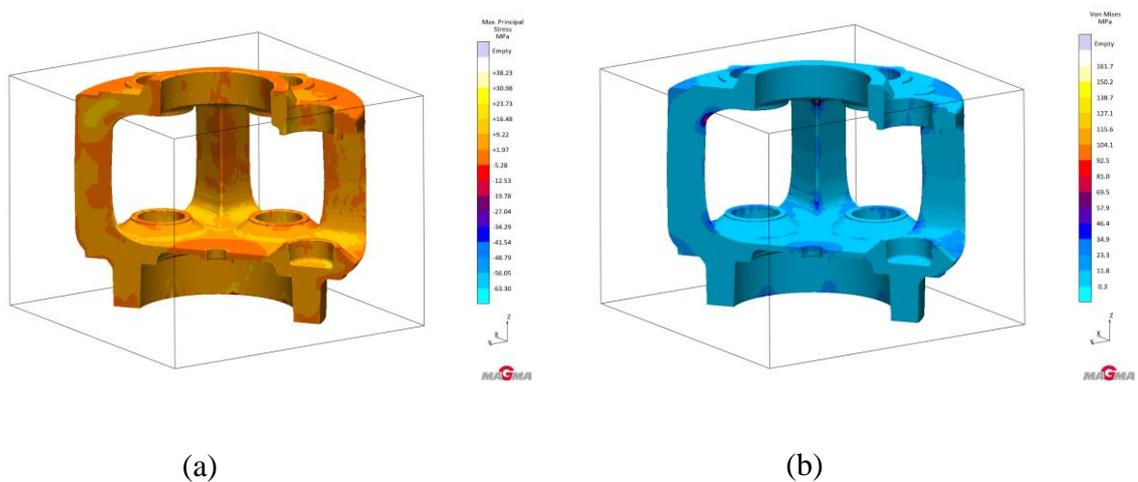


Figura 3.4. PC1. Material EN-GJS-700-2 [16]. Predicción MAGMA por defecto a temperatura ambiente para máxima principal (a) y Von Mises (b)

Teniendo en cuenta que el material EN-GJS-700-2 [16], según la especificación de GET, alcanza sus prestaciones finales después de un tratamiento térmico de normalizado, la Figura 3.5 presenta el estado tensional cuando toda la pieza se encuentra austenizada a 850 °C dentro del horno de normalizado. En esta situación la pieza tiene un estado tensional mínimo.

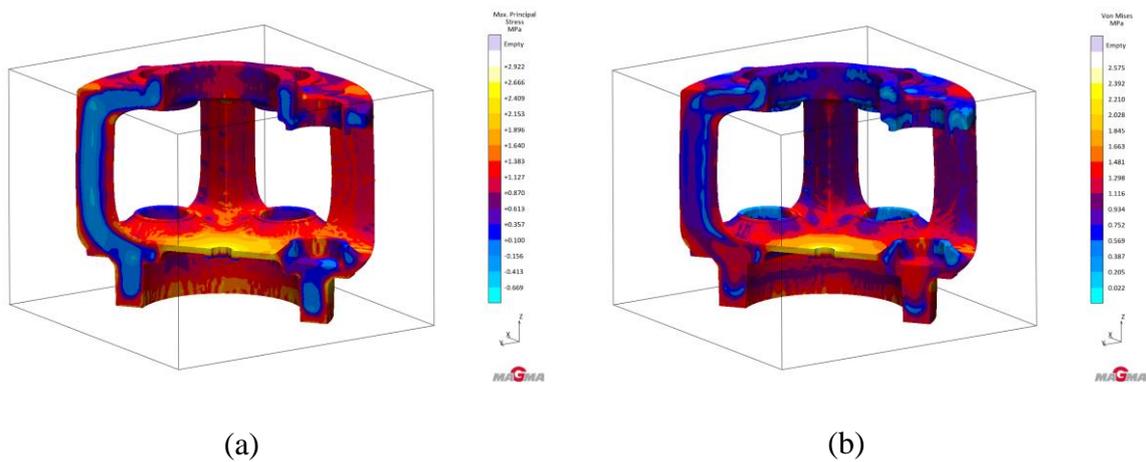


Figura 3.5. PC1. Material EN-GJS-700-2 [16]. Predicción MAGMA por defecto en austenizado a 850 °C. (a) Máxima principal y (b) Von Mises

Aunque hay un momento en el que el tratamiento térmico anula el estado tensional (Figura 3.5), durante el subsiguiente enfriamiento de la pieza hay una transformación de fase que sumada a las diferencias de contracción genera un nuevo estado tensional definitivo a temperatura ambiente, Figura 3.6.

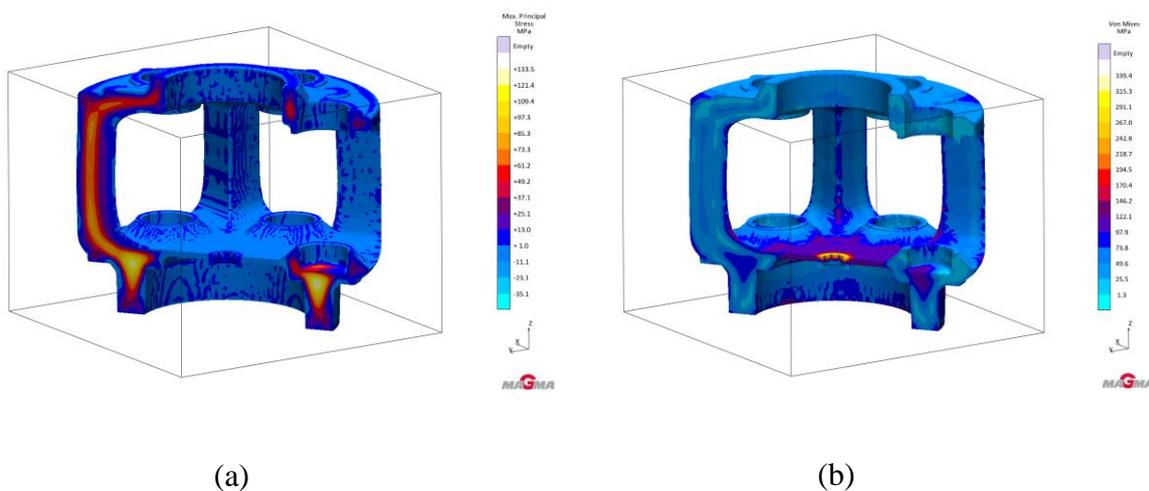


Figura 3.6. PC1. Material EN-GJS-700-2 [16]. Predicción MAGMA después de tratamiento térmico. (a) Máxima principal y (b) Von Mises

En el caso del material EN-GJL-250 [17], teniendo en cuenta sus particularidades, se recomienda un análisis de tensiones más pormenorizado que en piezas de material EN-GJS-400-18-LT [16] o EN-GJS-700-2 [16], pues las tensiones residuales antes de mecanizado pueden llegar a ser relevantes en comparación con su límite de rotura y en la industria no es difícil encontrar ejemplos de diseños con grietas detectadas en la fundición antes de mecanizado. Tomando como ejemplo lo que sucede en la solidificación de una pieza tipo housing 3, se comprueba que, con un diseño adecuado, las solicitaciones pueden quedar alejadas del rango en el que se generarían grietas (Figura 3.7).

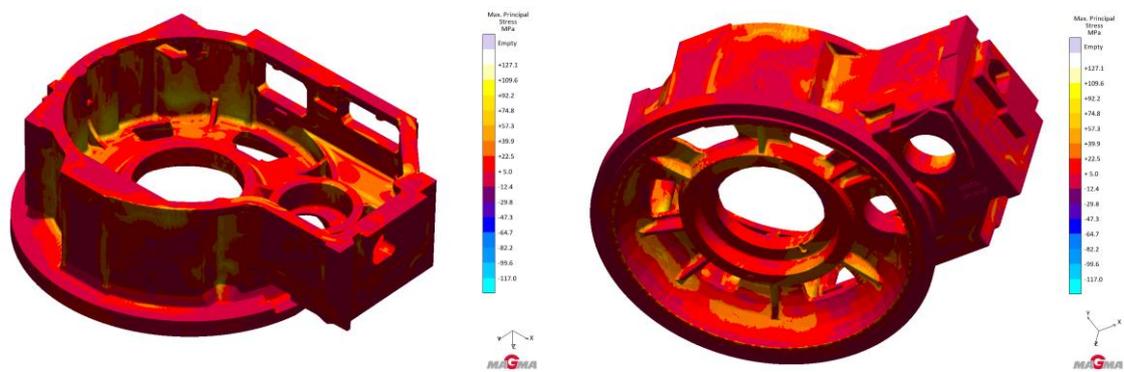


Figura 3.7. Housing 3 (Body). Material EN-GJL-250 [17]. Predicción MAGMA a temperatura ambiente. (a) Máxima principal y (b) Von Mises

3.2.3 Predicción de propiedades de fractura

Tomando como referencia las investigaciones de Pusch [27] y las propuestas de Langenberg [28], como se establece en el artículo [31], se programan en MAGMA para material EN-GJS-400-18-LT [16] las fórmulas predictivas de Pusch [27]. Aparte, se realiza una investigación de fractura para los materiales EN-GJS-700-2 [16] y EN-GJS-500-14 [16]. En esta investigación se comprueban los resultados de Wolfensberger [43] que indican que materiales frágiles como los investigados presentan mayor tenacidad conforme aumenta la densidad de nódulos, tendencia contraria a lo establecido por Pusch [27] para el material EN-GJS-400-18-LT [16]. La Figura 3.8 presenta las fórmulas predictivas de Pusch [27] aplicadas a un torque arm de 4x. La Figura 3.9, sin escala teniendo en cuenta la confidencialidad de los resultados, muestra el gradiente de tenacidad obtenido en un portasatélites de primera etapa. En función de la predicción de espesor que ofrece la Figura 3.10, cerca de los enfriadores se pueden ver colores más cálidos como resultado de una tenacidad más alta, asociada a un espesor menor y a una densidad de nódulos mayor.

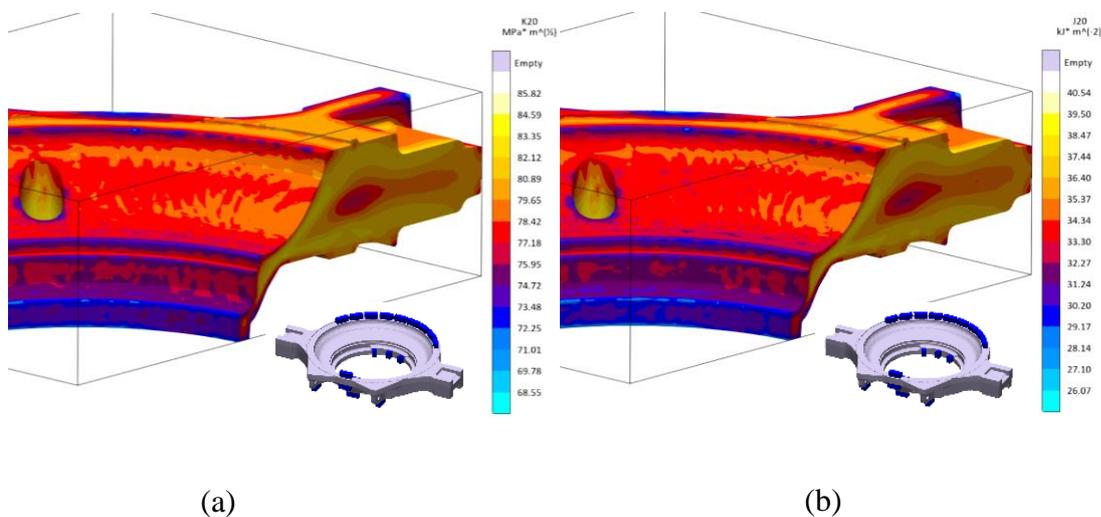


Figura 3.8. Torque arm 4x. EN-GJS-400-18-LT [16]. Simulación tipo 3 con HTC modificado. Programación de la formulación de Pusch [27] para (a) K_{IC} , (b) J_i, SZW

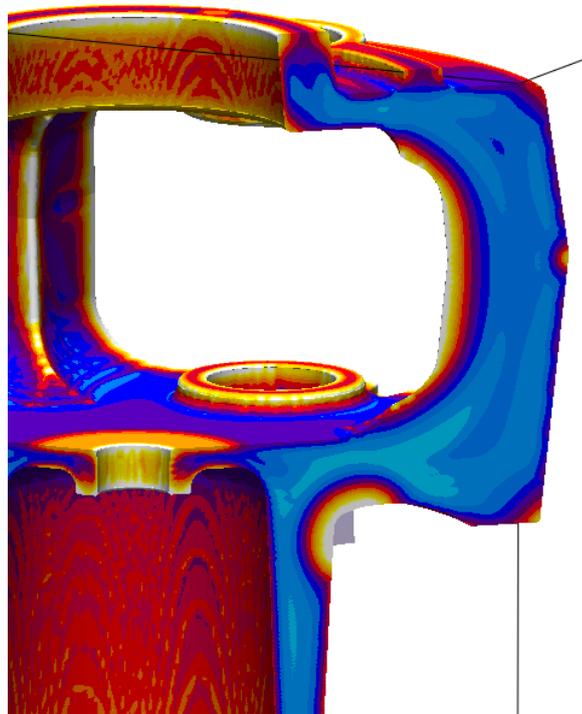


Figura 3.9. PC1 2x. EN-GJS-700-2 [16]. Simulación tipo 3 con HTC modificado. Gradiente de tenacidad sin escala

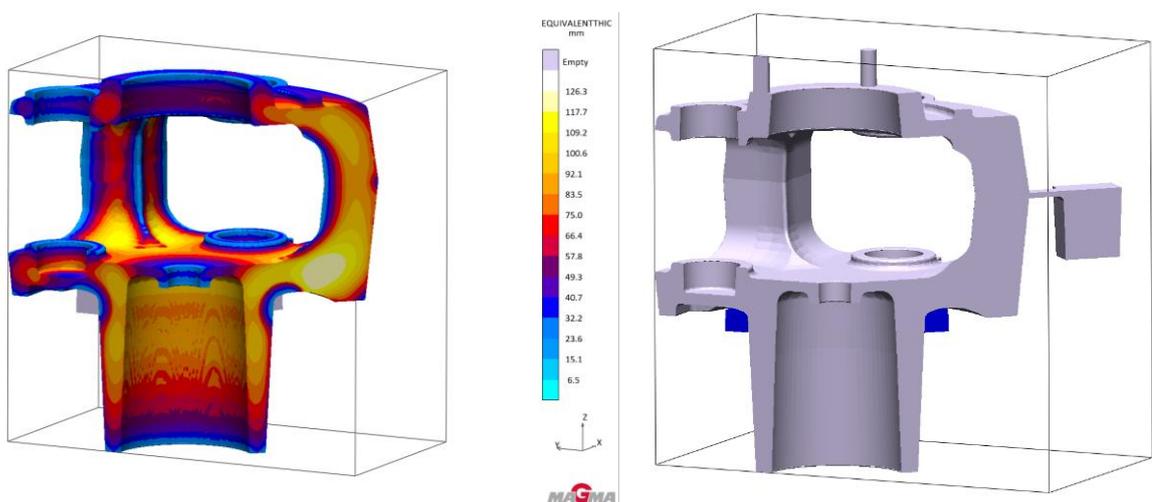


Figura 3.10. PC1 2x. EN-GJS-700-2 [16]. Simulación tipo 3 con HTC modificado. Gradiente del espesor equivalente

3.3 TRABAJO FUTURO

Como continuación a la investigación realizada, los siguientes pasos irán encaminados a mejorar estadísticamente los resultados obtenidos y a establecer correlaciones entre los resultados y los parámetros del proceso de fundición que los han generado. Big Data, Machine Learning, Redes Neuronales son tecnologías completamente implementadas en el sector de la fundición dedicado a la automoción, pero a las que les cuesta acceder a fundiciones que trabajan para otros sectores industriales como el eólico. En el caso de GET, aparte de fabricar internamente parte del producto fundido que necesita, compra en variedad de proveedores externos lo que genera una ingente cantidad de datos que deben ser procesados para establecer el tipo de material con el que se puede contar en un cálculo estructural. En referencias como el trabajo de Santos [44] o el de Blondheim [45] se puede ver aproximaciones de este tipo de tecnología al sector de la fundición.

CAPÍTULO 4

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DNV GL AS. DNVGL-ST-0361, edition 2016. Machinery for Wind Turbines. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [2] Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH. Guideline for the Certification of Wind Turbines, edition 2003 (with supplement 2004). <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [3] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. Guideline for the Certification of Wind Turbines, edition 2010. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [4] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. DWM-Poll-extern-001, revision 0. 2008. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [5] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. DWM-Poll-extern-001, revision 1. 2010. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [6] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. DWM-Poll-extern-001, revision 2. 2013. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [7] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. DWM-Poll-extern-002, revision 0. 2009. <https://www.dnv.com/rules-standards>

- [8] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification. DWM-Poll-extern-003, revision 0. 2009. <https://www.dnv.com/rules-standards>
- [9] IEC 61400-1:2005. Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements. <https://webstore.iec.ch/home>
- [10] IEC 61400-1:2010. Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements. Amendment 1. <https://webstore.iec.ch/home>
- [11] IEC 61400-1:2019. Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements. <https://webstore.iec.ch/home>
- [12] IEC 61400-4:2012. Wind turbines – Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes. <https://webstore.iec.ch/home>
- [13] IEC 61400-8: Design of Wind Turbine Structures. Currently in discussion.
- [14] FKM Guideline Analytical Strength Assessment of Components, 6th:2012. <http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/index.htm>
- [15] FKM Guideline Fracture Mechanics, 3rd:2009. <http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/index.htm>
- [16] EN 1563:2018. Founding - Spheroidal graphite cast iron. <https://www.en-standard.eu/>
- [17] EN 1561:2011. Founding - Grey cast iron. <https://www.en-standard.eu/>
- [18] EN 12680-3:2011. Founding – Ultrasonic testing – Part 3: Spheroidal graphite cast iron castings. <https://www.en-standard.eu/>
- [19] EN 1369:2012. Founding – Magnetic particle testing. <https://www.en-standard.eu/>
- [20] EN 1371-1:2011. Founding – Liquid penetrant testing – Part 1: Sand, gravity die and low pressure die castings. <https://www.en-standard.eu/>
- [21] BS7910:2019. Guideline to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. <https://www.en-standard.eu/bs-7910-2019-guide-to-methods-for-assessing-the-acceptability-of-flaws-in-metallic-structures/>

- [22] VDMA 23902:2014. Guideline for fracture mechanical strength assessment of planet carriers made of nodular cast iron EN-GJS-700-2 for wind turbine gearboxes. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdma-23902/215784699>
- [23] M. Jolly (2002). Casting simulation: How well do reality and virtual casting match? State of the art review. <http://dx.doi.org/10.1080/13640461.2002.11819448>
- [24] M. Aloe and F. Anton (2007). Modelling microstructure, mechanical properties and density variation of cast iron. ESI Group.
- [25] J. C. Sturm and W. Schaefer (2018). Cast Iron - a predictable material. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.451>
- [26] C. Thomser, M. Bodenbug and J.C. Sturm. Optimized Durability Prediction of Cast Iron Based on Local Microstructure. *Inter Metalcast* 11, 207–215 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0091-x>
- [27] G. Pusch, S. Henkel, H. Biermann, P. Hübner, A. Ludwig, P. Trubitz, T. Mottitschka and L. Krüger (2016). Determination of fracture mechanics parameters for cast iron materials under static, dynamic and cyclic loading. *Recent trends in fracture and damage mechanics*. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-21467-2_7
- [28] P. Langenberg, C. Thomser, J.C. Sturm and P. Kucharczyk Integration of Casting Process Simulation into Safety-Oriented Component Design - Status and Outlook. Presented at CastTec Conference, November 2016, Darmstadt.
- [29] J. Sertucha, J. Lacaze. Casting defects in sand-mold cast irons—An illustrated review with emphasis on spheroidal graphite cast irons. *Metals* 2022, 12, 504. <https://doi.org/10.3390/met12030504>
- [30] T. Gómez, I. I. Cuesta and J. M. Alegre. Critical review on allowable material data selection in structural design of large castings for wind turbine gearboxes. *Inter Metalcast* (2022). <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00833-6>.

-
- [31] T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Mechanical property prediction based on casting process simulation for structural parts in wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-00977-z>
- [32] T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Adjustment of mechanical property predictions for structural castings in the wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01056-z>
- [33] M. R. Sonne, J. O. Frandsen and J. H. Hattel (2017). Comparison of residual stresses in sand- and chill casting of ductile cast iron wind turbine main shafts. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012025>
- [34] ISO_16269-6:2014. Statistical interpretation of data. Part 6:Determination of statistical tolerance intervals
- [35] J. Lacaze, J. Sertucha and L. Magnusson Åberg (2016). Microstructure of as-cast ferritic-pearlitic nodular cast irons. *ISIJ International*, vol. 56 (n° 9). pp. 1606-1615. ISSN 0915-1559. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01565250>
- [36] L. Magnusson Åberg, C. Hartung and J. Lacaze (2014). Trace elements and the control limits in ductile iron. 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10. <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/28>
- [37] J. Serrallach, J. Lacaze, J. Sertucha, R Suárez and A. Monzón (2011). Effect of Selected Alloying Elements on Mechanical Properties of Pearlitic Nodular Cast Irons. *Key Engineering Materials* Vol. 457. pp 361-366. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.457.361>
- [38] L. Ceschini, A. Morri, A. Morri, E. Salsi, R. Squatrito, I. Todaro and L. Tomesani (2016): Microstructure and mechanical properties of heavy section ductile iron castings: experimental and numerical evaluation of effects of cooling rates. *International Journal of Cast Metals Research*. <https://doi.org/10.1179/1743133615Y.0000000022>.
- [39] J. Lacaze (2016). Trace elements and graphite shape degeneracy in nodular graphite cast irons. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0115-6>

- [40] W. Baer (2019). Chunky graphite in ferritic spheroidal graphite cast iron. Formation, prevention, characterization, impact on properties: An overview. <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00363-8>
- [41] B. Bauer, I. Mihalic Pokopec, M. Petric^ˇ and P. Mrvar (2020). Effect of cooling rate on graphite morphology and mechanical properties in high-silicon ductile iron castings. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00432-3>
- [42] J. Sertucha, G. Artola, U. de la Torre and J. Lacaze (2020). Chunky graphite in low and high silicon spheroidal graphite cast irons - Occurrence, control and effect on mechanical properties. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03029823>
- [43] S. Wolfensberger, P. Uggowitz, M. Speidel: Die Bruchzähigkeit von Gusseisen, Teil II: Gusseisen mit Kugelgraphit, *Giesserei-Forschung* 39 (1987) H. 2, S. 71 – 80 (in German)
- [44] I. Santos, J. Nieves, Y. K. Peña, and P. G. Bringas, “Optimising machine-learning-based fault prediction in foundry production,” vol. 5518, pp. 554–561, 2009
- [45] Blondheim, D. Improving Manufacturing Applications of Machine Learning by Understanding Defect Classification and the Critical Error Threshold. *Inter Metalcast* 16, 502–520 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00637-0>

ANEXO

ARTICULOS PUBLICADOS

T. Gómez, I. I. Cuesta and J. M. Alegre. Critical review on allowable material data selection in structural design of large castings for wind turbine gearboxes. Inter Metalcast (2022).
<https://doi.org/10.1007/s40962-022-00833-6>.



CRITICAL REVIEW ON ALLOWABLE MATERIAL DATA SELECTION IN STRUCTURAL DESIGN OF LARGE CASTINGS FOR WIND TURBINE GEARBOXES

T. Gómez 

Parque Tecnológico de Zamudio, Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), Edificio 222, 48170 Zamudio, Bizkaia, Spain

I. I. Cuesta and J. M. Alegre

Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos (UBU), Av. Cantabria s/n 09006, Burgos, Spain

Copyright © 2022 American Foundry Society
<https://doi.org/10.1007/s40962-022-00833-6>

Abstract

Structural components design in the wind sector is based on international guidelines that in some cases could be ambiguous and excessively conservative. This article reviews the state of the art regarding allowable data of material that must be provided during the different design steps of large structural castings for gearboxes in the wind sector. One of the main issues in designing these components is the presence of relevant stresses in thick-walled sections, where there are sometimes mechanical properties gradients that are forced as result of a specific manufacturing process. At the initial stages of a structural analysis, for either static or fatigue assessment, the concept of allowable material data is established. These material properties could be selected, as a first approach, based on the definition of a relevant thickness in the part, but it

forces those properties to be assumed by all sections of the component regardless of their local equivalent thickness and their real local mechanical properties. Other alternatives are possible, such as considering the real properties of the material for each local thickness; this option could be defined on the basis of the geometrical/thermal modulus that are typical concepts of casting process technology. Consequently, this article presents a review of material properties selection in different design codes of the wind sector, as well as available methodologies to provide them.

Keywords: gearbox, allowable material data, mechanical properties prediction, casting simulation, ductile iron

T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Mechanical property prediction based on casting process simulation for structural parts in wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-00977-z>



MECHANICAL PROPERTY PREDICTION BASED ON CASTING PROCESS SIMULATION FOR STRUCTURAL PARTS IN THE WIND GEARBOX SECTOR

T. Gómez 

Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), Parque Tecnológico de Zamudio, Edificio 222, 48170 Zamudio, Bizkaia, Spain

I. I. Cuesta and J. M. Alegre

Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos (UBU), Av. Cantabria s/n, 09006 Burgos, Spain

Copyright © 2023 American Foundry Society
<https://doi.org/10.1007/s40962-023-00977-z>

Abstract

In order to ensure casting simulation plausibility, as requested in wind certifications, its default mechanical property prediction is evaluated based on results tested from wind structural castings made in furan no-bake resin systems. Through a standard definition of pre-process parameters and the default post-process provided by commercial software, it is verified that predictions on nodular cast iron are already in order of magnitude with tests on wind castings. To improve the default mechanical

property prediction, the specific process of each supplier, an advanced definition of pre-process parameters and new post-process criteria should be considered.

Keywords: basic allowable material data, casting simulation, gearbox, mechanical property prediction, nodular cast iron

T. Gómez, I. I. Cuesta, J. M. Alegre, (2023). Adjustment of mechanical property predictions for structural castings in the wind gearbox sector. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01056-z>



ADJUSTMENT OF MECHANICAL PROPERTY PREDICTIONS FOR STRUCTURAL CASTINGS IN THE WIND GEARBOX SECTOR

T. Gómez 

Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), Parque Tecnológico de Zamudio, Edificio 222, 48170 Zamudio, Bizkaia, Spain

I. I. Cuesta and J. M. Alegre

Universidad de Burgos (UBU), Escuela Politécnica Superior, Av. Cantabria s/n , 09006 Burgos, Spain

Copyright © 2023 American Foundry Society
<https://doi.org/10.1007/s40962-023-01056-z>

Abstract

A steady torque density increase in the wind industry requires continuous advancement in design and materials. High torque density ratios lead to the use of high-strength nodular cast iron in gearbox parts where until now it has not been necessary to use them. To facilitate the characterization of those materials, taking into account the difficulty of extracting material samples directly from heavy section castings, a dedicated geometry and its manufacturing process are proposed. On the basis of a casting trial,

the mechanical property predictions of an EN-GJS-500-14 grade are adjusted following a working methodology that could help to optimise the performance of the different nodular cast iron grades in a high torque density scenario.]

Keywords: heavy section castings, casting simulation, cast iron, mechanical property prediction, EN-GJS-500-14