







Análisis microestructural de una superaleación Inconel IN 713-C expuesta a altas temperaturas

Microstructural analysis of a superalloy Inconel IN 713-C exposed to high temperatures

M. L. Saucedo Muñoz ^{a*}, V. M. López Hirata ^a, V. Miranda López ^a, I. De Jesús Sánchez ^a, C. Pérez Téllez ^a y
N. A. López López ^a.

^a Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07300, CDMX, México.

Resumen

El Inconel 713C es una superaleación base Ni con buenas propiedades mecánicas a temperaturas de 600 a 900 °C y que se utiliza en estado de colada, por ejemplo, en la fabricación de punzones que trabajan a estas temperaturas. En este trabajo se presenta un análisis microestructural de un punzón con estructura de colada por microscopía óptica y electrónica de barrido, así como por difracción de rayos X. El estudio permitió conocer las fases formadas durante la solidificación y conocer el origen de la falla durante el uso del punzón a temperaturas alrededor de 600 °C. Las fases formadas son la matriz gama o austenita y la fase gama prima y carburos ricos en Cr $M_{23}C_6$, lo cual concuerda con las predicciones del programa de cómputo Thermo-Calc. Los resultados de Thermo-Calc indican que la fase gama prima proviene tanto del proceso de colada como de la precipitación originada por la temperatura de operación. El punzón presentó un rechupe o cavidad central que originó la falla durante su uso. Los resultados de Thermo-Calc indican que para la composición química del punzón hay un incremento de la densidad en el último líquido solidificado, originando un rechupe en la parte central que dio origen a la fractura.

Palabras Clave: Superaleación, inconel in 713-c, estructura de colada, evolución microestructural, thermo-calc, falla.

Abstract

Inconel 713-C is a Ni-based superalloy with good mechanical properties at temperatures of 600-900 °C utilized in the as-cast condition. For instance, this alloy is used to fabricate a punch that works at these temperatures. This work presents a microstructure analysis of a superalloy punch using optical and scanning electron microscopy and X-ray diffraction. This study enables us to know the phases formed at 600 °C, and they were gamma phase, gamma prime and Cr-rich $M_{23}C_6$ carbides. This fact agreed well with the predictions of Thermo-Calc. The punch presented a central sink, which caused its failure during operation. Thermo-Cal also indicated that this failure is caused due to an increase in density during solidification.

Keywords: Superalloy, inconel in 713-c, as-cast structure, microstructure evolution, thermo-calc, failure.

1. Introducción

El origen del término "Superalloy" es bastante ambiguo. Las primeras obras se refieren solamente a aleaciones resistentes al calor o aleaciones de alta temperatura. No existe una definición exacta de una superaleación, aunque una aceptada es que una superaleación es una aleación basada en el grupo VIII de elementos (níquel, cobalto o hierro con un alto porcentaje de níquel añadido), en la cual se añade varios elementos de aleación. La característica principal de una

superaleación es que demuestra una combinación de resistencia mecánica y estabilidad microestructural a temperaturas de 600 a 900 °C (ASM, 1998).

Las superaleaciones base níquel alcanzan una buena combinación de resistencia mecánica y a la oxidación a altas temperaturas, 600 a 900 °C. Las superaleaciones se pueden moldear o forjar, haciéndolas ideales para las aplicaciones más exigentes, tales como componentes de turbina.

La buena resistencia mecánica de las superaleaciones base níquel a temperaturas de altas temperaturas se debe a la

*Autor para la correspondencia: msaucedom@ipn.mx

Correo electrónico: msaucedom@ipn.mx (Maribel Leticia Saucedo Muñoz), vmlopezh@ipn.mx (Víctor Manuel López Hirata), vmiranda11600@alumno.ipn.mx (Valeria Miranda López), isanchezp2500@alumno.ipn.mx (Ivan De Jesús Sánchez Pulido), cperez1800@alumno.ipn.mx (Carolina Pérez Téllez) y nlopezl1800@alumno.ipn.mx (Nora Azeneth López López).

precipitación de altas fracciones volumen de la fase γ' Ni (Al,Ti), lo cual requiere contenidos combinados de aluminio y titanio de al menos cuatro a seis por ciento en peso. Este precipitado es la principal fase de las aleaciones fundidas como Rene 80, MAR-M 247 e Inconel 713 (ASM, 1998).

Las superaleaciones base níquel son una aleación importante en diversas industrias, especialmente en aplicaciones de alta temperatura. Estas son ampliamente utilizadas en motores de turbina de gas, aviones, reactores, submarinos, centrales de vapor, equipos petroquímicos y otros equipos con aplicaciones de alta temperatura.

El Inconel 713-C es una superaleación base níquel que se usa en estado de colada. Esta aleación posee excelentes propiedades mecánicas hasta 900° C. También tiene una excelente resistencia a la oxidación y la fatiga térmica, así como una buena moldeabilidad.

Por otro lado, existen programas de simulación numérica como Thermo-Calc (TC) y TC PRISMA (Thermo-Calc, 2025), que se han desarrollado con la finalidad de hacer cálculos que predicen o ayuden en la comprensión de complejas aleaciones multicomponentes, cálculos termodinámicos, la determinación cinética de la precipitación y pronosticar los cambios microestructurales en las aleaciones metálicas (Anderson y colaboradores, 2002).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es analizar experimentalmente la precipitación que ocurre en una superaleación Inconel 713-C de un punzón que trabajó a 600° C, y comparar los resultados experimentales con los predichos por Thermo-Cal para entender el efecto de la precipitación sobre sus propiedades mecánicas

2. Metodología numérica

El programa de cómputo Thermo-Calc TC utilizó las bases de datos termodinámica TCNi9 y de difusión o movilidad atómica MobNi6. Adicionalmente, se requiere proporcionar la composición química y temperatura. Asimismo, este programa permitió determinar las fases presentes en equilibrio y no equilibrio, módulo de Scheil. Asimismo, TC PRISMA permitió analizar la cinética de precipitación de la fase γ' . Los programas de Thermo-Calc cuenta con una serie de módulos: TDB es la base de datos termodinámicos y de difusión, módulo GES tiene los modelos para modelar la energía libre, POLY realiza los cálculos de equilibrio, REN genera los resultados en forma de tablas y gráficos, y PRISMA hace los cálculos basados en las teorías de nucleación y crecimiento (Thermo-Calc, 2025).

3. Metodología experimental

La Figura 1 muestra las dimensiones del punzón o indentador. El punzón trabajo a 600 °C por cargas de compresión de 100 a 140 kN por tiempos prolongados de hasta una semana. La composición química del Inconel 713-C se ilustra en la Tabla 1, la cual se obtuvo usando un espectrómetro de absorción atómica GBC Avanta. En esta tabla se observa que cumple con los valores característicos de Ni, Cr y Mo que le confieren una resistencia mecánica a temperaturas de altas temperaturas. Se uso una cortadora Minitom de baja velocidad con disco de diamante para cortar el punzón. Todas las

muestras se prepararon metalográficamente con lijas de carburo de silicio hasta el grado 1000 y posteriormente se pulieron con alúmina de 0.5 y 0.05 μm . Las muestras pulidas se atacaron químicamente con el reactivo Carapela (ASM, 1998). Las muestras atacadas se observaron en un microscopio óptico MO Nikon MA200 y en un microscopio electrónico de barrido MEB JEOL 6300 a 20 kV con electrones secundarios equipado con microanálisis químico EDX. La muestra se analizó por difracción de rayos X en un difractor Rigaku IV con radiación Ka de cobre. Asimismo, se determinó dureza Vickers en un microdurómetro Future Tech de acuerdo con una carga de 200 g por 12 s, siguiendo la norma ASTM (ASTM E-92, 2024).

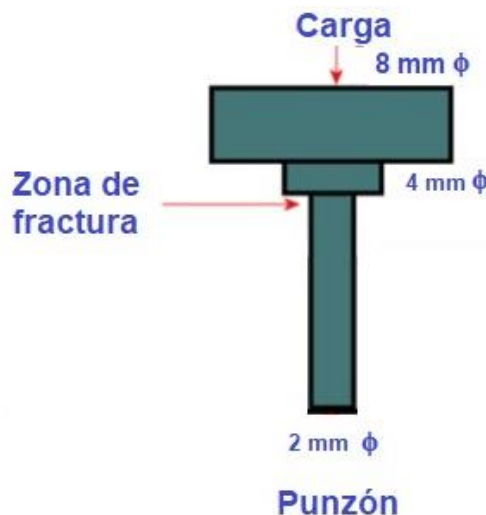


Figura 1: Figura esquemática del punzón.

Tabla 1: Análisis químico del Inconel 713-C.

Elemento	% peso
C	0.12
Cr	12.5
Mo	4.20
Nb	0.90
Ti	0.80
Al	6.00
Ta	1.75
Zr	0.10
B	0.012
Ni	Balance

4. Resultados y Discusión

4.1. Fases del Inconel 713-C en No Equilibrio

La Figura 2 muestra la gráfica de temperatura contra la fracción mol de sólido en condiciones de no equilibrio obtenida por el módulo Scheil de Thermo-Calc (Lipparr y

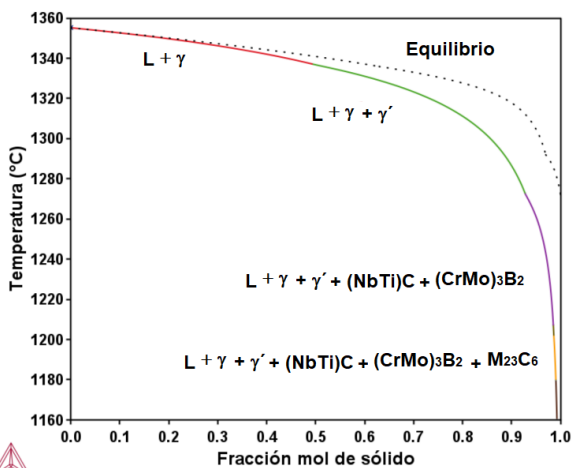


Figura 2: Gráfica de Thermo-Calc para temperatura vs. fracción mol de sólido para el Inconel IN-713C en condiciones de no equilibrio

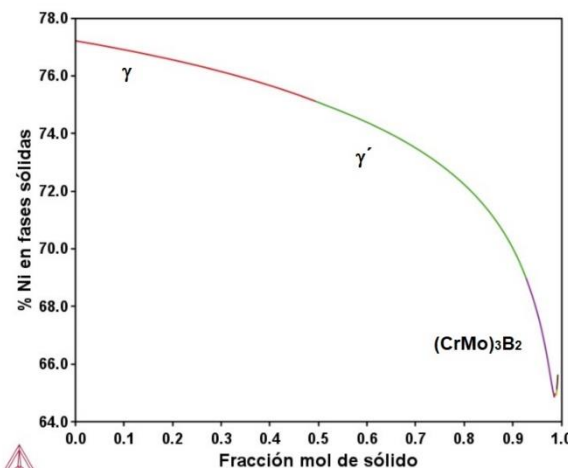


Figura 3: Gráfica de Thermo-Calc para % Ni vs. fracción mol de sólido para el Inconel IN-713C en condiciones de no equilibrio.

colaboradores, 1998). Un enfriamiento lento corresponde al equilibrio, mientras uno más rápido corresponde a no equilibrio. Esta gráfica correspondería a la superaleación en estado de colada en no equilibrio. La línea negra discontinua corresponde al equilibrio. Este gráfico indica que la primera fase sólida que se forma durante la solidificación es la fase γ en forma dendrítica y posteriormente la región interdendrítica está compuesta por la fase γ' , el carburo $(\text{NbTi})\text{C}$, el boruro $(\text{CrMo})_3\text{B}_2$ y el carburo rico en Cr M_{23}C_6 .

Asimismo, la gráfica del % Ni en función de la fracción mol de sólido se presenta en la Figura 3. Aquí se observa que el contenido de Ni disminuye de las dendritas del γ hacia la región interdendrítica que correspondería al no equilibrio del estado de colada. Esto indica que la composición química no es uniforme en la superaleación, pero esto se va corrigiendo durante su tratamiento térmico y exposición a alta temperatura.

La variación de la densidad conforme solidifica las fases se ilustra en la Figura 4. Esta figura muestra un incremento de la densidad súbito al final de la solidificación y se asocia con la presencia del microrechupe pequeño observado en el centro del punzón y que origino su posterior falla. Los cambios de volumen durante la solidificación originan rechupes (Flemings, 1974).

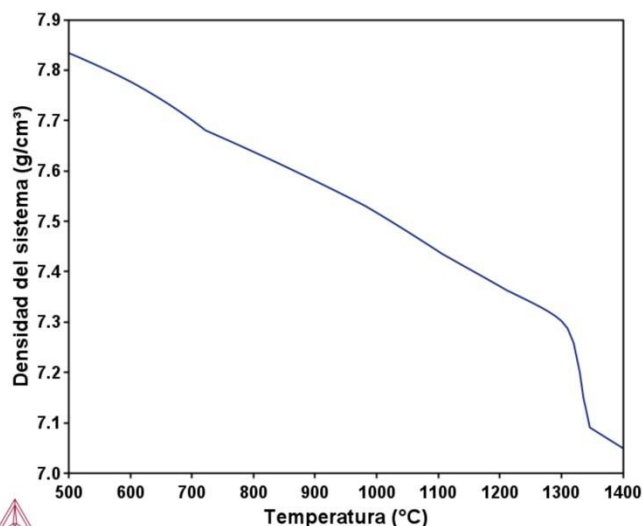


Figura 4: Gráfica de Thermo-Calc para la densidad vs. temperatura para el Inconel IN-713C en condiciones de no equilibrio.

4.2. Fases del Inconel 713-C en Equilibrio

La Figura 5 muestra la gráfica de Thermo-Calc de la fracción volumétrica de las fases en equilibrio en función de la temperatura. Algo importante a notar es que la solidificación comienza con la reacción eutéctica, $L \rightarrow \gamma + \gamma'$ a 1375 °C, como se observa en la figura. Posteriormente ocurre la reacción de precipitación $\gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$ a aproximadamente 1200 °C. Subsecuentemente, pueden precipitar fases tales como, el boruro $(\text{CrMo})_3\text{B}_2$ y el carburo rico en Cr M_{23}C_6 .

La precipitación de la fase γ' en la fase γ se analizó mediante TC-PRISMA (Thermo-Calc, 2025), considerando una composición promedio de la fase γ en condiciones de no equilibrio. La Figura 6 presenta el diagrama Tiempo-Temperatura-Precipitación TTP de la precipitación intragranular de la fase γ' .

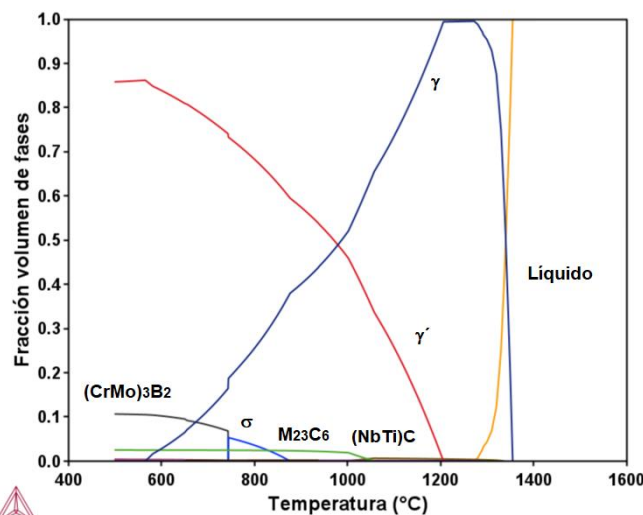


Figura 5: Gráfica de Thermo-Calc para fracción mol de las fases vs. temperatura para el Inconel IN-713C en condiciones de equilibrio.

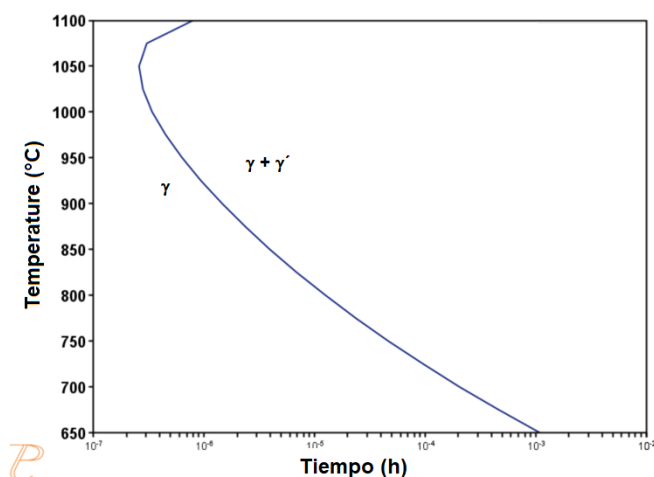


Figura 6: Diagrama TTP de Thermo-Calc para el Inconel IN-713C.

Este diagrama indica que la cinética de precipitación más rápida (Porter y colaboradores, 2023) ocurre a aproximadamente 1050 °C. El tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación para el Inconel IN-713C no requiere un tratamiento de solubilizado y temple, sino que se envejece directamente la superaleación en estado de colada a 930 °C por 4 h, originando la precipitación de la fase secundaria γ' que es la principal responsable de la resistencia a la termofluencia. Este tiempo es el recomendado para este tipo de superaleación (ASM, 1998).

Asimismo, la evolución del radio medio de los precipitados en función del tiempo para la superaleación envejecida a 930 °C se ilustra en la Figura 7. Los precipitados se nuclean y crecen rápidamente para entrar a la etapa de engrosamiento (Porter y colaboradores, 2023).

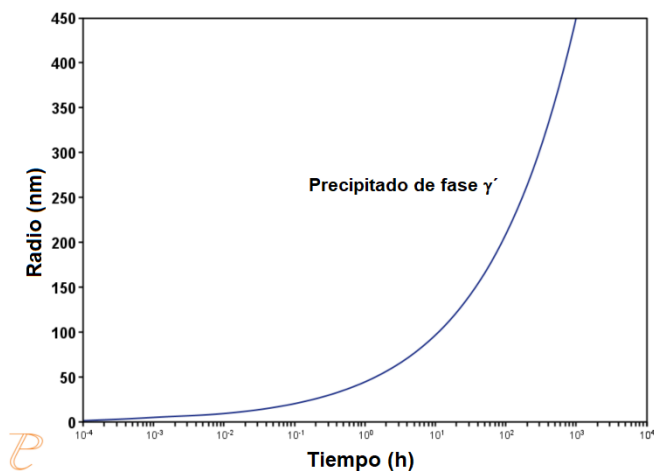


Figura 7: Gráfica de Thermo-Calc para el radio de los precipitados de γ' vs. tiempo para el envejecido a 930 °C del Inconel IN-713C.

4.3. Análisis Microestructural del Punzón

La macrografía del punzón de Inconel IN-713C se muestra en la Figura 8. Aquí se observan macrogranos de aproximadamente 2000 μm con una estructura dendrítica de la fase γ . Asimismo, se observa un pequeño rechupe en el centro, el cual actuó como un concentrador de esfuerzos originando la fractura del punzón. La razón de este pequeño rechupe es el súbito incremento en la densidad del último líquido en

solidificar que debió ocupar, Figura 4. Adicionalmente, la Figura 9 presenta la micrografía del MEB donde se observa a más detalle el microrechupe formado durante la solidificación de la superaleación. Este rechupe se origina por la mayor velocidad de enfriamiento, por tener menor diámetro, en esta zona del punzón. Esta pieza se obtiene por fundición a la cera pérdida ya que es muy pequeña y no es fácil de evitar.

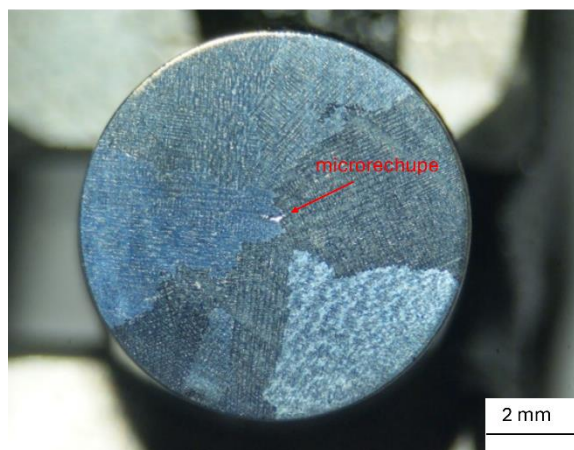


Figura 8: Macrografía del punzón del Inconel IN-713C.

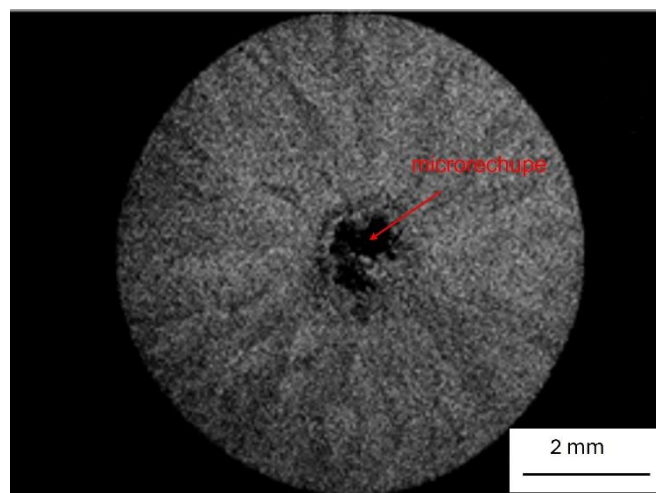


Figura 9: Macrografía MEB del punzón del Inconel IN-713C.

Las micrografías del MEB para el Inconel 713-C se muestran en las Figuras 10 y 11 en diferentes zonas. La microestructura muestra la presencia de precipitados de la fase matriz γ' y precipitados de γ' , fase γ , y el eutéctico $\gamma + \gamma'$, como se indica en la Figura 10. Por otro lado, la Figura 11 indica la presencia de carburos ricos en Cr M_{23}C_6 , carburo $(\text{TiNb})\text{C}$. Estas características microestructurales concuerdan con las predicciones de Thermo-Calc descritas anteriormente.

El patrón de difracción de rayos X mostrado en la figura 12 comprueba la presencia de las fases γ con estructura fcc, γ' con estructura L_{12} , M_{23}C_6 con estructura fcc y $(\text{NbTi})\text{C}$ con estructura fcc, cartas JCPDS 4-0850, 2-1135, 35-0782 y 38-364, respectivamente, (JCPDS, 2025). Este hecho también concuerda con las fases predichas por Thermo-Calc.

La dureza Vickers del punzón varió entre 350 y 390 VHN, con valor promedio de 370 VHN, pero no mostró una tendencia marcada con el cambio de posición en el diámetro de la pieza.

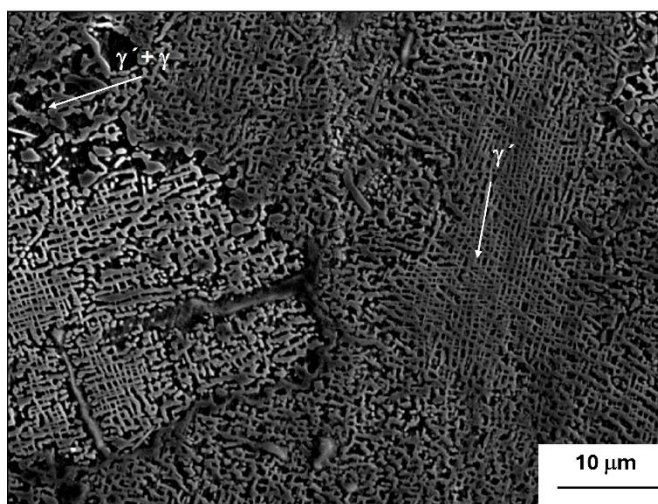


Figura 10: Micrografía MEB del punzón de Inconel IN-713C.

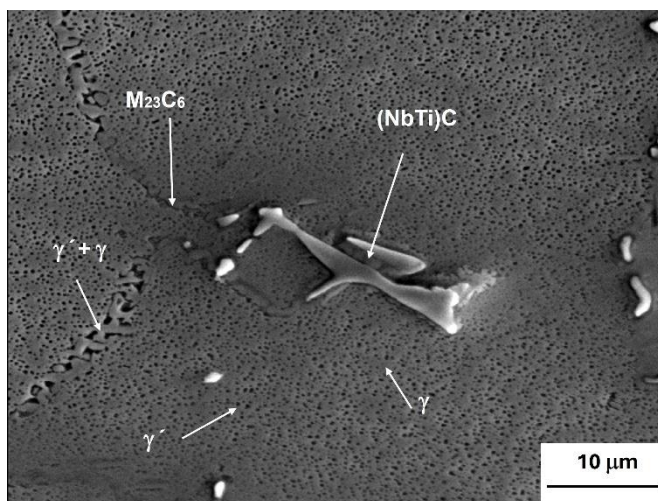


Figura 11: Micrografía MEB del punzón del Inconel IN-713C.

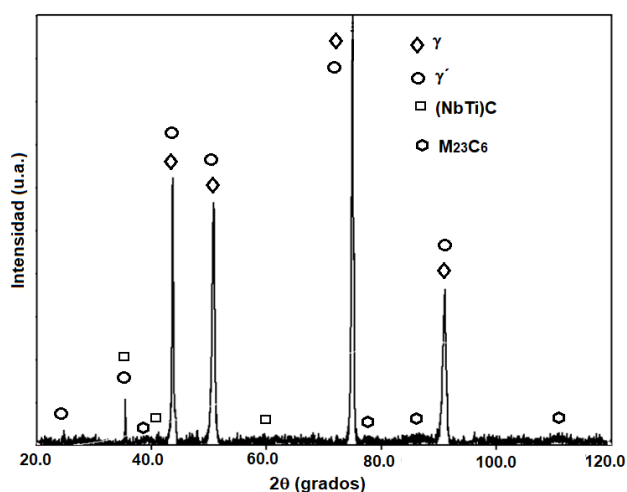


Figura 12: Patrón de difracción de rayos X del Inconel IN-713C.

5. Conclusiones

El análisis microestructural de un punzón de Inconel IN-713C se analizó microestructural con el programa de cómputo Thermo-Calc permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- El programa de cómputo Thermo-Calc predice de las fases formadas, γ , γ' , $M_{23}C_6$ y $(NbTi)C$ en la superaleación en condiciones de colada y después de su exposición térmica a temperaturas de 600 °C. Estas fases concuerdan con los resultados de MEB y DRX.
- Los resultados de Thermo-Calc indican un incremento de la densidad al último de la solidificación lo que provocó la formación de un microrechupe y su posterior falla mecánica durante su operación en condiciones de termofluencia 600 °C.
- Las fases formadas durante el tratamiento de endurecimiento por precipitación proporcionaron una dureza promedio de 370 VHN adecuada para las condiciones de trabajo del punzón, sin embargo, el microrechupe formado durante la colada ocasionó su falla mecánica, debido a la carga de compresión que soporta, actuando como un concentrador de esfuerzos durante su operación a 600 °C bajo cargas de compresión de 100 a 140 kN.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a SIP-Beifi-IPN.

Referencias

- ASM. (1998). ASM metals handbook, Superalloys, ASM International, Ohio, EUA.
- ASTM E-92. (2024). Standard test method for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials, ASTM.
- Andersson, J-O., Helander, T., Hoglund, L., Shi, P., Sundman, B. (2002) THERMO-CALC & DICTRA, Computational tools for materials science. 26, 273-312.
- Borgenstam, A., Engstrom, A., Honglund, L., Agren, J. (2000). DICTRA, a tool for simulation of diffusional transformations in alloys, J. Phase. Equil. 23, 269-280.
- Flemings, M.C. (1974). Solidification processing. McGraw-Hill, EUA.
- JCPDS. (2025). X-ray database. ICDD.
- Lippard, H.E., Campbel, C.E., Bjorklind, T., Borgreen, U., Kellgren, P. David, V.P., Olson, G.B. (1998). Microsegregation behavior during solidification and homogenization of Aer Met100 steel. Met. Mater. Trans. B, 29, 205-210.
- Porter, D.A., Easterling, K.E., Sherif, M.Y. (2021). Phase transformations in metals and alloys, CRC press, EUA.
- Thermo-Calc (2025). Thermo-Calc Software.