

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**PRODUCCIÓN DE PIEZAS DE JOYERÍA EN PLATA 925
POR COMPACTACIÓN - SINTERIZACIÓN**

(Investigación tecnológica)

Presentada por:

Br. DIK ABEL KEDI LEÓN ORUÉ

Br. RUBÉN DARÍO VALDEIGLESIAS LOPA

**Para optar al Título Profesional de
Ingeniero Metalúrgico**

Asesor: Dr. PEDRO CAMERO HERMOZA

CUSCO – PERÚ

2022

PRESENTACIÓN

En nuestra calidad de tesis; nos dirigimos **AL SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA, SEÑORES DOCENTES MIEMBROS DEL JURADO:**

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Facultad, y con objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la tesis colectiva intitulada:

“PRODUCCIÓN DE PIEZAS DE JOYERÍA EN PLATA 925 POR COMPACTACIÓN - SINTERIZACIÓN” (Investigación tecnológica) donde se hace la investigación de producción de piezas de joyería en plata 925 a partir de polvos metalúrgicos haciéndose las pruebas de laboratorio en compactación de aleación de 92.5% de plata y 7.5% de cobre a tres niveles, sinterizando del material compactado a tres niveles de temperatura y tiempo.

Dik Abel Kedi Leon Orue
Rubén Darío Valdeiglesias Lopa

DEDICATORIA

A Dios, por la fuerza, fortaleza y sabiduría que me brinda día a día, para seguir adelante.

A mis padres Luisa Orué y Paulino León, por su apoyo incondicional y los valores que me inculcaron desde niño.

A mis hermanas y hermanos, porque gracias a ellos aprendí, que en la vida nada es imposible.

A los docentes, amigos y compañeros que supieron comprenderme en mi formación personal y académica.

DIK ABEL KEDI LEÓN ORUÉ

DEDICATORIA

*Con inmensa gratitud, a mis queridos padres
Victor y Eva, por su esfuerzo, amor,
dedicación y los valores que con su ejemplo
aprendí.*

*Con mucho amor a mi esposa Hilda, por
su paciencia, amor, comprensión y
apoyo incondicional.*

*Con inmenso amor a mis hijos Mijael y Mayra
Que son la razón de mi vida y el motor
que me impulsa y seguir adelante.*

*A los docentes, personal administrativo,
amigos y compañeros que fueron un
apoyo constante en mi formación
personal y académica.*

RUBÉN DARIO VALDEIGLESIAS LOPA

AGRADECIMIENTO

En calidad de tesis; es grato dirigimos al personal profesional, técnico y administrativo de la empresa: ORO INCA, ubicada en la ciudad de Cusco, por brindarnos sus instalaciones, para la realización de las pruebas de laboratorio de compactación y sinterización para la elaboración del presente trabajo de tesis.

También nuestro agradecimiento a todos los docentes y administrativos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por brindarnos sus conocimientos y experiencias profesionales, de igual forma a todas las personas que hicieron posible la realización del presente trabajo de tesis.

Agradecemos al ingeniero Pedro Camero Hermoza, por el asesoramiento y colaboración brindada para la culminación de este trabajo de tesis.

Debemos hacer extensivo nuestro agradecimiento a todos nuestros compañeros y amigos que nos brindaron su apoyo incondicional.

Dik Abel Kedi Leon Orue

Rubén Dario Valdeiglesias Lopa

RESUMEN

En la región del Cusco existen diversas empresas joyeras dedicadas a la producción de joyas en oro, plata y sus aleaciones respectivas, que producen dichas joyas por los métodos tradicionales y de forma artesanal con numerosas etapas en el proceso productivo, por lo que se propone la fabricación de joyas por el método de compactación – sinterización de polvos metalúrgicos en aleación de plata 925 y así reducir el número de etapas de producción de forma neta o casi neta, reducción de costos y mano de obra. Para lo cual los investigadores realizaron pruebas en laboratorio de compactación a tres niveles 3.00, 5.00 y 7.00 (ton-f) este producto en verde se llevó a un horno de resistencia eléctrica para la sinterización a tres niveles de temperatura que son 720, 780 y 840 (°C) durante tres niveles de tiempo 5.00, 10.00 y 15.00 (min). Como resultado de esta investigación se tiene que a mayor fuerza de compactación disminuye la porosidad, a mayor temperatura de sinterización disminuye la porosidad, a mayor tiempo de sinterización disminuye la porosidad por lo que se concluye que la porosidad es inversamente proporcional a la fuerza de compactación, temperatura y tiempo de sinterización.

Palabras clave: producción de piezas de joyería, fuerza de compactación, temperatura y tiempo de sinterización, plata (β), aleación 925.

ABSTRACT

In the Cusco province there are several jewelry companies dedicated to the production of gold, silver and respective alloy jewelry that produce said jewelry by traditional methods and in an artisanal way with numerous stages in the production process, for which the manufacture of jewels by the method of compaction - sintering of metallurgical powders in 925 silver alloy and thus reduce the number of production stages in a net or almost net way, reducing costs and labor. For which the researchers carried out compaction laboratory tests at three levels 3.00, 5.00 and 7.00 (ton-f) this green product was taken to an electric resistance furnace for sintering at three temperature levels that are 720, 780 and 840 (°C) for three time levels 5.00, 10.00 and 15.00 (min). As a result of this investigation, it is found that the greater the compaction force, the porosity decreases, the higher the sintering temperature, the porosity decreases, the longer the sintering time, the porosity decreases, so it is concluded that the porosity is inversely proportional to the compaction force, temperature and sintering time.

Keywords: production of jewelry pieces, compaction force, sintering temperature and time, silver (β), alloy 925.

INTRODUCCIÓN

Este estudio investiga la factibilidad de fabricar joyería de baja densidad y mayor volumen de aleaciones de plata 925, a partir de polvos metalúrgicos, comparando muestras procesadas a distintas condiciones de fuerza de compactación, temperatura y tiempo de sinterización.

Se sometieron a prueba las hipótesis. Los resultados indican que es factible obtener piezas de joyerías en plata 925 a partir de polvos metalúrgicos PM, los cuales son altamente trabajables.

Se desarrollo el planteamiento del problema, objetivos, hipótesis, justificación, variables y matriz de consistencia.

En el marco teórico se desarrolló sobre las propiedades de la plata, aleaciones de plata, polvos metalúrgicos (PM), pulvimetalurgia, procesos de difusión de los metales, fases de los metales, sinterización y el análisis de diseño de experimentos.

En el procedimiento experimental, se realizó primero las pruebas preliminares que nos permitió implementar los insumos y las herramientas requeridas para completar la investigación, seguido de la toma de muestras, tamizado de muestras, aleación de plata 925, análisis químico de los metales previos, compactación a distintas fuerzas de compresión, sinterización a distintas temperaturas y tiempos.

En el último capítulo se desarrolló el análisis de resultados, análisis de las pruebas con diseño factorial, análisis de las variables de estudio, interpretación de resultados, interpretación del efecto de las variables (fuerza de compactación, temperatura de sinterización y tiempo de sinterización).

Concluyendo el trabajo que es factible obtener piezas de joyería en plata 925 a partir de PM mediante el proceso de compactación sinterización.

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCIÓN	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
SIMBOLOGÍA.....	xvi
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4 Justificación e importancia	3
1.4.1. Justificación	3
1.4.2. Importancia.....	4
1.5 Limitaciones	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Propiedades de la plata y el cobre.....	10
2.2.1. Propiedades físicas de la plata	10
2.2.2. Propiedades químicas de la plata	10
2.2.3. Propiedades físicas del cobre	11
2.2.4. Propiedades químicas del cobre	11
2.2.5. Aleaciones de plata con cobre.....	12
2.3. Pulvimetalurgia	13
2.3.1. Polvos metalúrgicos.....	13
2.3.2. Producción de polvos.....	15
2.3.3. Caracterización del polvo	17
2.3.4. Preparación del polvo	20
2.3.5. Mezclado	21

2.4.	Consolidación del polvo	24
2.4.1.	Prensado	24
2.4.2.	Prensado en frío	24
2.4.3.	Prensado en caliente	28
2.4.4.	Energía almacenada del trabajo en frío	29
2.5.	Difusión en soluciones sólidas.....	31
2.5.1.	Frecuencia de Debye.....	32
2.5.2.	Difusión	33
2.5.3.	Estabilidad de átomos e iones	33
2.5.4.	Mecanismos de difusión	34
2.5.5.	Energía de activación de la difusión	36
2.5.6.	Velocidad de difusión (primera ley de Fick)	37
2.5.7.	Factores que afectan la difusión.....	40
2.5.8.	Perfil de composición (segunda ley de Fick)	42
2.5.9.	Autodifusión en metales puros.....	44
2.5.10.	Difusión química a baja concentración del soluto.....	46
2.5.11.	Electrotransporte y termomigración.....	47
2.6.	Fases.....	47
2.6.1.	Definiciones básicas	47
2.6.2.	Fases intermedias.....	47
2.6.3.	Termodinámica de las soluciones	48
2.6.4.	Equilibrio entre dos fases.....	48
2.6.5.	Numero de fases en un sistema de aleación	49
2.6.6.	Sistema eutéctico cobre-plata.....	49
2.6.7.	Microestructura de equilibrio del sistema eutéctico cobre-plata	49
2.7.	Sinterización.....	50
2.7.1.	Fuerza impulsora para la sinterización.....	50
2.7.2.	Transformaciones que ocurre en el calentamiento	50
2.7.3.	Proceso de sinterizado	51
2.7.4.	Combinación de prensado y sinterizado.....	55
2.8.	Acabado de piezas	57
2.9.	Análisis y diseño de experimentos.....	58
2.9.1.	Diseño factorial 3^k	58
2.9.2.	Análisis de varianza (ANOVA).	60
CAPÍTULO III.....		61
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		62
3.1.	Hipótesis.....	62

3.1.1. Hipótesis general	62
3.1.2. Hipótesis específicas.....	62
3.2. Variables e indicadores.....	62
3.2.1. Variable dependiente	62
3.2.2. Variables Independientes.....	62
3.2.3. Indicadores	62
3.3. Matriz de operacionalización de variables.....	64
3.4. Introducción	65
3.4.1. Obtención de polvos metálicos de plata y cobre	65
3.4.2. Diagrama del proceso de refinación de oro, plata y cobre a partir de lingote metálico dore.....	69
3.4.3. Fabricación de matriz para la compactación de polvos metalúrgicos.....	72
3.5. Descripción de los procesos experimentales.....	74
3.5.1. Diagrama del proceso	75
3.5.2. Equipos y herramientas.....	75
3.6. Adecuamiento de los polvos metalúrgicos.....	76
3.6.1. Análisis granulométrico.....	76
3.6.2. Muestreo.....	78
3.6.3. Análisis químico de polvos metalúrgicos por rayos X.....	78
3.7. Pruebas de aleación de plata con cobre.....	81
3.7.1. Aleación de plata 925	81
3.8. Pruebas de compactación de polvos metalúrgicos en laboratorio	81
3.8.1. Pruebas de compactación de polvo metalúrgico en plata 925	81
3.8.2. Resultado de las pruebas de compactación en plata 925	83
3.9. Pruebas de sinterización	84
3.9.1. Resultado de las pruebas de sinterización en plata 925.....	84
3.10. Pruebas de compactado y sinterizado de polvos metalúrgicos en plata 925 en diseños de matrices comerciales	86
b) Diagrama del proceso de elaboración de piezas de joyería y fabricación de joyas en plata 925	87
CAPÍTULO IV.....	92
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
4.1. Introducción	92
4.2. Método, tipo y nivel de investigación.....	92
4.3. Universo y muestra.....	92
4.4. Técnica e instrumento de recolección de datos.....	93
4.4.1. Técnica	93

4.4.2.	Instrumentos de recolección de datos	93
4.4.3.	Materiales e insumos	93
4.5.	Análisis de las pruebas con diseño factorial 3^3	93
4.5.1.	Interpretación del efecto de la compactación	101
4.5.2.	Interpretación del efecto de la temperatura de sinterización	102
4.5.3.	Interpretación del efecto del tiempo de sinterización	103
4.5.4.	Interpretación del estudio metalográfico de las probetas sinterizadas de Ag-Cu ..	104
CONCLUSIONES		105
RECOMENDACIONES		106
BIBLIOGRAFÍA		107
ANEXOS		109
Anexo - A		109
Anexo - B.....		113
Anexo - C.....		126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. temperaturas y tiempos típicos de sinterizado	56
Tabla 2. Tabla de ANOVA para el diseño factorial 3x3	61
Tabla 3. Composición química de la plata 925	65
Tabla 4. Balance de materiales del proceso de recuperación de metales a partir de residuos de joyería en peso	68
Tabla 5. Balance de materiales del proceso de recuperación de metales a partir de residuos de joyería en porcentaje	68
Tabla 6. Reporte del análisis químico del lingote metálico (Ag)	68
Tabla 7. Resultados del tamizado de polvo metalúrgico de plata	76
Tabla 8. Resultado del tamizado de polvo metalúrgico de cobre	77
Tabla 9. Reporte del análisis químico de polvo metalúrgico de plata (Ag)	79
Tabla 10. Reporte del análisis químico de polvo metalúrgico de cobre (Cu)	80
Tabla 11. Reporte de pruebas de compactación de polvos metalúrgicos de plata 925 en cada réplica.	84
Tabla 12. Reporte de pruebas de sinterización de los polvos metalúrgicos en plata 925	85
Tabla 13. Niveles de prueba según codificaciones originales y codificadas	95
Tabla 14. Resultado de porcentaje de porosidad según codificaciones y clasificación de muestra.	96
Tabla 15. Resultado de procesamiento de datos ANOVA para el diseño factorial 3 ³	97
Tabla 16. Resultado de procesamiento de datos ANOVA para el diseño factorial 3 ³	99
Tabla 17. Resultado de análisis de efectos de datos ANOVA para el diseño factorial 3 ³	100
Tabla 18. Análisis estadístico de varianza	100
Tabla 19. Análisis estadístico de varianza y ecuación de regresión	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flauta altus de plata 925 elaborada por sinterización	7
Figura 2. a) arcilla de plata con aglutinantes, b) procedo de sinterización de la arcilla, c) arcilla sinterizada	8
Figura 3. Diagrama de fases cobre - plata	13
Figura 4. Producción de polvos por distintas operaciones a) atomización con gas, b) atomización centrífuga, c) atomización por arco de plasma.....	17
Figura 5. Comportamiento del polvo al ser compactado	23
Figura 6. Ensayo de flexión.....	25
Figura 7. Densidad de un cuerpo crudo	26
Figura 8. Densidad uniforme de llenado.....	28
Figura 9. Presión omnidireccional.....	29
Figura 10. Energía almacenada del trabajo en frío	31
Figura 11. Las dos formas básicas de soluciones sólidas, a) solución sólida sustitucional, b) solución sólida intersticial	32
Figura 12. Difusión de átomos de cobre en níquel con el tiempo, los átomos de cobre se distribuyen de manera aleatoria a lo largo del níquel.	35
Figura 13. Mecanismos de difusión en los materiales: a) difusión por vacancia o átomos sustitucionales y b) difusión intersticial.....	36
Figura 14. Se requiere de una energía de activación Q para forzar átomos entre sí durante la difusión. Por lo general, se requiere más energía en el caso de un átomo sustitucional que en el de un átomo intersticial	38
Figura 15. El flujo durante la difusión se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo.....	39
Figura 16. Ilustración del gradiente de concentración	40
Figura 17. La energía de activación de la autodifusión aumenta a medida que se incrementa el punto de fusión del metal	42
Figura 18. Difusión de átomos en la superficie de un material que ilustra el uso de la segunda ley de Fick.....	43
Figura 19. Gráfica que muestra el argumento y el valor de la función de error que se encuentran en la segunda ley de Fick	44
Figura 20. El curso del sinterizado	52
Figura 21. Diagrama de las etapas clásicas de sinterización en fase líquida.....	54
Figura 22. Tiempo de sinterizado	55
Figura 23. Densidad de un compacto de hierro	59
Figura 24. Ejemplo de efecto lineal y efecto con curva.....	60
Figura 25. Diagrama de flujo de recuperación de oro y plata de residuos de joyería.....	66

Figura 26. Proceso de separación de metales de la materia orgánica en horno eléctrico a 750 °C..	67
Figura 27. Diagrama de refinación de oro, plata y cobre.....	69
Figura 28. a) precipitación de cloruro de plata AgCl, b) reducción del cloruro de plata en plata metálica.	71
Figura 29. Precipitado de cobre metálico	71
Figura 30. diseño de matriz en software (Corel DRAW) para compactado de polvos de plata 925.	72
Figura 31. Diseño en software (Corel DRAW) de figuras en matriz de compactado de la trilogía Inca dentro de la cruz andina a) positivo y b) negativo.....	73
Figura 32. Proceso de fabricación de matrices para compactado.....	73
Figura 33. Proceso de grabados de diseños comerciales para joyería	74
Figura 34. Tamizado de polvos metalúrgicos de plata.....	76
Figura 35. Tamizado de polvo metalúrgico de cobre.....	77
Figura 36. Análisis químico de polvo metalúrgico de plata.....	79
Figura 37. Análisis químico de polvo metalúrgico de cobre.....	80
Figura 38. Llenado de la matriz de compactación con polvo metalúrgico de aleación de plata 925	82
Figura 39. a) proceso de compactación, b) muestras compactadas de polvos metalúrgicos en aleación de plata 925.	83
Figura 40. Sinterización de las probetas verdes previamente compactadas	86
Figura 41. Piezas de joyería en verde compactados a 7.00 toneladas de fuerza.....	87
Figura 42. Sinterizado de piezas de joyería a 780°C y 10 minutos.....	88
Figura 43. Proceso de calado de las piezas sinterizadas.	89
Figura 44. Formado de piezas en dijes y aretes	89
Figura 45. Micro soldadura de uniones con aporte de material	90
Figura 46. Juego de aretes y dije en plata 925 con diseño de la trilogía inca con cruz andina	90
Figura 47. Dije en plata 925 con diseño de un ave precolombino.	91
Figura 48. Representación geométrica del diseño factorial 3x3x3.....	95
Figura 49. Representación gráfica del modelo lineal de análisis de varianza.	99
Figura 50. Representación gráfica de la fuerza de compactación, temperatura de sinterización y tiempo de sinterización de acuerdo a los valores considerados según el diseño factorial.	101
Figura 51. Comportamiento de las variables a tres niveles diferentes con respecto al porcentaje de porosidad.....	102

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Descripción
A-1	Muestra a 3ton-f compactado, 720°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
A-2	Muestra a 3ton-f compactado, 720°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
A-3	Muestra a 3ton-f compactado, 720°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
A-4	Muestra a 3ton-f compactado, 780°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
A-5	Muestra a 3ton-f compactado, 780°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
A-6	Muestra a 3ton-f compactado, 780°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
A-7	Muestra a 3ton-f compactado, 840°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
A-8	Muestra a 3ton-f compactado, 840°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
A-9	Muestra a 3ton-f compactado, 840°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
B-1	Muestra a 5ton-f compactado, 720°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
B-2	Muestra a 5ton-f compactado, 720°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
B-3	Muestra a 5ton-f compactado, 720°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
B-4	Muestra a 5ton-f compactado, 780°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
B-5	Muestra a 5ton-f compactado, 780°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
B-6	Muestra a 5ton-f compactado, 780°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
B-7	Muestra a 5ton-f compactado, 840°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
B-8	Muestra a 5ton-f compactado, 840°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
B-9	Muestra a 5ton-f compactado, 840°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
C-1	Muestra a 7ton-f compactado, 720°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
C-2	Muestra a 7ton-f compactado, 720°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
C-3	Muestra a 7ton-f compactado, 720°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
C-4	Muestra a 7ton-f compactado, 780°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
C-5	Muestra a 7ton-f compactado, 780°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
C-6	Muestra a 7ton-f compactado, 780°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
C-7	Muestra a 7ton-f compactado, 840°C sinterizado y 5 minutos de sinterizado
C-8	Muestra a 7ton-f compactado, 840°C sinterizado y 10 minutos de sinterizado
C-9	Muestra a 7ton-f compactado, 840°C sinterizado y 15 minutos de sinterizado
PM	Polvos metalúrgicos
CW	Carburo de tungsteno

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1. Planteamiento del problema

En el departamento de Cusco, existen distintas empresas joyeras que producen joyas en metales preciosos tales como oro, plata, cobre y sus aleaciones respectivamente. Estas empresas fabrican joyas por métodos tradicionales, empíricos, antiguos y de manera artesanal. Muchas de las empresas dedicadas a esta actividad no cuentan con la tecnología necesaria para fabricar joyas por otros métodos nuevos y más eficientes para producir joyas a escala industrial; por lo que se tiene baja productividad lo cual es una de las causas de la baja rentabilidad y dificulta su competitividad en el mercado global.

Para la fabricación de joyas, los joyeros usan métodos tradicionales como; el conformado a mano, microsoldadura y **microfusión** a la cera perdida, por ser conocidos desde hace muchos años atrás. Es de saber que estos métodos tradicionales de fabricación de joyas son ineficientes y contaminan el medio ambiente y al personal de trabajo. Por el método de microfusión a la cera perdida se fabrican modelos de joyas en cera, formándose un arbolito de joyas en cera, este árbol se coloca en un molde metálico invertido donde se vierte el revestimiento (yeso refractario), se deja secar el revestimiento, el molde se invierte y se coloca en un horno para hacer evaporar la cera y dejar una cavidad donde posteriormente se vierte el metal líquido aleado, se deja enfriar y se lava el molde, quedando así piezas de joyería en metal y posteriormente se le da sus acabados respectivos a estas piezas (ver anexo A, fig. A-4). Por el método de conformado a mano y microsoldadura inicialmente se pesan, funden y alean los materiales a trabajar, el material en forma de lingote se lamina y o trefila hasta el espesor deseado, según la pieza deseada se suelda el material, y es llevada a un recocido para liberar las tensiones internas y recrystalizar el material

laminado, luego debe ser sometido a un decapado en un reactivo (ácido nítrico diluido, ácido sulfúrico diluido, otros) para eliminar los óxidos de la superficie y posteriormente dar el acabado final (pulido químico, mecánico, engaste de piedras, otros), ver anexo A, fig. A-3.

Las numerosas etapas para la fabricación de joyas, la baja productividad en los métodos antes mencionados son un problema, por lo que se propone la tecnología de polvos metalúrgicos por compactación - sinterización para la producción de piezas de joyería de plata 925 y así reducir el número de etapas del proceso productivo e incrementar la productividad para estudiar su factibilidad en la producción de piezas de joyería. Este método de fabricación de joyas consiste en; mezclar previamente los polvos de plata con cobre a una ley de 925, prensarlos a un grado de compactación adecuado, sinterizarlos en un horno por debajo de la temperatura de fusión del material y finalmente darle los acabados necesarios hasta obtener joyas con valor comercial.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Será factible obtener piezas de joyería en plata 925 (aleación de 92.5% de Ag y 7.5% de Cu), por compactación - sinterización a partir de polvos metalúrgicos?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo determinar la fuerza de compactación necesaria para producir piezas de joyería?
- ¿De qué manera determinar la temperatura de sinterización adecuada para producción de piezas de joyería?
- ¿Cómo establecer el tiempo adecuado de sinterización para producir piezas de joyería?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos General

- Obtener piezas de joyería por compactación - sinterización a partir de polvos metalúrgicos en plata 925.

1.3.2. Específicos

- Determinar la fuerza de compactación necesaria para obtener una forma y resistencia de los polvos mezclados.
- Determinar la temperatura de sinterización.
- Establecer el tiempo de sinterización.

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación

a. Justificación tecnológica

El presente trabajo se justifica por la necesidad de mejorar los métodos tradicionales de fabricación de joyas en plata. En nuestro medio no se utiliza la tecnología de compactación-sinterización de polvos metalúrgicos para fabricar joyas en plata, por lo que se propone utilizar la tecnología existente y adecuarla de manera apropiada que permita obtener piezas de joyería por un método de compactación de polvos metalúrgicos y su posterior sinterización, basadas en aleaciones de plata.

Realizar esta investigación es importante para dinamizar el desarrollo de los procesos productivos en la fabricación de joyas en plata y coadyuvar con el avance de la tecnología en nuestro medio.

b. Justificación económica

El fabricar piezas de joyería por los métodos tradicionales demanda mayor cantidad de tiempo de producción, procesos de producción e insumos, lo que significa altos costos de producción.

La baja productividad de los métodos tradicionales hace que los productos no sean económicamente competitivos en mercado nacional e internacional.

De allí que nace la necesidad minimizar los costos de producción y reducir el tiempo de producción de piezas de joyería, fabricando piezas de joyería por el método de compactación sinterización.

c. Justificación social

Al producir piezas de joyería por el método de compactación sinterización, se obviarán varios pasos de fabricación de piezas de joyería, aprovechando el tiempo y reduciendo la mano de obra. Por ende, los ciclos de producción serán más cortos y habrá un incremento en la economía de las empresas que produzcan joyas por el método de compactación sinterización, porque las pérdidas mayoritarias están en los procesos de producción. Teniendo este sistema de producción en las empresas joyeras se permitirá mayor productividad y se cubrirá la demanda insatisfecha por los clientes.

d. Justificación ambiental

Esta tecnología para producir piezas de joyería por el método de compactación sinterización, permite reducir la cantidad de insumos y residuos peligrosos que se genera por los métodos tradicionales de fabricación de piezas de joyería, de modo que se procesaran tomando en consideración el cuidado del medio ambiente y la salud del personal de trabajo. Siendo de particular importancia la prevención del riesgo en la salud del personal de trabajo, la población en general, y el medio ambiente en la zona de impacto.

1.4.2. Importancia

Esta investigación es de suma importancia por las siguientes razones:

- El método propuesto de fabricar piezas de joyería por compactación sinterización reemplaza los métodos tradicionales, reduciendo el tiempo de fabricación de joyas, minimizando el consumo de energía y por consecuencia reducción de costos de fabricación.
- El desarrollo tecnológico de este método puede reemplazar a los métodos de microfusión, estampado, troquelado, reduciendo varias etapas de procesos, uso de insumos y la cantidad de residuos de desechos producidos por los métodos tradicionales. Este método a comparación de los métodos tradicionales produce mínima cantidad de desperdicios de materia prima en el proceso.
- Con este método propuesto se evita la enfermedad de la silicosis, que se produce por la manipulación de revestimiento refractario con alto contenido de sílice pulverizado, que se utiliza en el método de microfusión a la cera perdida (método utilizado en la producción de joyas a gran escala).

1.5. Limitaciones

- Falta tecnología adecuada para la realización del presente trabajo.
- No se encontró antecedentes sobre el tema de investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En América el descubrimiento de la Metalurgia tuvo un desarrollo propio, el cual se inicia hacia el año 1500 A.C. con los primeros hallazgos de láminas de oro y cobre martillado en los Andes Centrales (Andahuaylas y Cupisnique), mientras que las primeras evidencias de fundición aparecen cerca del año 1000 A.C. en las tierras altas del Perú. Hacia el sur, alrededor del lago Titicaca, las evidencias más tempranas de fundición de cobre son escorias, la roca separada del metal tras la fundición, de cerca de 3000 años de antigüedad. La Metalurgia de los Andes Centrales y del altiplano sur (Perú, Bolivia, norte de Chile y Argentina) enfatizó el trabajo del cobre y sus aleaciones, tanto para útiles y herramientas (cuchillos, hachas, cinceles, pinzas, entre otros), como para objetos ceremoniales y de adorno personal (aros, anillos, máscaras, campanillas, entre otros). No obstante, también existió el trabajo de objetos en plata y oro.¹

Sterling 925 Silver – Sterling es una aleación estándar ya tradicional en la fabricación de flautas de alta calidad. La aleación está compuesta por un 92.5% de plata, ver figura N° 1.

La empresa Mitsubishi Materials Corporation de Japón a principios de los años 90, que se dedica a la fabricación de arcilla de plata, oro y cobre para la fabricación de joyas artísticas, a base de polvo de plata y por proceso de sinterización se logra productos de alta calidad.

¹ <http://www.precolombino.cl/recursos-educativos/tecnologias-precolombinas/metalurgia/>

Figura 1

Flauta altus de plata 925 elaborada por sinterización.



Nota: Adaptado de https://www.promusica.es/88364-large_default/altus-1019se.jpg

Durante el proceso de cocción, los aglutinantes orgánicos se queman y las partículas de plata resultantes "se sinterizan", volviéndose más densas y más fuertes (ver figura N° 2), la combustión de los aglutinantes y la sinterización del metal hacen que la pieza se contraiga en un 8-10% en tamaño total, mientras conserva la forma original. Una vez completamente sinterizada, la pieza restante está compuesta de 99.9% de plata pura.

La sinterización se realiza (30 minutos a 1200 °F, en un continuo de solo 5 minutos a 1472 °F o más).

En los últimos años, los esfuerzos se han centrado en la industrialización de esta tecnología. Se ha conseguido desarrollar una pasta que se utiliza como material de partida en la sinterización. Además, se han desarrollado los útiles necesarios para poder sinterizar sustratos cerámicos. La prensa utilizada en el proceso de sinterización

Figura 2.

a) arcilla de plata con aglutinantes, b) proceso de sinterización de la arcilla, c) arcilla sinterizada.



a)

b)

c)

Nota: Adaptado de http://notigrafix.com/?attachment_id=6608.

ha sido diseñada para poder utilizar diferentes presiones de carga dependiendo del proceso de sinterización.²

Los primeros usos de polvos metálicos han sido utilizados por los Incas y Egipcios. Por ejemplo, polvos de oro fueron fusionados sobre joyas por los Incas, y los Egipcios utilizaron polvos de acero en el año 3000 A.C.

Inicialmente se usó la pulvimetalurgia para obtener piezas de aquellos metales difíciles de fundir industrialmente debido a sus elevados puntos de fusión. La primera aplicación directa de ella parece haber sido en la manufactura de lingotes de platino en el siglo XIX, al mismo tiempo, se fabricaron monedas de polvos de cobre, plata y plomo acuñadas y sinterizadas. En 1855 Townsend empezó a usar las amalgamas dentales (polvo de plata en mercurio). Pero no fue hasta principios del siglo XX que tuvo lugar un desarrollo serio del proceso con la manufacturación de alambre de tungsteno para filamentos de lámparas (Coolidge). En los años 30 se desarrollaron rodamientos porosos de bronce y contactos eléctricos de grafito-cobre. Luego siguieron los materiales de carburos sinterizados para herramientas (por ejemplo,

² http://notigrafix.com/?attachment_id=6608.

WIDIA: carburo de tungsteno en cobalto), aleaciones estructurales férreas y aleaciones de metales refractarios.

Desde los años cuarenta, varios materiales menos comunes han sido procesados desde polvos incluyendo metales refractarios y sus aleaciones (Nb, W, Mo, Zr, Ti y Re). Adicionalmente, el crecimiento de metales estructurales ha avanzado igual en el período. La mayoría de las piezas estructurales producidas de polvos son basadas en hierro.³

Igual de emocionante ha sido la evolución de las aplicaciones, inicialmente, componentes basados en polvos fueron seleccionados simplemente por su bajo costo. Más recientemente, la principal razón de seleccionar una ruta de PM ha sido el mejoramiento de la calidad, homogeneidad o propiedades en conjunto de costo atractivo y productividad.

Como **antecedentes internacionales** se encontró la tesis “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS CERMETS BASE MULLITA REFORZADOS CON NANOPARTÍCULAS DE PLATA” en la Universidad Autónoma del Estado de México donde hacen las investigaciones de los Cermets de materiales arcillosos con nanopartículas de plata.

También se encontró la Tesis “ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROCESO DE SINTERIZACIÓN DE ALEACIONES DE ORO – PLATA” en la Universidad de los Andes de Bogotá Colombia donde realizan la investigación de sinterización de polvos metalúrgicos en aleaciones de oro- plata.

Como **antecedentes nacionales** se encontró investigaciones de tesis del año 2015 "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA RICO EN 80% DE COBRE, ALEADO CON ZINC Y

³ Vetter P.L., (2006). Oro del Perú antiguo.

ESTEARATO DE ZINC PARA EVALUAR LA DUREZA Y EL DESGASTE VÍA LA PULVIMETALURGIA" en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, donde realizan las investigaciones de las propiedades físicas y mecánicas de aleaciones de cobre con zinc.

También se encontró la Tesis "SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN 92CU8ZN1ZN (C10H35O2)2 PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTO LUBRICADOS" en la Universidad Mayor de San Marcos de Lima donde investigan la sinterización de aleaciones de plata para fabricaciones de cojinetes y otros recuestos de automóviles.

2.2. Propiedades de la plata y el cobre

2.2.1. Propiedades físicas de la plata

- Densidad: 10.49 g/cm³ a 20 °C
- Punto de fusión: 961 °C (1234.93 °K)
- Punto de ebullición: 2435 °K
- Calor específico: 0,232 J/g.°K
- Calor latente de fusión: 10³J/g
- Calor latente de ebullición: 2390 J/g
- Conductividad eléctrica: 63·10⁶ S/m (siemens por metro)
- Conductividad térmica: 429 W/m.K
- Coeficiente de dilatación lineal: 19,1·10⁻⁶/K

2.2.2. Propiedades químicas de la plata

- Nombre: plata
- Símbolo: Ag
- Número atómico: 47
- Grupo del sistema periódico: Grupo 11

- Valencia: 1
- Estado de oxidación: +1
- Electronegatividad: 1,93
- Radio atómico: 1,65 Å
- Radio covalente: 1,53 Å
- Estructura cristalina: cúbica centrada en las caras (CCC).
- Configuración electrónica: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^9$,
o bien, [Kr] $4d^{10} 5s^1$
- Primer potencial de ionización: 6,00 eV
- Masa atómica: 107.8683 u

2.2.3. Propiedades físicas del cobre

- Densidad: 8.96 g/cm³ a 20 °C
- Punto de fusión: 1083 °C
- Punto de ebullición: 2595 °K
- Calor específico: 0,385 J/g.°C
- Calor latente de fusión: 1.34×10^4 J/kg
- Calor latente de ebullición: 50 Kca/Kg
- Conductividad eléctrica: 59.6×10^6 S/m (siemens por metro)
- Conductividad térmica: 385 Volt/m.K
- Coeficiente de dilatación lineal: $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

2.2.4. Propiedades químicas del cobre

- Nombre: cobre
- Símbolo: Cu
- Número atómico: 29
- Grupo del sistema periódico: Grupo 11

- Valencia: 1,2
- Estado de oxidación: +2
- Electronegatividad: 1,9
- Radio atómico: 1,28 Å
- Radio covalente: 1,38 Å
- Estructura cristalina: cúbica centrada en las caras (CCC).
- Configuración electrónica: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^9$, o bien, [Ar]
 $3d^{10} 4s^1$
- Primer potencial de ionización: 7.77 eV
- Masa atómica: 63.54 u

2.2.5. Aleaciones de plata con cobre

Existe una gran variedad de aleaciones de plata, según los objetivos que cumplan las piezas. En nuestro caso en específico nos centraremos en la aleación de plata 925 que consiste en una aleación de 92.5% de plata y 7.5% de cobre, esta aleación es usada a nivel mundial para la producción y comercialización de joyería en plata, y está regulada bajo normas técnicas en la mayoría de países tanto para su exportación e importación, es importante mencionar que la adición 7.5% de cobre, le da a esta aleación la consistencia necesaria para que la joya tenga un grado de rigidez y resistencia al desgaste. En el diagrama de fases cobre - plata figura 3, se puede observar las diferentes fases sólidas y líquidas que forman estos metales a diferentes proporciones y temperaturas.

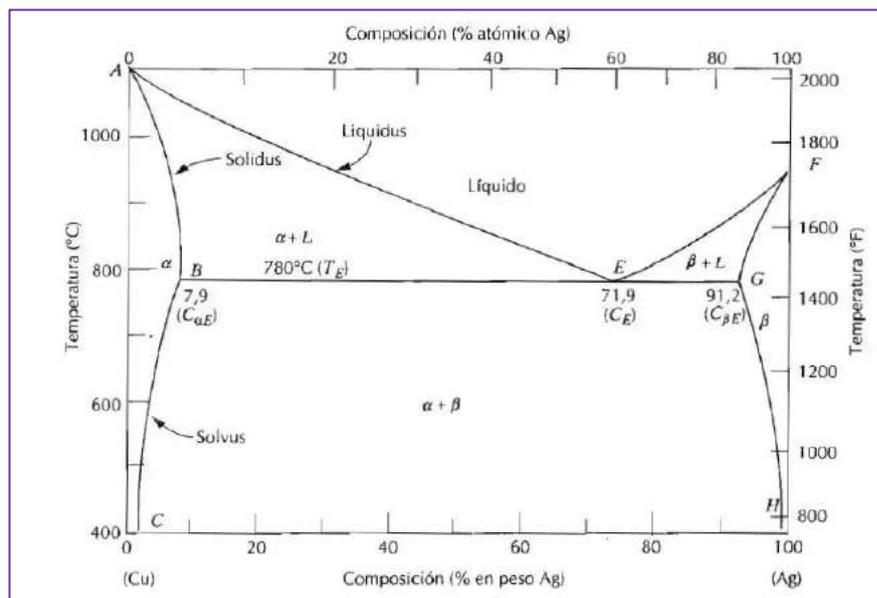
2.3. Pulvimetalurgia

2.3.1. Polvos metalúrgicos

Los polvos metalúrgicos (PM, *powder metallurgy*) es una técnica de procesamiento de metales en la que se producen piezas a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual de producción de la Figura 2. Diagrama de fases cobre – plata.

Figura 3.

Diagrama de fases cobre – plata.



Nota: Adaptado de Reed-Hill, R. (1980), pág. 479.

PM, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión o el enlace entre partículas en una masa dura y rígida. La compresión, se realiza en una prensa hidráulica cuyas herramientas se diseñan específicamente para la pieza que se va a producir. Las herramientas, que consisten generalmente en un dado y uno o más punzones, pueden ser costosas y es por esto que los PM es más adecuado para niveles de producción medianos o altos. El tratamiento térmico, llamado sinterizado, se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. Las

condiciones que hacen de la metalurgia de polvos un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las piezas de PM se pueden producir masivamente en dos formas **neta** (completa) o **casi neta**, eliminando o reduciendo material excedente, lo cual hay la necesidad de un procesamiento de forma posterior.
- Los procesos de la PM implican muy poco desperdicio de material. Cerca de 97% de los polvos iniciales se convierten en productos. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales los bebederos, sistemas de alimentación y mazarotas son material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la PM, se pueden hacer piezas con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de piezas de metal poroso, como cojinetes y engranes impregnados con aceite, así como filtros.
- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos, se pueden formar por metalurgia de polvos. El tungsteno es un ejemplo: los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se fabrican con tecnología de PM.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por PM.
- La PM se compara favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de $\pm 0.13\text{mm}$.
- Los métodos de producción de PM se pueden automatizar para hacer más económica la producción.

Hay limitaciones y desventajas asociadas con el procedimiento de PM.

Estas incluyen:

- a) Alto costo del equipo y de las herramientas.
- b) Alto costo de los polvos metálicos.
- c) Dificultades en el almacenamiento y manejo de los polvos metálicos (como degradación del metal a través del tiempo).
- d) Limitaciones en la forma de las piezas, debido a que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección lateral dentro del dado durante el prensado, y las tolerancias deben permitir que la pieza pueda expulsarse del dado después del prensado.
- e) Las variaciones de la densidad del material a través de la pieza pueden ser un problema, especialmente para piezas de forma completa.⁴

2.3.2. Producción de polvos

Los polvos se pueden fabricar por medio de diferentes técnicas.

Extracción. El metal se obtiene a partir de su compuesto.

- a) La reducción de un óxido usando carbono o hidrógeno para los elementos (Fe, Cu, Co, Mo y W) a menudo resulta una masa porosa, que se muele por medio de técnicas similares a las que se utilizan para materiales cerámicos.
- b) La descomposición térmica de un compuesto [como el Ni (CO)₄ carbonilo] produce partículas puntiagudas.
- c) La electrólisis, es manipulada para crear un depósito desigual, con frecuencia la adherencia de los elementos es de forma dendrítica, el cual luego se descompone los elementos (Fe, Cu y Be).

⁴Groover, M. P., (2014), pág. 456-457.

- d) La precipitación del metal desde una solución acuosa es posible mediante la cementación (precipitación con un metal menos noble) o por la reducción de las soluciones con hidrógeno.

Deposición. La precipitación del metal sólido desde la fase gaseosa produce un polvo extremadamente fino ejemplo el polvo de zinc (Zn).

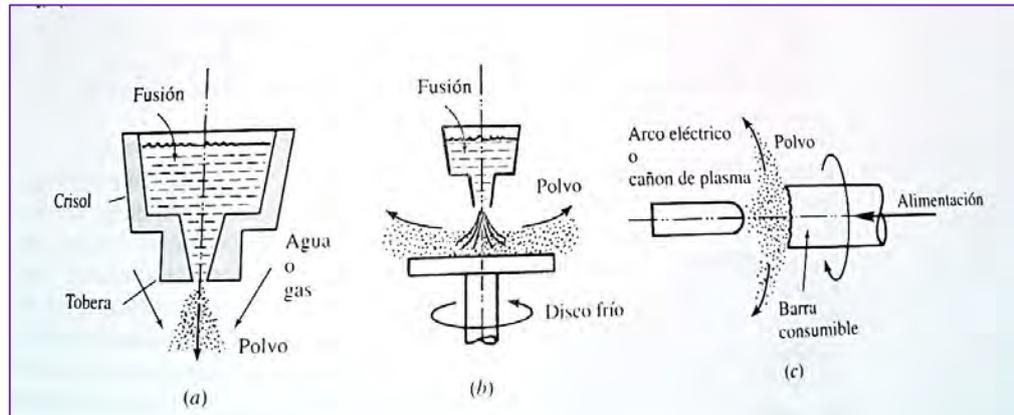
Atomización. Este es el proceso dominante para los materiales pre-aleados. Una investigación intensiva ha hecho posible el control estrecho del proceso. Con la observación directa de la formación de la partícula, ya se ha logrado un control de lazo cerrado.

- a. La atomización por agua se emplea para obtener la mayor cantidad del polvo. La fusión que emerge de una tobera se descompone con chorros de agua (Fig. 4-a), y se emplea para aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aleaciones de Cu, Ni y Sn. El tamaño y la forma de las partículas se modifican fácilmente al controlar los parámetros del proceso (el tamaño medio de la partícula es inversamente proporcional a la presión del chorro), pero el polvo siempre se corroe (oxida).
- b. La atomización con gas (Fig. 4-a), produce polvos esféricos. Cuando se permite la corrosión o cuando el óxido se puede reducir posteriormente, el aire es adecuado (Al, Cu, Sn), pero se prefiere un gas inerte para las super-aleaciones, aceros inoxidable, aceros para herramientas y aleaciones de Ti.
- c. La atomización centrifuga se basa en dirigir un chorro fundido hacia un disco enfriado con alto velocidad de rotación (Fig. 4-b). en los procesos de electrodo rotatorio, la aleación que se va atomizar está en forma de un electrodo de rotación rápida (15000 RPM), el cual se funde gradualmente mediante un arco eléctrico o un arco de plasma de helio (Fig. 4-c), el

material fundido se lanza hacia fuera inmediatamente; las partículas esféricas se solidifican sin tocar ninguna superficie y permanecen muy limpias.

Figura 4.

Producción de polvos por distintas operaciones a) atomización con gas, b) atomización centrífuga, c) atomización por arco de plasma.



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 457.

Producción mecánica de polvos metalúrgicos. Algunos polvos metálicos (notablemente el berilio) se produce maquinando una palanquilla fundida de grano grueso y triturando las virutas por medio de la molienda con bolas. Algunos polvos de aleaciones dúctiles de titanio también se producen a partir de fundiciones; se introduce gas hidrogeno para formar hidruros frágiles, los cuales se pueden moler para hacer polvo; luego se restaura la ductilidad expulsando el hidrogeno.⁵

2.3.3. Caracterización del polvo

Las propiedades que afectan la consolidación de polvos y las propiedades del producto final se determinan rutinariamente.

⁵ Schey J. A. et al. (2002). (pág. 456-457).

Morfología. La forma, tamaño y distribución de tamaño de las partículas son variables importantes.

- a. La forma de la partícula es un factor importante para determinar las características de procesamiento y está sujeta a la norma ISO 3252. Se puede utilizar métodos formales para análisis morfológico; en un sentido menos cuantitativo, es común hablar de partículas esferoides, nodulares (ligeramente alargadas y redondeadas), irregulares, angulares, laminares (como placas), aciculares (como agujas) y dendríticas. Las partículas laminares delgadas se aglomeran en polvos escamosos; las agujas largas y delgadas, en polvos fibrosos; y los polvos esféricos e irregulares, en polvos granulares. Algunos polvos son porosos, mientras que otros son esferas huecas más o menos completas o con otras formas.
- b. El tamaño de la partícula no debe ser demasiado grande ni demasiado pequeño. Las partículas muy grandes quizás no presenten la estructura deseada, lo cual es a menudo la razón para elegir el camino del polvo, y quizá no permitan el desarrollo de altas densidades. Las partículas muy pequeñas pueden ser difíciles para manejar y tienden a aglomerarse; además, su gran razón área superficial-volumen puede introducir grandes cantidades indeseables de sustancias y óxidos adsorbidos.
- c. La distribución del tamaño de la partícula se analiza pasando el polvo a través de una serie de tamices, mallas de fineza progresivamente mayor (incrementando el número de agujeros por área unitaria). La fracción de partículas que pasan por un tamiz particular se da en porcentajes (normalmente, en peso). El tamaño del tamiz se proporciona como el número de mallas (para números de malla 50 y mayores, el diámetro en

milímetros de la partícula se obtiene de dividir 15 entre el número de malla). El análisis por tamiz normalmente se realiza en seco, pero el tamizado al vacío o húmedo es necesario para polvos que pasan por la malla 325 (45 μm). Las técnicas que se basan en la difracción de láser, la intensidad de la fluctuación de la luz, los pulsos eléctricos o la sedimentación, son adecuadas para analizar distribuciones amplias del tamaño. La microscopía óptica y electrónica de barrido se puede emplear para el análisis del tamaño y de la forma.

Propiedades físicas. El polvo posee una variedad de propiedades que son de importancia para el procesamiento posterior.

- a. El área superficial específica (área/masa unitaria, en unidades de m^2/g , o para metales, comúnmente cm^2/g) se determina por la adsorción física de gas o la adsorción química de un tinte. Indica la superficie disponible para el aglutinamiento y también el área sobre la cual pueden estar presentes películas o contaminantes adsorbidos.
- b. La densidad real (también llamada densidad teórica) es la masa por volumen unitario del sólido, y es una propiedad del material la densidad aparente o masa por volumen unitario (g/cm^3) es un valor muy importante porque define el volumen real lleno por el polvo suelto. Con frecuencia se expresa como un porcentaje de la densidad del material sólido (como parte de la densidad real). La densidad apisonada se obtiene dando golpecitos o haciendo vibrar el receptáculo, es una medida de la compactación obtenible sin presión. Las densidades aparentes y asentada dependen la forma y distribución de así como la fricción entre las partículas.

- c. Las propiedades de flujo son dadas por la tasa de flujo (el tiempo necesario para que una cantidad medida de polvo fluya a través de un embudo estándar) y por el ángulo de reposo (el ángulo de la base de un cono de polvo que descansa sobre una placa circular).
- d. La compresibilidad es un término que describe el cambio en la densidad cruda con el aumento de la presión específica o, en una forma gráfica o tubular, a varias presiones.⁶

2.3.4. Preparación del polvo

La mayoría de los polvos se somete a diversos pasos preparatorios.

Clasificación. Este es el proceso de separación en facciones de acuerdo con el tamaño de la partícula. Algunas veces se requiere la molienda para romper los aglomerados, aplanar (exfoliar) las partículas o modificar sus propiedades mediante el endurecimiento por deformación. Las partículas excesivamente grandes se retiran y si se requiere las fracciones de cada tamaño se separan tamizando todo el lote de producción. Las partículas finas se pueden separar tamizando una suspensión acuosa. La sedimentación de una solución líquida o la clasificación de polvos secos en una corriente de aire dentro de un ciclón también son útiles para separar polvos finos. Es factible remover las partículas superfinas a través de la separación electrostática.

Acondicionamiento del polvo. Algunos metales, como el hierro, tienen óxidos que se reducen fácilmente mediante una atmósfera adecuada durante el sinterizado. Otros como el titanio, disuelven su propio óxido, por lo que son razonablemente adecuados para el procesamiento de polvos. Los

⁶ Schey J. A. et al. (2002). pág. 459-460.

óxidos de aluminio contribuyen al reforzamiento por dispersión. Aun otras aleaciones se cubren con una película de óxido delgada, muy tenaz y persistente, que perjudica en gran medida las propiedades de la pieza terminada; estos materiales (típicamente los que contienen cromo, en general, las superaleaciones para temperatura elevada) deben tratarse con técnicas especiales para mantener muy bajo el contenido de oxígeno. Algunos polvos, como los de acero atomizados con agua a velocidad elevada, se recosen y se desoxidan en una sola operación, haciéndolos más compresibles y fáciles de sinterizar. Los contaminantes que se segregan en la superficie son propensos a crear problemas no solo de conformación y sinterizado, sino que también disminuyen en gran medida las propiedades de servicio del material. Cualquier resto no humedecido de una película superficial en las fronteras de grano puede actuar como iniciador de grietas.

Los polvos de metal finamente distribuidos pueden ser peligrosos y deben tratarse con especial cuidado. Algunos (como el berilio y plomo) son tóxicos, otros (como el zirconio, magnesio y aluminio) presentan peligro de explosión; muchos otros son pirofóricos (se encienden espontáneamente en el aire) por debajo de un tamaño crítico de la partícula. También es factible una reacción térmica, en la cual un óxido (como el de hierro) se reduce por otro metal más reactivo (como el aluminio), y procede a temperaturas elevadas.⁷

2.3.5. Mezclado

El polvo de un elemento o compuesto, puede no reunir todos los requisitos de propiedades de producción o de servicio, por lo que se mezcla con otros. La combinación puede servir para varios propósitos; se asegura la

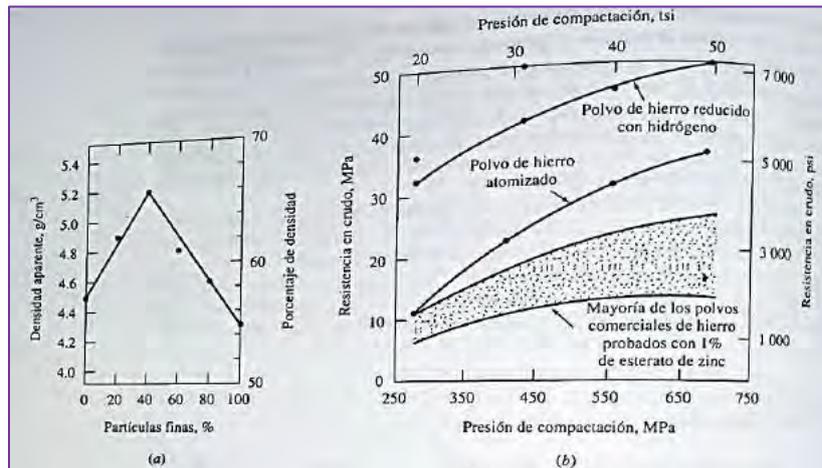
⁷ Schey J. A. et al. (2002). pág. 460-461.

uniformidad de la distribución de tamaño en un lote grande, se controla la respuesta a los esfuerzos impuestos para mejorar el manejo, se ajusta la densidad del cuerpo compactado y se cambia la composición o las propiedades de servicio. El mezclado siempre debe ser completo, con cada partícula uniformemente recubierta y con los diferentes constituyentes uniformemente dispersos, con frecuencia se emplea el molino de bolas.

1. Al mezclar partículas gruesas con una más fina (Fig. 5-a) se asegura que los intersticios entre las partículas se llenen, de esta manera densidades asentadas de más de 65% de la densidad teórica se obtiene polvo de forma favorable (esférica o nodular).
2. Las aleaciones metálicas se pueden producir al mezclar diferentes polvos elementales (para algunos aceros, bronce y aleaciones de Al y Ti). La aleación se forma en el curso del sinterizado; la fuerza de accionamiento es el gradiente de potencial químico debido a las diferencias de concentraciones.
3. En la molienda intensa de dos metales, que de otra forma no se podrían mezclar, el severo endurecimiento por deformación, la fractura y la soldadura en frío dan como resultado una aleación mecánica; la molienda de dos fases (como la de un metal y un óxido) se puede utilizar para producir materiales endurecidos por dispersión. También se producen los compuestos metal-no metal (como el carburo de tungsteno WC aglutinado por cobalto Co).
4. Los aditivos lubricantes reducen la fricción entre partículas y la pared del molde.

Figura 5.

Comportamiento del polvo al ser compactado.



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987). pág. 462.

5. Los aglutinantes (como la cera o los polímeros termoplásticos) se agregan a los polvos que de otra manera no podrían desarrollar una resistencia adecuada en crudo.
6. Los promotores de sinterizado se agregan para acelerar la densificación en el calentamiento.
7. Cuando el polvo se va a producir en una pasta, se agregan defloculantes y otros químicos para impartir características reológicas favorables.
8. El secado por aspersión asegura una distribución uniforme de los constituyentes en los polvos finos y permite el formado de polvo flujo libre a partir de finos que de otra manera no fluirían. Los ingredientes se convierten con agua o un líquido orgánico en una pasta, la cual luego se atomiza mediante aire o gas. Este es el principal método para preparar aleaciones reforzadas por dispersión del óxido y carburos cementados⁸.

⁸ Schey J. A. et al. (2002). pág. 461-462.

2.4. Consolidación del polvo

El método elegido para la consolidación, es decir para convertir el material particulado en la forma deseada, depende del material y de la densidad deseada para el producto.

2.4.1. Prensado

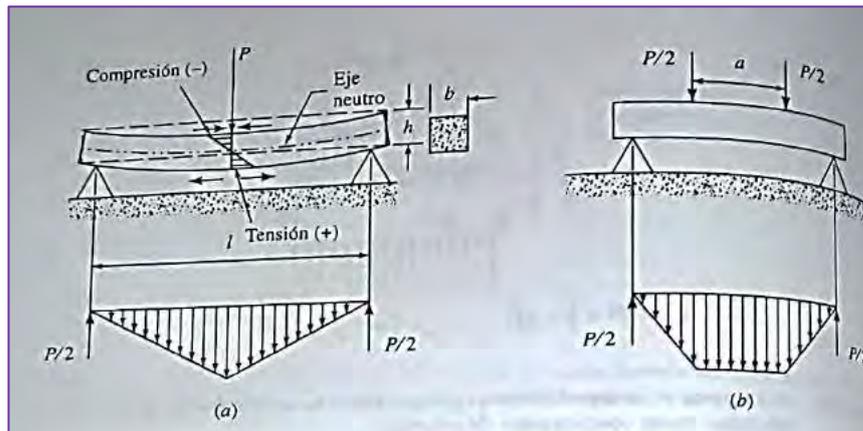
El término prensado o conformado en prensa sirve para describir todas las operaciones de conformado de láminas de metal, realizadas en prensas de alta potencia con el uso de matrices permanentes (de acero).

2.4.2. Prensado en frío

Los polvos secos, los cuales se pueden recubrir con un lubricante o aglutinante seco, se compactan mediante la aplicación de presión para formar el denominado cuerpo verde (sin adhesión permanente). Para una distribución dada del tamaño de partícula, la densidad del compacto se incrementa con la presión aplicada (Fig. 6-b). La densidad también es una función de la forma de la partícula: un polvo esférico se compacta con una densidad mayor que un polvo de forma irregular. En el curso del prensado, se expulsa el aire que hay entre las partículas, y estas se deslizan una contra otra y contra la superficie de la herramienta de compactación. A presiones mayores, la fuerza aplicada se concentra en puntos de contacto entre las partículas; las presiones elevadas locales causan deformación local o fractura, y el compacto adquiere una resistencia en crudo, normalmente expresada como resistencia a la ruptura, medida en probetas de flexión transversal (Fig. 6).

Hay varias fuentes para la resistencia en crudo. El deslizamiento combinado con presión promueve la adhesión (e incluso la soldadura en frío con algunos polvos); por lo tanto, la resistencia se eleva al aumentar la presión

Figura 6.
Ensayo de flexión



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 92.

(Fig. 6-b). Otra fuente de la resistencia en crudo es el entrelazado mecánico, especialmente con partículas de forma irregular, por lo que la resistencia en crudo es menor para los polvos esféricos, aunque se empaican más densamente.

Si ninguno de estos mecanismos está disponible, se agregan agentes aglutinantes que se evaporan en el curso del sinterizado. Por supuesto, la resistencia en crudo es menor cuando el polvo está recubierto con un lubricante. Varias técnicas de compactación se encuentran disponibles.⁹

2.4.2.1 Prensado en matriz

Tiene su aplicación más amplia en piezas de forma neta (o de forma casi neta). Si la pieza es relativamente sencilla y una matriz se puede fabricar de acero, las elevadas presiones aplicadas son permisibles y si las partículas se pueden deformar plásticamente, es factible lograr densidades hasta un 90% de la densidad teórica.

⁹ Schey J. A. et al. (2002). pág. 463.

1. La efectividad del prensado con un punzón de una sola acción es limitada, porque el material en partículas no transmite las presiones como lo haría un sólido continuo; también la fricción de la pared se opone a la compactación. La presión disminuye rápidamente y la densidad decrece al alejarse del punzón (Fig. 7-a), limitando la razón profundidad/diámetro que se obtiene. Para una presión aplicada de (p_l), la presión a una profundidad (l) en el cuerpo es:

$$p_l = p_a e^{\left(\frac{-\mu k A_{fr}}{A_0}\right)} \quad \text{ecuación (2-1)}$$

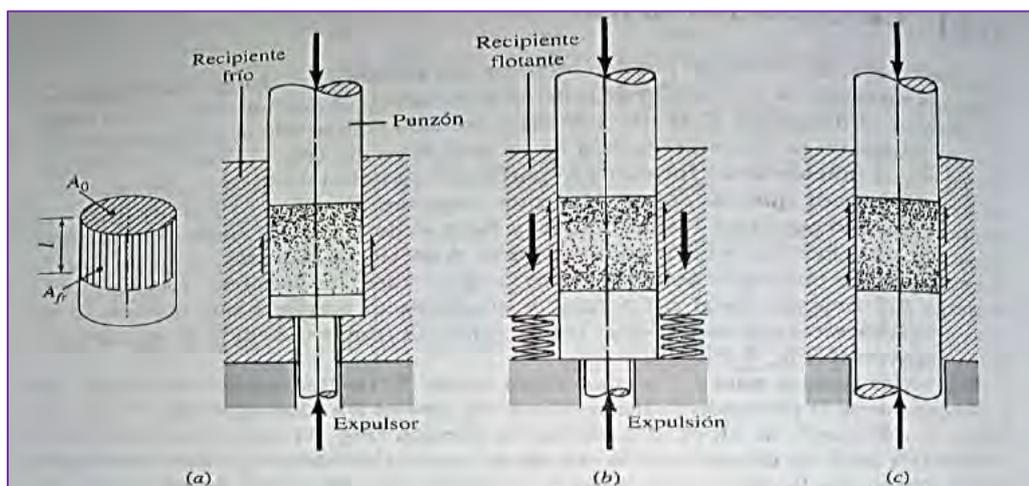
Donde; (μ) es la fricción en la pared, (A_{fr}) es el área superficial donde ocurre la fricción, (A_0) es el área compactada, y (k) es el factor que expresa la razón del esfuerzo radial al axial y es, para ecuación (2-1) un sólido elástico:

$$k = \frac{p_r}{p_a} = \frac{\nu}{1-\nu} \quad \text{ecuación (2-2)}$$

Donde; (ν) es el módulo de Poisson.

Figura 7.

Densidad de un cuerpo crudo.



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 464.

2. La situación se mejora con una cámara flotante (Fig. 7-b), que se mueve contra el punzón estacionario mediante la fuerza de fricción entre el polvo y el recipiente.
3. Se obtienen buenos resultados en prensas especiales con dos punzones contractuantes que avanzan entre dos extremos de la cavidad de la matriz (Fig. 7-c).
4. Cuando el espesor de la parte cambia considerablemente de un punto a otro, la densidad en crudo se ecualiza construyendo matrices con punzones múltiples guiados uno dentro del otro (Fig. 8), de manera que se pueda aplicar el mismo grado de compactación en todas partes. Los claros entre las partes móviles deben ser muy pequeños (menores a 25 μm) para evitar la entrada de partículas¹⁰.

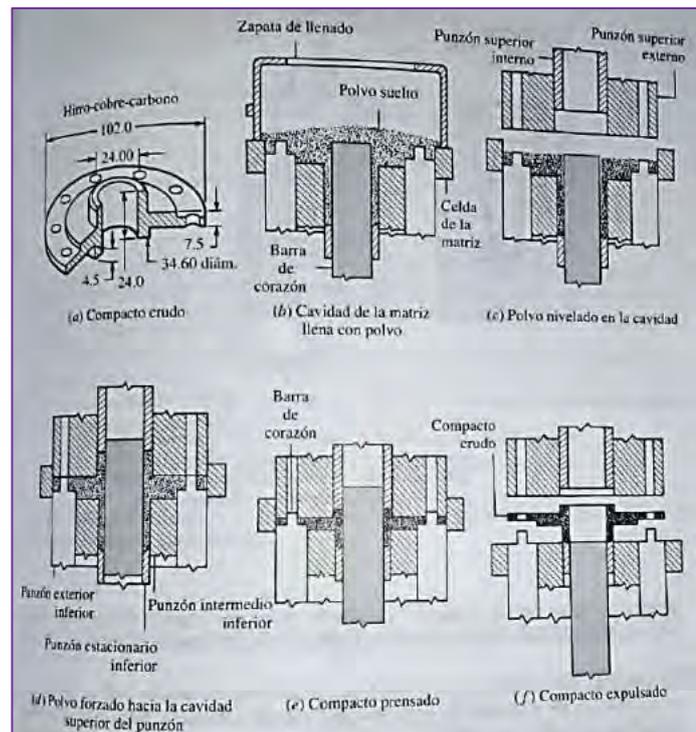
2.4.2.2 Prensado isostático en frío

El polvo se introduce por vibración en un molde deformable (caucho reutilizable). Se aplica presión hidrostática (omnidireccional) por medio de un fluido hidráulico dentro de un recipiente bajo presión (Fig. 9), asegurando una densidad uniforme. Normalmente el fluido es agua. Las limitaciones de la forma son pocas en el método de la bolsa húmeda (Fig. 9-a). Se logran tiempos más cortos del ciclo con el método de la bolsa (Fig. 9-b), porque el fluido se introduce solo en el espacio entre la matriz fija y el modelo elastomérico, pero las formas son un poco más limitadas. En muchos casos, no se necesitan ni lubricantes ni aglutinantes. Las presiones de 300 Mpa son normales y se pueden obtener presiones de hasta 550 Mpa.¹¹

¹⁰ Schey J. A. et al. (2002). (pág. 463-464).

¹¹ Schey J. A. et al. (2002). (pág. 463-464).

Figura 8.
Densidad uniforme de llenado



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 465

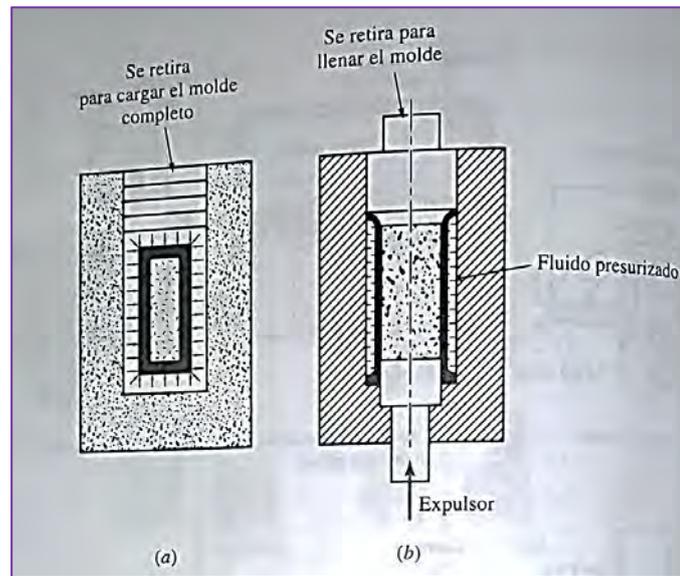
2.4.3. Prensado en caliente

Todas las secuencias del procesamiento de partículas descritas hasta este punto implican la consolidación seguida del sinterizado; a menudo se obtienen ventajas combinando ambas operaciones en una operación simultánea. Se aplica presión suficiente, a la temperatura de sinterizado, para juntar las partículas y de esta manera acelerar el sinterizado. Si es posible, los granos individuales se deforman para asegurar mayor conformidad; más importante es que los granos se mueven entre sí para romper las películas superficiales que aminorarían o evitarían la difusión. Bajo tales condiciones, la porosidad puede eliminarse por completo. Como un cuerpo de partículas no tiene ninguna resistencia previa al prensado, todas las presiones aplicadas

deben ser de compresión, y preferiblemente en todas direcciones, de manera que se evite la generación de esfuerzos secundarios de tensión.

Figura 9.

Presión omnidireccional



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 466.

El **prensado en caliente**. Puede hacerse en matrices de grafito o cerámico calientes, pero es difícil transmitir la presión uniformemente a todas partes del compacto (Fig. 9). En el sinterizado por chispas, una corriente alterna elevada genera descargas eléctricas durante la primera fase de consolidación, activando así la superficie de las partículas.¹²

2.4.4. Energía almacenada del trabajo en frío

Cuando se deforma plásticamente un metal a temperaturas que son bajas en relación con el punto de fusión, se dice que el metal es trabajado en frío. No se puede expresar con exactitud la temperatura que define el límite superior de la zona de trabajo en frío, puesto que varía tanto con la composición como con la cantidad de deformación. Una regla empírica aproximada es

¹² Schey J. A. et al. (2002). pág. 466.

suponer que la deformación plástica corresponde al trabajo en frío si este se efectúa a temperaturas menores de la mitad del punto de fusión medio sobre una escala absoluta.

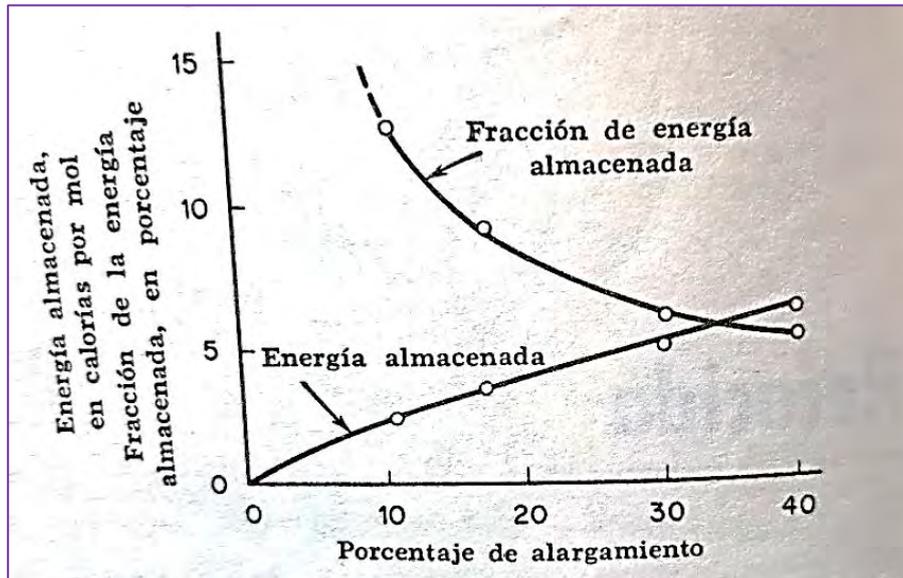
La energía gastada en el trabajo en frío aparece, en su mayor parte, en forma de calor, pero una fracción limitada se almacena en el metal como energía de deformación asociada con diversos defectos reticulares creados por la deformación. La cantidad de energía retenida depende del proceso de deformación y de un determinado número de otras variables, por ejemplo, composición del metal y temperatura de deformación. Ciertos investigadores han indicado que la fracción de energía que permanece en el metal varía desde un pequeño porcentaje hasta algo como el 10%. La Fig. 10, muestra la relación entre la energía almacenada y la cantidad de deformación en un metal específico (cobre policristalino, 99.999% de pureza) para un tipo de deformación específica (deformación en tensión). Los datos muestran que la energía almacenada se incrementa con el aumento de la deformación, pero en una proporción decreciente, de manera que la fracción de energía total almacenada en el metal disminuye con el aumento en la deformación. El último efecto se muestra por una segunda curva en la Fig. 10.

El valor máximo de la energía almacenada del trabajo en frío (figura 10), es solo de 6 cal por mol, lo cual representa la energía de deformación dejada en un metal muy puro después de una deformación moderada (30% de alargamiento) a temperatura ambiente. La cantidad de energía almacenada puede ser aumentada grandemente por el aumento en la severidad de la

deformación, por el descenso de la temperatura de deformación, y por el cambio del metal puro en una aleación¹³.

Figura 10.

Energía almacenada del trabajo en frío.



Nota: Adaptado de Reed-Hill, R. (1980), pág. 246.

2.5. Difusión en soluciones sólidas

Cuando ocurren mezclas homogéneas de dos o más clases en el estado sólido, se las conoce como soluciones sólidas. Estas soluciones cristalinas son bastante comunes y equivalentes a las formas líquida y gaseosa, pues las proporciones de los componentes se pueden variar dentro de límites fijados, y las mezclas no se separan naturalmente. Además, el término solvente se refiere a la forma atómica más abundante, y soluto a la menos abundante.

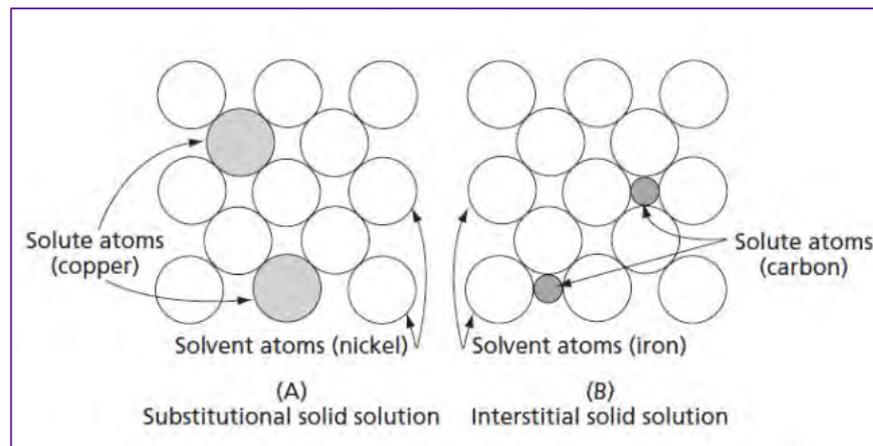
Las soluciones sólidas ocurren en cualquiera de los dos tipos distintos. El primero se conoce como solución sólida sustitucional; en este caso, ocurre una sustitución directa de un tipo de átomo por otro, de manera que los átomos de soluto

¹³ Reed Hill, R. E., (1980). pág. 245.

penetran en el cristal para tomar posiciones ocupadas de ordinario por átomos solventes. La Fig. 11-a presenta esquemáticamente una muestra conteniendo dos clases de átomos (Cu y Ni). El otro tipo de solución sólida se muestra en la Fig. 11-b. Aquí el átomo de soluto (carbono) no desplaza a un átomo solvente, sino que penetra, más bien, en uno de los intersticios, entre los átomos solventes (hierro).¹⁴

Figura 11.

Las dos formas básicas de soluciones sólidas, a) solución sólida sustitucional, b) solución sólida intersticial.



Nota: Adaptado de Reed-Hill, R. (1980), pág. 295

2.5.1. Frecuencia de Debye

La energía de punto cero de un cristal es su energía térmica cuando vibran los átomos en sus estados de energía más bajos. Cuando las energías cohesivas teórica y experimental se comparan a una supuesta temperatura de 0°K, esta energía, que ha sido descuidada previamente, debe ser incluida junto con otros términos. En un sólido cristalino hay tres grados vibracionales de libertad por átomo. A cada uno de estos grados se le puede asignar un grado de vibración de tal manera que haya tres modos por átomo. Se considera que un cristal de N átomos es equivalente a 3N oscilaciones de varias frecuencias.¹⁵

¹⁴ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 295.

¹⁵ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 76.

Concluyendo que la frecuencia vibracional (v_m), máxima es de 10^{13}vib/seg .

2.5.2. Difusión

Difusión se refiere al flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos, electrones, orificios y moléculas. La magnitud de este flujo depende del gradiente de concentración y de la temperatura. El proceso de difusión es de gran importancia para una gran variedad de importantes tecnologías actuales. Las tecnologías del procesamiento de materiales conceden gran importancia al control sobre la difusión de los átomos, iones, moléculas y otras especies. Existen cientos de aplicaciones y tecnologías que dependen del incremento o limitación de la difusión.¹⁶

2.5.3. Estabilidad de átomos e iones

Todos los materiales tienen imperfecciones y también pueden introducirse de manera deliberada en ellos; sin embargo, estas imperfecciones, e incluso los átomos o iones ubicados en sus posiciones normales en las estructuras cristalinas, no son estables o están en reposo. Por el contrario, los átomos o iones poseen energía térmica y se mueven. Por ejemplo, un átomo puede moverse de una localización normal en la estructura cristalina para ocupar una vacancia cercana. También puede trasladarse de un sitio intersticial a otro. Los átomos o iones pueden saltar a través de un límite de grano y provocar que dicho límite se mueva. La capacidad de los átomos e iones para difundirse aumenta a medida que la temperatura, o energía térmica que poseen, se incrementa. La velocidad del movimiento de los átomos o iones se relaciona con la temperatura o energía térmica por medio de la ecuación de Arrhenius:

¹⁶ Askeland, D., (2017). Pág. 142.

$$\text{Velocidad} = c_0 \exp(-Q/RT) \quad \text{ecuación (2-3)}$$

donde c_0 es una constante, R la constante de los gases (1.987 cal /mol.K u 8.314 J/mol.K), T la temperatura absoluta (K) y Q la energía de activación (cal/mol o J/mol) que se requiere para provocar que se mueva un mol de átomos o iones. Esta ecuación se deduce a partir de un análisis estadístico de la probabilidad de que los átomos tendrán la energía adicional Q necesaria para provocar el movimiento. La velocidad está relacionada con el número de átomos que se mueven. Se puede reescribir esta ecuación aplicando los logaritmos naturales de ambos lados.¹⁷

$$\ln(\text{velocidad}) = \ln(c_0) - Q/RT \quad \text{ecuación (2-4)}$$

2.5.4. Mecanismos de difusión

En los materiales existen defectos conocidos como vacancias. El desorden que crean las vacancias (es decir, el aumento de entropía) ayuda a minimizar la energía libre y, por lo tanto, incrementa la estabilidad termodinámica de un material cristalino. En los materiales que contienen vacancias, los átomos se mueven o “saltan” de una posición de red a otra. Este proceso, conocido como **autodifusión**, puede detectarse utilizando trazadores radiactivos.

Interdifusión: La difusión de átomos distintos también se lleva a cabo en los materiales (figura 12). Considere una hoja de níquel unida a una hoja de cobre. A altas temperaturas, los átomos de níquel se difunden de manera gradual en el cobre mientras que los de cobre migran al níquel. De nuevo, los átomos de níquel y de cobre se distribuirán de manera uniforme con el transcurso del tiempo. A la difusión de átomos distintos en direcciones diferentes se le conoce como Interdifusión. Existen dos

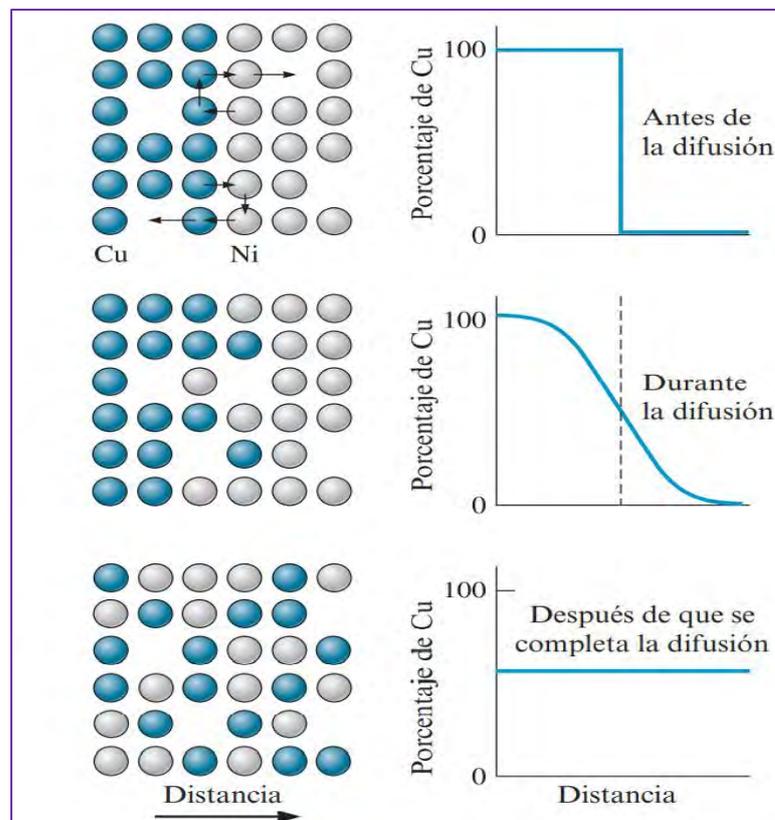
¹⁷ Askeland, D., (2017). Pág. 142.

mecanismos importantes por medio los cuales los átomos o iones pueden difundirse (figura 13): difusión por vacancia y difusión intersticial.¹⁸

Difusión por vacancia: Cuando se produce la autodifusión y la difusión que involucran átomos sustitucionales, un átomo deja su sitio de red para llenar una vacancia cercana (por lo tanto, crea una nueva vacancia en el sitio de red original). A medida que continúa la difusión, se tienen contraflujos de átomos y vacancias, a lo que se le llama difusión por vacancia. El número de vacancias, que aumenta a medida que se incrementa la temperatura, influye en la magnitud de la autodifusión y difusión de los átomos sustitucionales.

Figura 12.

Difusión de átomos de cobre en níquel con el tiempo, los átomos de cobre se distribuyen de manera aleatoria a lo largo del níquel.



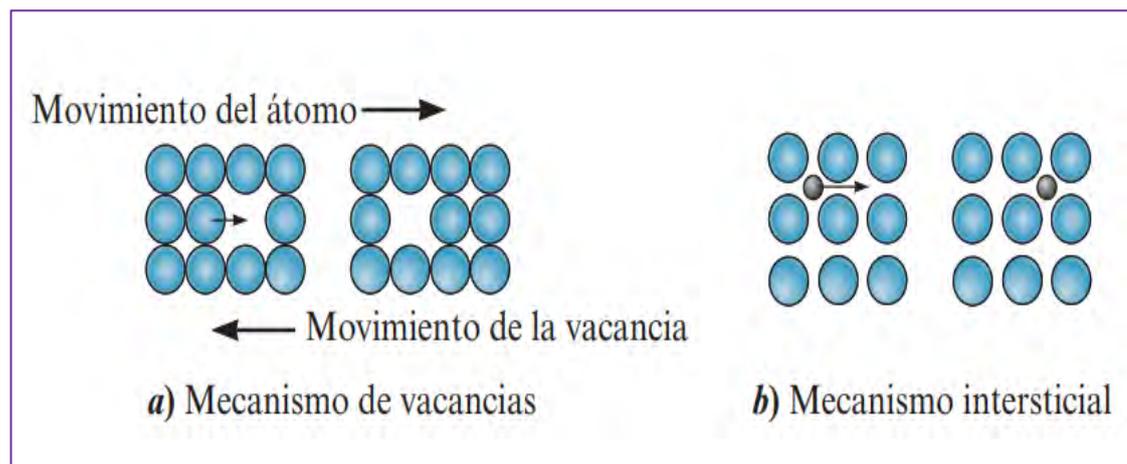
Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 147.

¹⁸ Askeland, D., (2017). Pág. 147.

Difusión intersticial: Cuando en la estructura cristalina se encuentra un átomo o ion intersticial pequeño, el átomo o ion se mueve de un sitio intersticial a otro. No se requieren vacancias para que se concrete este mecanismo. En parte debido a que hay muchos más sitios intersticiales que vacancias, la difusión intersticial se lleva a cabo con mucha mayor facilidad que la difusión por vacancia. Los átomos intersticiales, relativamente más pequeños, se difunden más rápido.¹⁹

Figura 13.

Mecanismos de difusión en los materiales: a) difusión por vacancia o átomos sustitucionales y b) difusión intersticial.



Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 148.

2.5.5. Energía de activación de la difusión

Mientras se difunden, los átomos deben abrirse camino a través de los átomos que los rodean para alcanzar su nuevo sitio. Para que esto suceda, debe aplicarse energía con el fin de permitir que el átomo se mueva a su nueva posición, como se muestra de manera esquemática en la difusión por vacancia e intersticial de la figura 14. Al principio, el átomo está en un lugar de baja energía relativamente estable. Para moverse a una nueva localización, debe superar una barrera de energía, que es la energía de activación Q . La energía térmica suministra a los átomos e iones la energía

¹⁹ Askeland, D., (2017). Pág. 147,148.

necesaria para superar esta barrera. Observe que, con frecuencia, se utiliza el símbolo Q para denotar las energías de activación de distintos procesos (velocidad a la que saltan los átomos, una reacción química, la energía necesaria para producir vacancias, etc.), y se debe tener cuidado de comprender el proceso o fenómeno específico al que se está aplicando el término general de energía de activación Q , ya que el valor de ésta depende del fenómeno específico. Por lo general, se requiere menos energía para forzar un átomo intersticial a través de los átomos circundantes; en consecuencia, las energías de activación que se requieren para la difusión intersticial son menores que para la difusión por vacancia.²⁰

2.5.6. Velocidad de difusión (primera ley de Fick)

La velocidad a la que los átomos, iones, partículas u otras especies se difunden en un material puede medirse por medio del flujo J . Aquí se trata principalmente con la difusión de iones o átomos. El flujo J se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo (figura 15). La primera ley de Fick explica el flujo neto de los átomos:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{ecuación (2-5)}$$

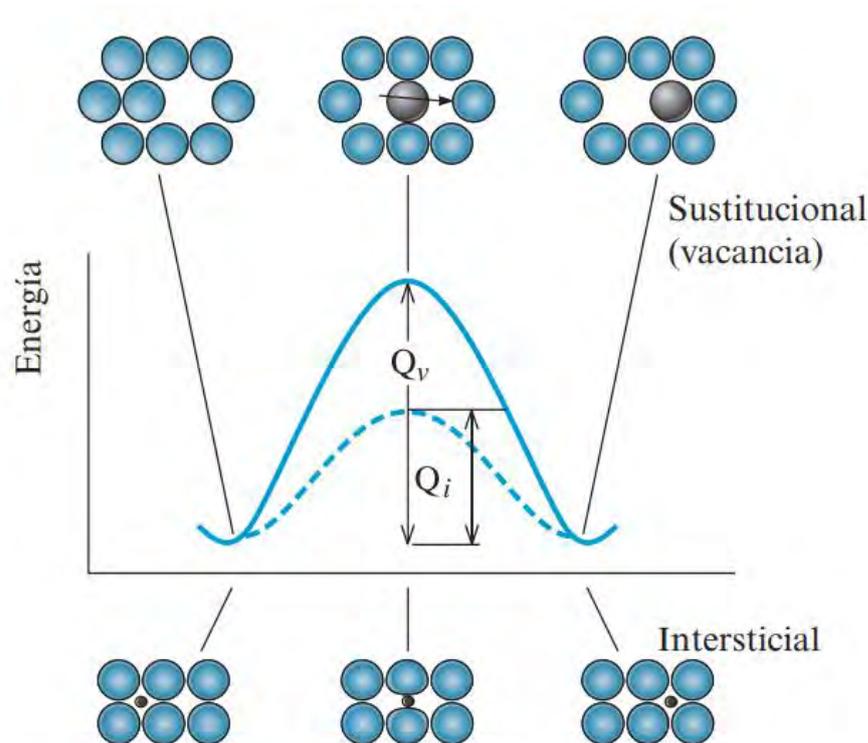
donde J es el flujo, D la difusividad o coeficiente de difusión (m^2/s) y dc/dx el gradiente de concentración ($\text{átomos}/\text{m}^3 \cdot \text{m}$). Con base en la situación, la concentración puede expresarse como porcentaje atómico (%at), porcentaje en peso (%pe), porcentaje molar (%mol), fracción atómica o fracción molar. Las unidades del gradiente de concentración y el flujo también cambiarán de manera acorde. Varios factores afectan el flujo de átomos durante la difusión. Si se trata con difusión de iones, electrones, orificios, etc., las unidades de J , D y dc/dx reflejarán las especies apropiadas que se consideran. El signo negativo en la ecuación 2-5, indica que el flujo

²⁰ Askeland, D., (2017). Pág. 148.

de la especie que se está difundiendo es de concentraciones mayores a menores, por lo que si el término dc/dx es negativo, J será positivo.

Figura 14.

Se requiere de una energía de activación Q para forzar átomos entre sí durante la difusión. Por lo general, se requiere más energía en el caso de un átomo sustitucional que en el de un átomo intersticial.



Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 148.

La energía térmica asociada con los átomos, iones, etc., provoca el movimiento aleatorio de los átomos. A escala microscópica, la fuerza termodinámica impulsora de la difusión es el gradiente de concentración. Se crea un flujo neto o uno observable según la temperatura y el gradiente de concentración²¹.

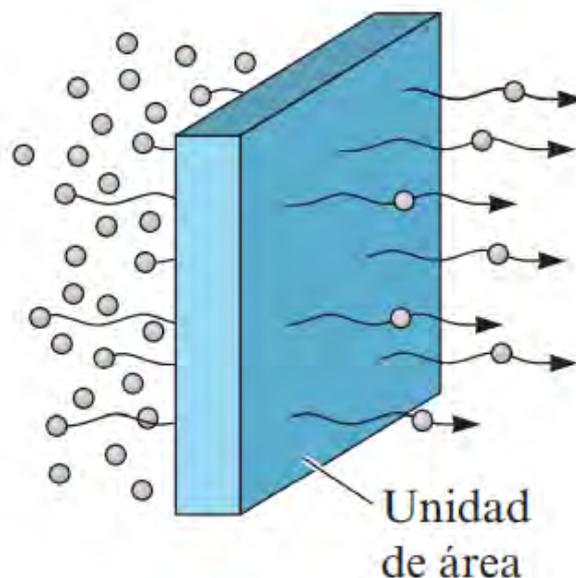
Gradiente de concentración: El gradiente de concentración muestra cómo varía la composición del material con la distancia: Δc es la diferencia entre la concentración

²¹ Askeland, D., (2017). Pág. 150.

sobre la distancia Δx (figura 16). Puede crearse un gradiente de concentración cuando dos materiales de distinta composición se ponen en contacto, cuando un gas o un líquido entran en contacto con un material sólido, cuando se producen estructuras sin equilibrio en un material debido al procesamiento y a partir de un anfitrión u otras fuentes. El flujo a una temperatura específica es constante sólo si el gradiente de concentración también lo es, es decir, mientras las composiciones en cada lado del plano de la figura 15, permanezcan sin cambios.

Figura 15.

El flujo durante la difusión se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo.

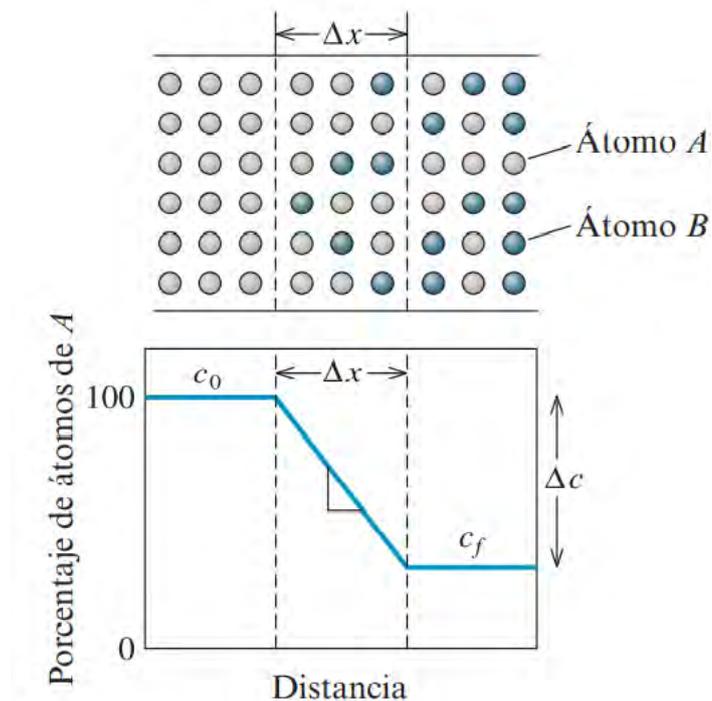


Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 150.

Sin embargo, en muchos casos prácticos estas composiciones varían a medida que los átomos se redistribuyen y por lo tanto el flujo también cambia. Con frecuencia, se encuentra que el flujo es inicialmente alto y que disminuye de manera gradual a medida que el gradiente de concentración es reducido por la difusión.

Figura 16.

Ilustración del gradiente de concentración.



Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 150.

2.5.7. Factores que afectan la difusión

Temperatura y coeficiente de difusión: En gran medida, la cinética de la difusión depende de la temperatura. El coeficiente de difusión D se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de tipo Arrhenius,

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad \text{ecuación (2-6)}$$

donde Q es la energía de activación (en unidades de cal/mol o J/mol) de la difusión de la especie bajo consideración (por ejemplo, Al en Si), R la constante de los gases (1.987 cal/mol.K o 8.314 J/mol.K) y T la temperatura absoluta (K). D_0 es el término preexponencial, similar a c_0 en la ecuación 2-4. D_0 es una constante de un sistema de difusión dado y es igual al valor del coeficiente de difusión a $1/T = 0$ o $T = \infty$.

Tipos de difusión: cuando se produce **difusión por volumen**, los átomos se mueven a través del cristal de un sitio regular o intersticial a otro. Debido a los átomos

circundantes, la energía de activación es grande mientras que la velocidad de la difusión es relativamente lenta. Los átomos también pueden difundirse a lo largo de los límites, interfaces y superficies del material. Los átomos se difunden con facilidad por **difusión por límite de grano** en razón de que el empaquetamiento atómico es desordenado y menos denso en los límites de grano. Debido a que los átomos pueden forzarse más fácilmente a través del límite de grano, la energía de activación es baja. La **difusión por superficie** es aún más fácil, dado que los átomos que se difunden en la superficie padecen una restricción aún menor.

Tiempo: La difusión requiere tiempo. Las unidades del flujo son átomos/cm²·s. Si debe difundirse un gran número de átomos para producir una estructura uniforme, se requieren tiempos largos, aun a altas temperaturas. Los tiempos necesarios para los tratamientos térmicos pueden reducirse si se emplean temperaturas mayores o se minimizan las distancias para la difusión (relacionadas con Δx).

Dependencia del enlace y de la estructura cristalina Varios factores influyen en la energía para activar la difusión y, por lo tanto, en la velocidad de ésta. La difusión intersticial, con una energía de activación baja, por lo general se lleva a cabo mucho más rápido que la de por vacancia, o difusión sustitucional. Por su parte, normalmente las energías de activación son menores en el caso de los átomos que se difunden a través de estructuras cristalinas abiertas que las que lo hacen a través de estructuras cristalinas compactas. Debido a que la energía de activación depende de la fuerza del enlace atómico, es mayor en el caso de la difusión de átomos en materiales con una alta temperatura de fusión.²² (figura 17).

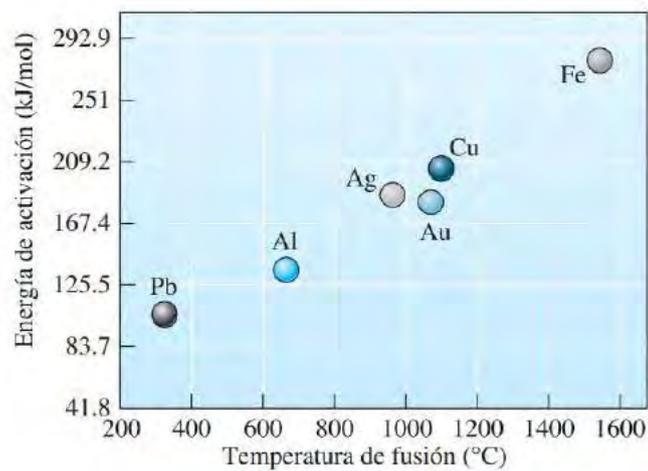
²² Askeland, D., (2017). Pág. 159.

2.5.8. Perfil de composición (segunda ley de Fick)

La **segunda ley de Fick**, que describe la difusión dinámica de átomos, o de estado no estacionario, se representa mediante la ecuación diferencial

Figura 17.

La energía de activación de la autodifusión aumenta a medida que se incrementa el punto de fusión del metal.



Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 159.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad \text{ecuación (2-7)}$$

si se supone que el coeficiente de difusión D no es una función de la localización x ni de la concentración (c) de la especie que se está difundiendo, se puede escribir una versión simplificada de esta ley de Fick como

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad \text{ecuación (2-8)}$$

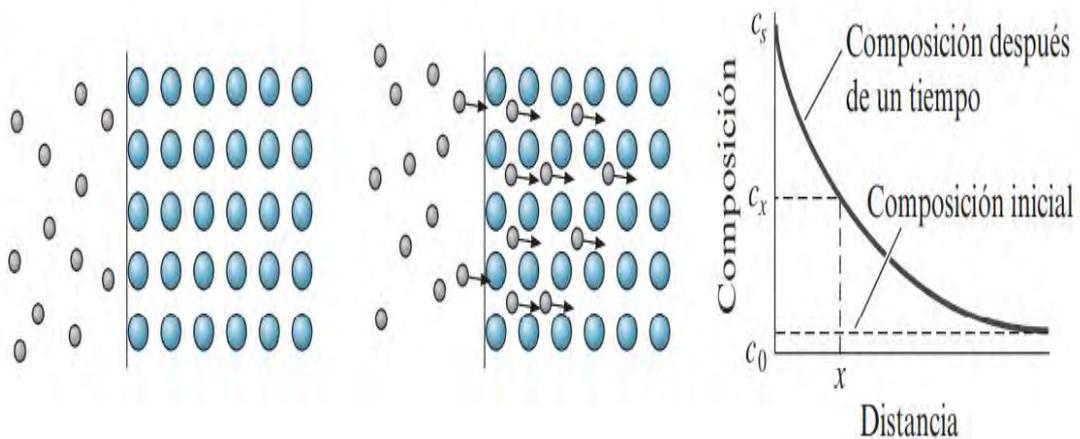
La solución de esta ecuación depende de las condiciones limitantes de una situación en particular. Una solución es

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf} \left(x / 2\sqrt{Dt} \right) \quad \text{ecuación (2-9)}$$

donde c_s es una concentración constante de los átomos que se están difundiendo en la superficie del material, c_0 la concentración uniforme inicial de los átomos que se están difundiendo en el material y c_x la concentración del átomo que se está difundiendo en la localización x debajo de la superficie después de un tiempo t . En la figura 18 se ilustran estas concentraciones. Básicamente, en estas ecuaciones se ha supuesto un modelo unidimensional (es decir, se supone que los átomos u otras especies que se están difundiendo sólo se mueven en la dirección x). La función “erf” es la función de error y puede evaluarse a partir de la figura 19.

Figura 2.18.

Difusión de átomos en la superficie de un material que ilustra el uso de la segunda ley de Fick.



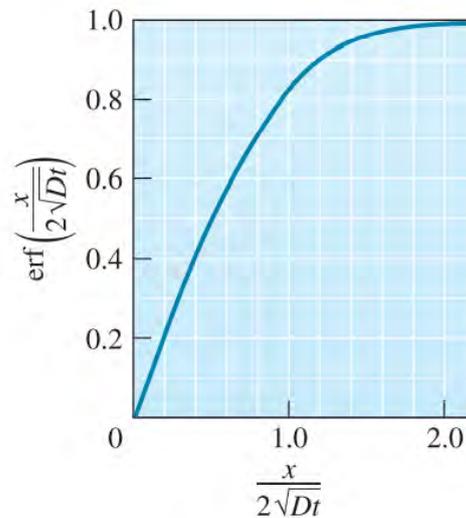
Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 160.

La definición matemática de la función de error es la siguiente:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \quad \text{ecuación (2-10)}$$

Figura 19.

Gráfica que muestra el argumento y el valor de la función de error que se encuentran en la segunda ley de Fick.



Nota: Adaptado de Askeland, D. (2017), pág. 161.

2.5.9. Autodifusión en metales puros

En estudios de autodifusión, se investiga la difusión de un soluto consistente en un isotopo radiactivo en un solvente que es un isotopo no radiactivo del mismo metal. En tal sistema, ambas formas atómicas son idénticas excepto por la pequeña diferencia en masa entre los isotopos. El efecto principal de esta diferencia de masa es causar que el isotopo de soluto vibre sobre su punto de apoyo en la red con una frecuencia ligeramente distinta que la del isotopo del solvente, dando a los dos isotopos una frecuencia de salto ligeramente diferente. Esta diferencia se calcula con facilidad debido a que la frecuencia vibratoria es proporcional al recíproco de la raíz cuadrada de la masa, y como la frecuencia del salto en los lugares vacantes es proporcional a la frecuencia vibratoria, tenemos que:

$$\frac{1}{\tau^*} = \sqrt{\frac{m}{m^*}} \left(\frac{1}{\tau}\right) \quad \text{ecuación (2-11)}$$

Donde $1/\tau$ y $1/\tau^*$ son las frecuencias de salto de los isotopos normales y radiactivos, respectivamente (τ y τ^* son el tiempo medio de estancia de los átomos respectivos en las posiciones reticulares, m y m^* son las masas de los dos isotopos m^* radiactivo).

Debido a que la autodifusión en los metales puros ocurre en una solución perfecta y con una difusibilidad dependiente de la concentración, los coeficientes de autodifusión de los metales puros son usualmente de gran precisión. Además, debido a que el proceso de difusión ocurre en un sistema relativamente simple, las difusibilidades medidas son capaces de interpretación teórica. Las suposiciones hechas en nuestra derivación de la primera ley de Fick son las que se observan realmente en los experimentos de autodifusión, y la siguiente relación es para autodifusión en metales puro de cubico centrado en las caras.

$$D_{F.C.C.} = \frac{a^2}{12\tau} \quad \text{ecuación (2-12)}$$

Donde D es la difusibilidad, a es la constante de la red y τ el tiempo medio de permanencia de un átomo en una posición reticular.

La proporción a la cual salta un átomo, o se mueve de un lugar a otro en un cristal está dado por la siguiente ecuación de vacancias;

$$r = Z\nu e^{-Q_m/RT} e^{-Q_f/RT} \quad \text{ecuación (2-13)}$$

Donde r numero de saltos por un segundo, hechos por un átomo, Z es el número de coordinación reticular, ν la frecuencia vibratoria reticular, Q_f es el cambio en la entalpia o trabajo para formar un mol de lugares vacantes, Q_m es el cambio de entalpia o barrera de energía que se debe vencer para mover

un mol de átomos dentro de los lugares vacantes, R es la constante universal de los gases (2 cal por mol) y T la temperatura absoluta en grados kelvin.

La frecuencia de salto de los átomos dentro de los lugares vacantes r varía directamente según;

- 1) El número de átomos (Z) que se encuentran próximos a un lugar vacante.
- 2) La frecuencia (ν) o número de veces por segundo que un átomo se mueve hacia un lugar vacante.
- 3) La probabilidad de que un átomo tenga la energía suficiente para hacer un salto.
- 4) La concentración de lugares vacantes en la red.

Añadiendo a la ecuación anterior los cambios de entropía asociados con la formación de lugares vacantes. En conclusión, tenemos la ecuación;²³

$$D = a^2 \nu e^{(\Delta S_m + \Delta S_f)/R} e^{-(Q_m + Q_f)/RT} \quad \text{ecuación (2-14)}$$

2.5.10. Difusión química a baja concentración del soluto

El coeficiente de interdifusión química D supone también una forma simple cuando la concentración del soluto se vuelve muy pequeña, como se ve en la ecuación de Darken;

$$\tilde{D} = N_B D_A + N_A D_B \quad \text{ecuación (2-15)}$$

Así, a concentraciones de soluto muy bajas, el coeficiente de interdifusión química se acerca a la difusibilidad intrínseca del soluto.

Si la concentración de soluto es mucho más pequeña que el límite de solubilidad, se puede considerar que los átomos de soluto están dispersados uniforme y ampliamente a través de la red del solvente. Pueden desestimarse las consideraciones relativas a la interacción entre átomos de soluto

²³ Reed Hill, R. E., (1980). pág. 364.

individuales y se supone que cada átomo de soluto tiene un juego equivalente de contornos, todos los vecinos de cada átomo de soluto serán átomos de solvente.²⁴

2.5.11. Electrotransporte y termomigración

Se ha estado considerando solo los gradientes composicionales para la difusión. Los gradientes de temperatura y de potencial eléctrico pueden producir también fenómenos de difusión. El asunto del área asociado con el estudio de la difusión atómica bajo un campo eléctrico se conoce como **Electrotransporte**. El que tiene que ver con las distribuciones debido a los gradientes de temperatura se llama **termomigración**.²⁵

2.6. Fases

2.6.1. Definiciones básicas

Una fase se define como un cuerpo de materia macroscópicamente homogénea. Donde el sólido, líquido y gas son fases distintas para un determinado material. Estos estados pueden coexistir a determinadas condiciones de presión y temperatura como; sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas y sólido-líquido-gas.²⁶

2.6.2. Fases intermedias

En muchos sistemas de aleación, se encuentran que las estructuras cristalinas o fases son diferentes a las estructuras elementales (metales puros). Si estas estructuras se producen sobre una gama de posiciones, o son en todos los aspectos. La diferencia entre soluciones sólidas intermedias y compuesto rige que en las soluciones sólidas podrían cambiar de estructura cristalina es el

²⁴ Reed Hill, R. E., (1980). pág. 369.

²⁵ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 379.

²⁶ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 405.

caso del latón (cobre-zinc) donde el cobre tiene la red cristalina cubica centrada en las caras, mientras el zinc hexagonal compacta y el latón es cubica centrada en el cuerpo, el cual el latón es una aleación las fases intermedias no tienen posiciones fijas de los átomos. Los compuestos tienen composiciones fijas como es el caso del acero.²⁷

2.6.3. Termodinámica de las soluciones

La energía libre de una solución es una propiedad termodinámica de la misma el cual se trata de una variable que depende del estado termodinámico de una solución (del sistema). En el caso de un solo elemento, en una sola fase dada, el estado termodinámico se determina únicamente si se conoce cualquiera de sus dos propiedades termodinámicas (variables).²⁸

2.6.4. Equilibrio entre dos fases

Se considera un sistema binario, con dos fases en equilibrio. La energía libre total para la primera fase, la cual designaremos como (α), es:

$$F^\alpha = n_A^\alpha \bar{F}_A^\alpha + n_B^\alpha \bar{F}_B^\alpha \quad \text{ecuación (2-16)}$$

En tanto para la fase (β) es,

$$F^\beta = n_A^\beta \bar{F}_A^\beta + n_B^\beta \bar{F}_B^\beta \quad \text{ecuación (2-17)}$$

En el caso de una mínima transferencia se tiene,

$$dF = (\bar{F}_A^\beta - \bar{F}_A^\alpha) dn_A \quad \text{ecuación (2-18)}$$

Como el sistema se encuentra en equilibrio

$$dF = (\bar{F}_A^\beta - \bar{F}_A^\alpha) dn_A = 0 \quad \text{ecuación (2-19)}$$

Y se concluye que:²⁹

²⁷ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 295.

²⁸ Reed Hill, R. E., (1980), pág 407.

²⁹ Reed Hill, R. E., (1980), pág 410.

$$\bar{F}_A^\beta = \bar{F}_A^\alpha \quad \text{ecuación (2-20)}$$

2.6.5. Numero de fases en un sistema de aleación

Para un completo entendimiento de los sistemas de aleación, es necesario conocer las condiciones que determinan el número de fases en un sistema en equilibrio. En un sistema de un componente es bien conocida la condición (presión), bajo condiciones de presión constante, solo puede coexistir dos fases a aquellas temperaturas que tengan un cambio de fase: el punto de ebullición, el punto de fusión y las temperaturas a las cuales ocurren cambios de fase en el estado sólido. En el caso de dos fases influyen las dos fases y la concentración que se tengan en cada fase.³⁰

2.6.6. Sistema eutéctico cobre-plata

En el diagrama de equilibrio cobre- plata (Cu-Ag). Fig. 3, puede tomarse como representativo de los sistemas eutécticos. En sistemas de este tipo, hay siempre una aleación específica, conocida como la composición eutéctica, que solidifica a una temperatura menor que todas las demás composiciones. Bajo condiciones que se acercan al equilibrio, esta forma solidifica a una temperatura simple igual que un metal puro. En otro aspecto la reacción de solidificación de esta composición es algo diferente a la de un metal puro ya que solidifica para formar una mezcla de dos fases diferentes.³¹

2.6.7. Microestructura de equilibrio del sistema eutéctico cobre-plata

Cualquier composición de un sistema isomorfo en equilibrio y en el estado sólido consiste de un solo grupo homogéneo de cristales en solución sólida. Cuando se observa bajo el microscopio tal estructura, no difiere

³⁰ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 411.

³¹ Reed Hill, R. E., (1980), pág. 479.

esencialmente de la de un metal puro. Por tanto, de ordinario es difícil decir mucho sobre la composición de estas aleaciones de una fase solo del estudio de su microestructura. Por otra parte, la apariencia bajo el microscopio de una aleación desde el campo bifásico (sólido) de un sistema eutéctico es muy característica de su composición.³²

2.7. Sinterización

La sinterización es la clave para la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la unión de los granos, y átomos en las redes cristalinas y se consolida el producto para el cual sea fabricado, por mecanismos de sinterización (ver anexo A-1).

2.7.1. Fuerza impulsora para la sinterización

La fuerza impulsora para el movimiento de átomos (recristalización) procede de la “energía almacenada del trabajo en frío”, este tema ya se definió anteriormente en el (ítem 2.4.4).³³

2.7.2. Transformaciones que ocurre en el calentamiento

En el calentamiento, la velocidad de difusión aumenta siempre en forma constante en función de la temperatura. Por lo tanto, es por lo general, cierto que tanto la velocidad de nucleación como la del crecimiento aumentan continuamente con las temperaturas sobre una temperatura de transformación. En otras palabras, el efecto de la temperatura sobre la velocidad de difusión tiende siempre acelerar la reacción según se eleve la temperatura sobre la temperatura de transformación.³⁴

³² Reed Hill, R. E., (1980), pág. 480.

³³ Reed Hill, R. E., (1980), pp. 267.

³⁴ Reed Hill, R. E., (1980), pp. 455.

2.7.3. Proceso de sinterizado

Al material crudo compacto en verde se le da resistencia por sinterizado, y si es necesario por un procesamiento subsiguiente. El compacto crudo se calienta para obtener las propiedades finales requeridas. En el curso del calentamiento, tienen lugar varios cambios como son;

Secado. A temperaturas bajas, los constituyentes líquidos (H_2O) se separan. El tiempo de residencia necesario se eleva con el incremento del espesor de la pared; el calentamiento rápido causaría la vaporización repentina del (H_2O) y podría resultar en la desintegración del compacto. El vacío acelera el secado. Si los aglutinantes orgánicos se van a quemar, debe haber suficiente oxígeno disponible para su combustión.

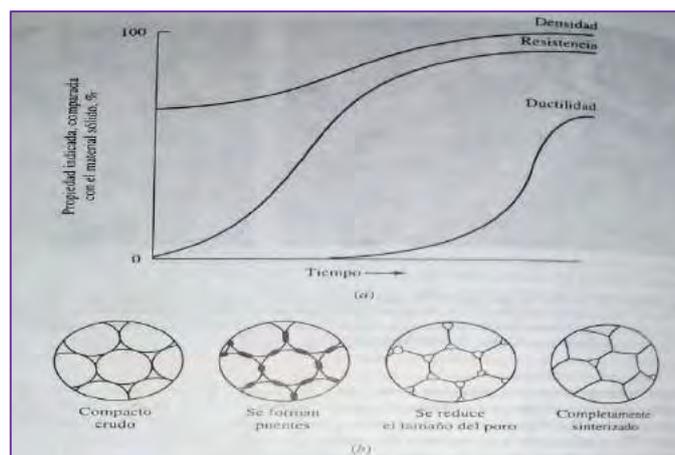
Sinterización. Es un ciclo térmico que consiste en calentar la pieza compactada en crudo durante un tiempo determinado a una temperatura inferior a la temperatura de fusión (T_m) del metal base, trabajo en frío es considerado a temperaturas superiores a ($0.5T_m$), por lo general el rango del trabajo en caliente, es alrededor de ($0.7T_m$ a $0.9T_m$), donde ocurre el sinterizado. El compacto contiene partículas del material muy cercanas entre sí. La energía del sistema disminuirá, reduciendo el área superficial total; en otras palabras, la fuerza de accionamiento para el sinterizado es la energía superficial que se reduce al unir partículas adyacentes (Fig. 21). Varios mecanismos intervienen, de los cuales la evaporación y la condensación normalmente son mucho menos importantes que la difusión sólida. Para comenzar, los enlaces interatómicos se establecen entre superficies adyacentes, los cuellos crecen por el movimiento de átomos en la superficie y de la masa de las partículas hacia ellos. El flujo plástico o viscoso también puede ocurrir

y esto, junto con una mayor difusión masiva, reduce el tamaño de los poros (Fig. 21-b). De esta manera, el volumen se contrae y la densidad se incrementa (Fig. 21-a). Para lograr la misma densidad sinterizada, la contracción es mayor para densidades en crudo menores. Si ocurren cambios de fase durante el calentamiento, la contracción puede despreciarse e incluso puede ocurrir el incremento. Con frecuencia es necesario determinar la contracción experimentalmente: si los pasos del proceso están estrechamente controlados, la contracción es reproducible y las partes terminadas se pueden mantener dentro de tolerancias estrechas.

En esta etapa, la resistencia aumenta marcadamente y un material dúctil presenta un incremento de ductilidad (Fig. 20). Sin embargo, es factible que las propiedades ante la fatiga sean inferiores si se ha dejado alguna porosidad.

Figura 20.

El curso del sinterizado



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987), pág. 470

El calentamiento posterior no necesariamente mejora la situación, ya que las fronteras de grano comienzan a migrar, algunos granos se consumen, el tamaño promedio de grano se eleva, con una caída consecuente de la resistencia, y los poros remanentes (dentro de los granos nuevos) se vuelven

estables. Estos poros, junto con cualquier porosidad resultante de los gases atrapados, deterioran las propiedades.

Sinterizado en fase líquida. El proceso se acelera cuando uno de los constituyentes se funde y envuelve al constituyente con temperatura de fusión más elevada. Un líquido que moja las partículas sólidas ejerce presión capilar que mueve y presiona físicamente a las partículas al parejo para una densificación mejor (ver fig. 21). Es posible determinar las fases formadas por medio de los diagramas de fases aplicables; la mejor aglutinación se consigue cuando existe solubilidad mutua. Cuando los polvos elementales se mezclan y las fases transitorias de baja temperatura de fusión se forman, antes que la difusión cree una aleación homogénea (como en las aleaciones de aluminio, latones y broces), se forma una fase líquida en la superficie de las partículas. La densidad puede alcanzar la densidad teórica.

Contracción. Normalmente es necesario realizar pruebas para determinar el valor exacto de la contracción, pero se puede obtener una buena aproximación considerando que la contracción es uniforme en todas las direcciones y que la masa no cambia (a menos que estén presentes constituyentes volátiles en grandes cantidades).

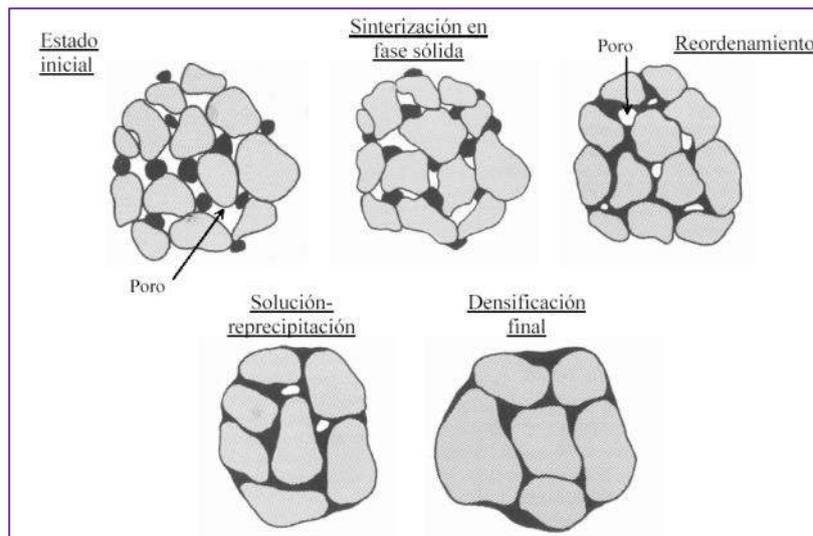
$$Masa = constante = \rho_{crudo} v_{crudo} = \rho_{sinterizado} v_{sinterizado} \quad \text{ecuación (2-21)}$$

$$Contraccion\ volumetrica = \frac{v_{sinterizado}}{v_{crudo}} = \frac{\rho_{crudo}}{\rho_{sinterizado}} \quad \text{ecuación (2-22)}$$

$$Contraccion\ lineal = \left(\frac{\rho_{crudo}}{\rho_{sinterizado}} \right)^{1/3} \quad \text{ecuación (2-23)}$$

Figura 21.

Diagrama de las etapas clásicas de sinterización en fase líquida



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987). pág. 470.

Cuando las condiciones del procesamiento se controlan estrechamente, la contracción generalmente es predecible. Dado que las aplicaciones de la PM involucran producciones que van de medianas a altas, la mayoría de los hornos de sinterizado se diseñan con dispositivos mecanizados para el traslado de las piezas de trabajo durante el proceso. El tratamiento térmico consiste en tres pasos realizados en tres cámaras de hornos continuos (ver fig. 22).

- 1) Precalentado, en el cual se queman los lubricantes y los aglutinantes.
- 2) Sinterizado.
- 3) Enfriado.

Las temperaturas típicas y los tiempos de sinterizado se proporcionan en la tabla 2.1 para metales seleccionados.

En la práctica moderna del sinterizado se controla la atmosfera del horno. Los propósitos de la atmosfera controlada son:

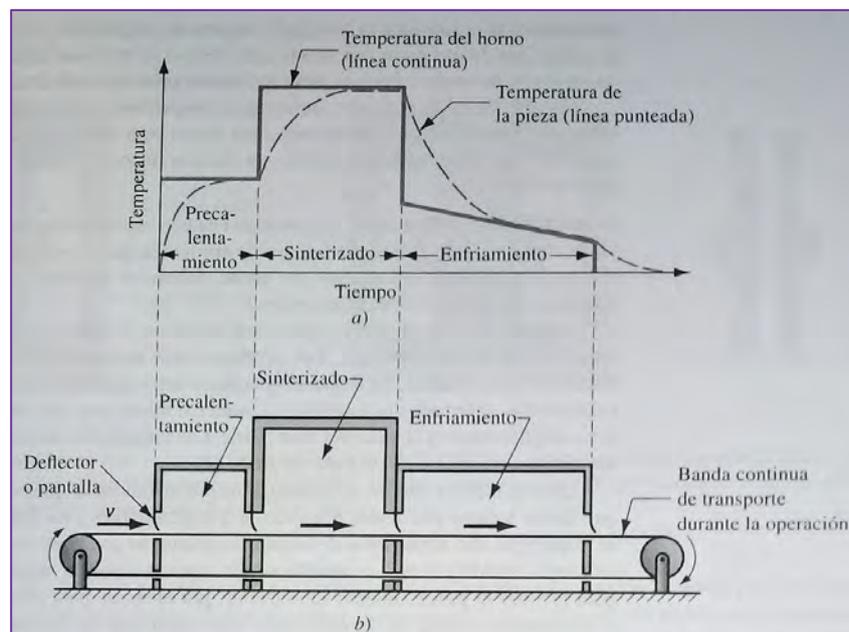
- 1) Proteger de la oxidación.

- 2) Proporcionar una atmosfera reductora para remover los óxidos existentes.
- 3) Suministrar una atmosfera carburante.
- 4) Ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado.

Las atmosferas de los hornos de sinterizado comunes son: de gas inerte, basadas en nitrógeno, de amoniaco disociado, de hidrogeno y basadas en gas natural.

Figura 22.

Tiempo de sinterizado.



Nota: Adaptado de Groover, M. (2014). Introducción a los procesos de manufactura.

[Figura]. Recuperado de la pág. 217

Las atmosferas al vacío se usan para ciertos metales como los aceros inoxidables y el tungsteno.³⁵

2.7.4. Combinación de prensado y sinterizado

El prensado isostático caliente alcanza la compactación y el sinterizado en un solo paso. Otras técnicas que combinan los dos pasos en el prensado en caliente y el sinterizado por chispas.

³⁵ Schey J. A. et al. (2002), pág. 468-471.

Tabla 1
Temperaturas y tiempos típicos de sinterizado

Metal	Temperatura de sinterizado		Tiempo (min)
Acero inoxidable	1200 °C	2200 °F	45
Bronce	820 °C	1500 °F	15
Cobre	850 °C	1600 °F	25
Hierro	1100 °C	2000 °F	30
Latón	850 °C	1600 °F	25
Tungsteno	2300 °C	4200 °F	480

Nota: Adaptado de Groover, M. (2014), pág. 217.

Prensado en caliente. La disposición de un proceso de prensado en caliente uniaxial es muy similar al prensado de PM convencional, excepto que el calor se aplica durante la compactación.

Sinterizado por chispas. Es una alternativa que combina el prensado y el sinterizado, porque supera alguno de los problemas del prensado en caliente. El proceso consiste en dos pasos básicos: 1) los polvos o un compacto en verde preformado se colocan en un dado, y 2) los punzones superior e inferior, que también sirven como electrodo, comprimen la pieza aplicando una corriente eléctrica de alta energía que al mismo tiempo quema los contaminantes de la superficie y sinteriza los polvos, y forma una pieza densa y sólida en cerca de 15 segundos. El proceso se aplica a varios metales.³⁶

³⁶ Groover M. (2014), pág. 218.

2.8. Acabado de piezas

La porosidad de una pieza completamente sinterizada a un es importante (de 4 a 15%), depende de las características del polvo, la presión de compactación, la temperatura de sinterizado y el tiempo. La densidad a menudo se mantiene intencionalmente baja para preservar la porosidad interconectada para cojinetes, filtros, barras acústicas y electrodos de baterías, o cuando los componentes se van a infiltrar. La Metalúrgia de polvos ofrece oportunidades únicas para adaptar las propiedades a las necesidades: al presionar secciones diferentes de una pieza a densidades distintas, la resistencia y la porosidad se pueden ajustar localmente. La porosidad residual vuelve más rugosa a los compactos sinterizados que la matriz de compactación. Las propiedades de impacto y fatiga son menores que en un material forjado, pero es posible mejorarlas. El tratamiento térmico es una de las posibilidades; otros procesos son únicos.

1. El reimpacto en frío (acuñado o labrado) del compacto sinterizado eleva su densidad y mejora las tolerancias dimensionales. Al resinterizar el compacto representado (Fig. 23) se consigue una mayor densificación y el perfeccionamiento de la resistencia. Con frecuencia se realiza el tratamiento térmico.

2. La impregnación de un compacto sinterizado de porosidad interconectada puede obtenerse mediante la inmersión en aceite caliente. La acción capilar distribuye el aceite, la aplicación del vacío ayuda al proceso.

3. La infiltración es la impregnación con un metal (por ejemplo, cobre Cu para partes ferrosas), lleva acabo por inmersión en el metal fundido, o al colocar el metal de infiltración en forma de una lámina arriba o debajo del compacto en un horno; de nuevo, la acción capilar llena los poros.³⁷

³⁷ Schey J. A. et al. (2002), pág. 472.

2.9. Análisis y diseño de experimentos

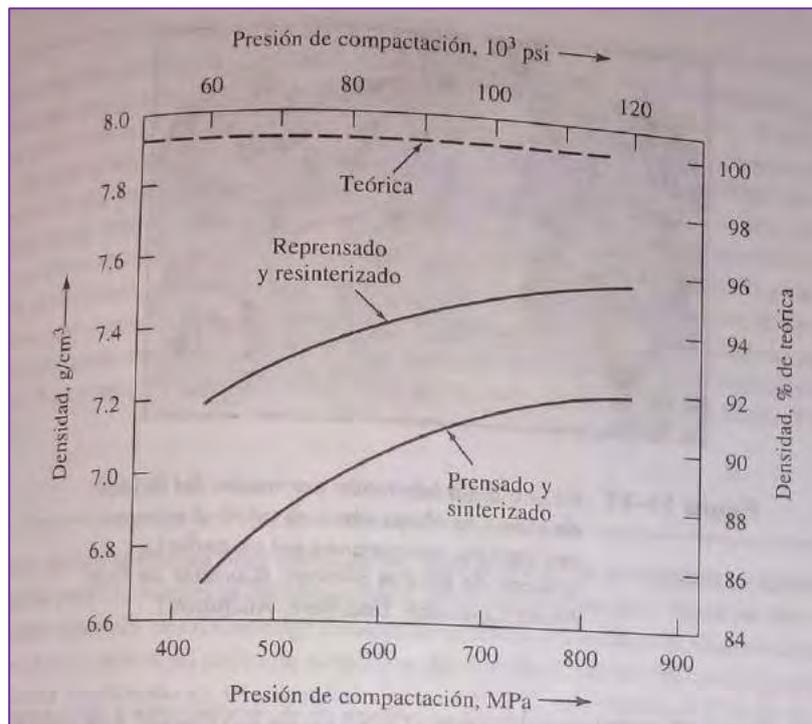
2.9.1. Diseño factorial 3^k

El diseño factorial 3^k considera k factores con tres niveles cada uno y tiene 3^k tratamientos. La primera desventaja de los diseños 3^k es que al aplicarse requieren mayor cantidad de pruebas que el diseño 2^k . Por ejemplo, si se quieren estudiar cuatro factores, y se considera sólo una repetición, el diseño 3^4 requiere en total 81 pruebas, una para cada tratamiento; mientras que el diseño 2^4 sólo necesita 16 pruebas. De esta forma, cuando se tienen muchos factores, cuatro o más, prácticamente es prohibitivo pensar en correr un diseño 3^k . Sin embargo, cuando se tienen pocos factores, tres como máximo, o en el peor de los casos cuatro, hay algunas situaciones prácticas en las que el diseño 3^k es una buena alternativa. De manera específica, hay dos razones que hacen viable el diseño 3^k :

- Se tienen factores de tipo continuo e interesa estudiar efectos cuadráticos como $A^2, B^2, \dots, A^2B, B^2A, A^2B^2, \dots$ (efectos de curvatura). Esto se hace cuando se cree que la variable de respuesta no es lineal, ni aproximadamente lineal en el rango de variación de los factores estudiados (ver figura 24-b).
- Los factores son categóricos o discretos y de manera natural tienen tres niveles cada uno. Esto ocurre en factores como tipo de material, diferentes medios de cultivos, factor máquina, etc., los cuales pueden tener naturalmente tres niveles. Por ejemplo, si uno de los factores es un reactivo del cual existen tres marcas, resulta natural que el experimentador quiera probar las tres marcas con la idea de comparar su desempeño en las diferentes combinaciones de los factores restantes.

Figura 23.

Densidad de un compacto de hierro.



Nota: Adaptado de Schey, J. (1987). pág. 473.

Ahora, profundizando en la posible existencia de curvatura, consideremos un factor X de tipo continuo que se supone tiene efecto sobre la respuesta y dicho efecto desconocido podría ser de tipo lineal, al menos en forma aproximada, como en la figura 24-a, o de tipo cuadrático como en la figura 24-b. En esta misma figura se observa que para estudiar un efecto lineal, o aproximadamente lineal, basta con probar el factor X en dos niveles, mientras que para estudiar un efecto cuadrático son necesarios al menos tres niveles del factor X. El problema es que de antemano no se sabe cómo será el efecto del factor y a veces se corre el riesgo de utilizar dos niveles, cuando en realidad se requerían de al menos tres. Entonces, se recomienda contar con una estrategia experimental que permita detectar de manera económica la presencia de curvatura. Ése es precisamente el propósito de agregar puntos al centro en un

diseño 2^k . Sin embargo, con esta estrategia sólo se detecta si hay curvatura, pero no es posible estudiarla (modelarla).

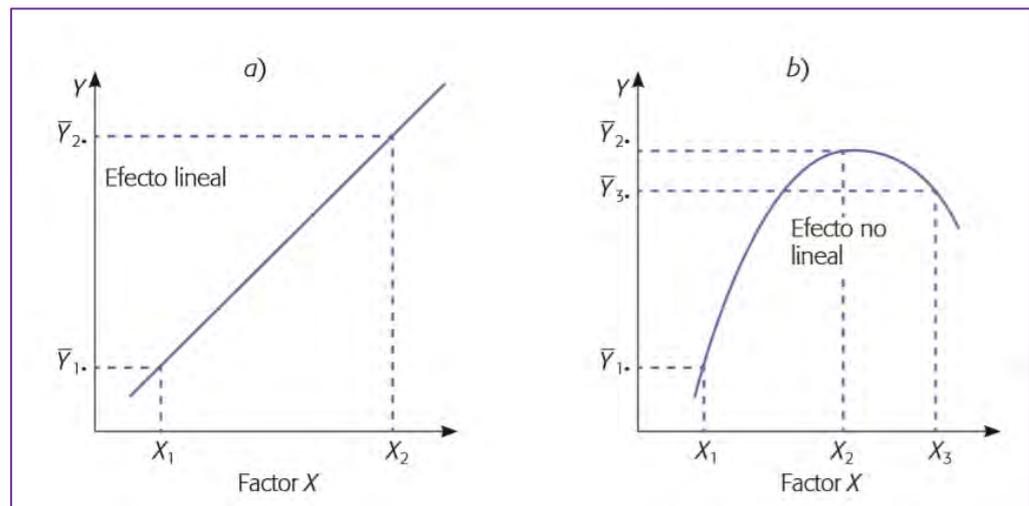
El diseño factorial 3^k es una de las alternativas experimentales que permite estudiar efectos de curvatura, además de efectos lineales y de interacción. Otros diseños, que de hecho son más utilizados y recomendados para ese fin, son el diseño de Box-Benken y el diseño central compuesto.

2.9.2. Análisis de varianza (ANOVA).

Definición: Es una prueba estadística para analizar si más de dos grupos difieren significativamente entre sí en cuanto a sus medias y varianzas. La prueba t se usa para dos grupos y el análisis de varianza unidireccional se usa para tres, cuatro o más grupos. Aunque con dos grupos se puede utilizar también.³⁸

Figura 24.

Ejemplo de efecto lineal y efecto con curva.



Nota: Adaptado de Gutiérrez, H. (2012), pág. 210.

³⁸ Gutiérrez, H. (2012), pág. 210.

De acuerdo al diseño factorial en tres variables independientes AXBXC el comportamiento de la variable respuesta Y se puede escribir de la siguiente manera la ecuación matemática mediante el modelo de efectos:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl};$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c; l = 1, 2, \dots, n$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{N} \quad \text{ecuación (2-24)}$$

donde “n” es el número de réplicas;

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y^2_{i\dots}}{bcn} - \frac{Y^2}{N} \quad \text{ecuación (2-25)}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y^2_{j\dots}}{acn} - \frac{Y^2}{N} \quad \text{ecuación (2-26)}$$

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y^2_{k\dots}}{abn} - \frac{Y^2}{N} \quad \text{ecuación (2-27)}$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y^2_{ij\dots}}{cn} - \frac{Y^2}{N} - SC_A - SC_B \quad \text{ecuación (2-28)}$$

$$SC_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y^2_{ik\dots}}{bn} - \frac{Y^2}{N} - SC_A - SC_C \quad \text{ecuación (2-29)}$$

$$SC_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y^2_{jk\dots}}{an} - \frac{Y^2}{N} - SC_B - SC_C \quad \text{ecuación (2-30)}$$

Tabla 2.

Tabla de ANOVA para el diseño factorial 3x3.

<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	<i>F₀</i>	<i>Valor-p</i>
Efecto A	SC_A	$a - 1$	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F > F_0^A)$
Efecto B	SC_B	$b - 1$	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F > F_0^B)$
Efecto C	SC_C	$c - 1$	CM_C	CM_C/CM_E	$P(F > F_0^C)$
Efecto AB	SC_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F > F_0^{AB})$
Efecto AC	SC_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	CM_{AC}	CM_{AC}/CM_E	$P(F > F_0^{AC})$
Efecto BC	SC_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	CM_{BC}	CM_{BC}/CM_E	$P(F > F_0^{BC})$
Efecto ABC	SC_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	CM_{ABC}	CM_{ABC}/CM_E	$P(F > F_0^{ABC})$
Error	SC_E	$abc(n - 1)$	CM_E		
Total	SC_T	$abcn - 1$			

Nota: Adaptado de https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/2e.analisis_de_varianza_de_disenos_experimentales-multifactorial.pdf

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

- Por el método de compactación sinterización es probable producir piezas de joyería en plata 925 de calidad.

3.1.2. Hipótesis específicas

- Con la compactación se logra que los polvos metalúrgicos adquieran la forma y resistencia necesaria, para su posterior sinterización.
- A mayor temperatura de sinterización es mayor la velocidad de sinterización y viceversa si la temperatura disminuye la cinética de sinterización disminuye.
- A mayor tiempo de sinterización las piezas de plata 925 compactadas adquieren mayor densidad aproximándose a la densidad teórica (10.40 g/cm³) y la porosidad del material disminuye.

3.2. Variables e indicadores

3.2.1. Variable dependiente

- Porcentaje de porosidad

3.2.2. Variables Independientes

- Fuerza de compactación.
- Temperatura de sinterización.
- Tiempo de sinterización.

3.2.3. Indicadores

- Densidad de compactado (g/cm³).
- Temperatura de sinterización (°C).

- Tiempo de sinterización (min).
- Espesor de la muestra sinterizado (mm).
- Brillo superficial de la pieza.

3.3. Matriz de operacionalización de variables

MATRIZ DE OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES							
VARIABLE		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD	INSTRUMENTO
DEPENDIENTE	Porcentaje de porosidad	Es una fracción del volumen vacío sobre el volumen total, representándose matemáticamente en unidades porcentuales que van de (0 ~ 100) %. (Wikipedia)	Actividades a desarrollarse: <ul style="list-style-type: none"> - Se determinó la densidad aparente a nivel de laboratorio. - Mediante cálculos matemáticos se obtuvo el porcentaje de porosidad. 	Cálculos	Porcentaje de porosidad	Porcentaje	Fórmula Matemática
				Volumen	Calibración de las muestras cilíndricas	cm ³	Vernier
				Densidad	Cantidad de masa por unidad de volumen	g/ cm ³	Fórmula matemática
INDEPENDIENTE	Fuerza de compactación	Es el esfuerzo externo aplicada a partículas en una matriz definida para causar disminución de volumen a medida que el aire o líquidos se desplazan de los poros entre los granos de las partículas hacia el exterior.	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso de compactación de los polvos metálicos en una matriz cuya fuerza está expresada en ton-fuerza. 	La fuerza estática aplicada con la prensa hidráulica	Variación de volumen 3 ton-fuerza	ton-f	Manómetro
					Variación de volumen 5 ton-fuerza		
					Variación de volumen 7ton-fuerza		
	Temperatura de sinterización	Es grado térmico, inferior a la de fusión de la mezcla, donde ocurre la difusión de los átomos y vacancias, formándose puentes entre granos y enlaces entre átomos, para incrementar la resistencia y rigidez de la pieza requerida.	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso de sinterización en un horno de resistencia eléctrica, a temperaturas 720°C, 780°C, y 840°C, por debajo de 893°C (tm). 	Temperatura de sinterización.	Temperatura de 720°C	Grados Celsius	Pirómetro
					Temperatura de 780 °C		
					Temperatura de y 840°C		
Tiempo de sinterización	Es un ciclo térmico, a elevada temperatura termodinámica (0.7 a 0.9) Tm, durante el cual ocurren las transformaciones provocando la unión de los átomos mediante el proceso de difusión.	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de sinterización a tres diferentes tiempos. 	Tiempo de 5 minutos	Tiempo	Minutos	Cronómetro	
							Tiempo de 10 minutos
							Tiempo de 15 minutos

3.4. Introducción

El objeto de estudio es determinar la factibilidad de obtener piezas de joyería en plata 925 (ver tabla 3) por el método de compactación-sinterización, a partir de polvos de plata y cobre; fabricación de matrices para el compactado, los equipos de laboratorio fueron proporcionados por la empresa de joyería ORO INCA.

Tabla 3

Composición química de la plata 925

Nº	Composición química de la aleación Ag.Cu 925	porcentaje del elemento (%)
1	plata	92.5
2	cobre	7.5

Nota: Adaptado de Norma Técnica Peruana NTP 399.504:2008

Trabajos Preliminares;

Antes de desarrollar el trabajo experimental planteado en el plan de tesis, se han realizado pruebas preliminares de obtención de polvos metálicos de plata, cobre y la elaboración de matrices

3.4.1. Obtención de polvos metálicos de plata y cobre

Se realizó la obtención de polvos metálicos de plata y cobre, a partir de los residuos de fabricación de joyería, estos residuos de desecho, tienen un alto contenido metálico valioso (Au, Ag, Cu, Pd y otros) los cuales se sometieron a varios procesos metalúrgicos:

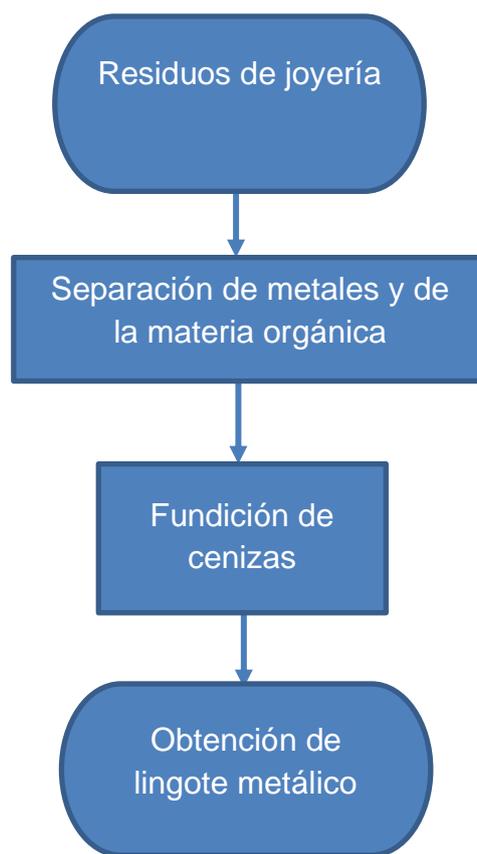
1. Recuperación de metales de oro y plata de los residuos de producción de joyería.

Para la obtención de polvos metálicos de plata y cobre a partir de residuos de fabricación de joyas en oro y plata se debe realizar una serie de procesos (ver figura 25). Los **residuos de joyería** provenientes de (desbastes, limaduras, pulido de joyas, corte de rebabas y otros), se mezcla en un recipiente

de crisol para la **separación de metales de la materia orgánica** (ver figura 26), mediante la incineración al interior del horno, posterior a ello se procede con la **fundición de las cenizas** (cenizas producto de la incineración con contenido metálico de oro, plata, cobre, otros) con fundentes y escorificantes donde se **obtiene un lingote** de oro-plata-cobre (dore).

Figura 25.

Diagrama de flujo de recuperación de oro y plata de residuos de joyería.



Nota: Elaboración propia

a) Equipos y herramientas

Equipos

- Horno de fundición
- Equipo de rayos X

Herramientas y materiales

- Pinzas

- Crisol
- EPP
- Otros

Figura 26

Proceso de separación de metales de la materia orgánica en horno eléctrico a 750 °C.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

b) Balance del proceso de recuperación de oro y plata a partir de residuos de joyería

Se inició con una materia prima de 20.53 kg, al realizar la separación de metales de la materia orgánica se tiene un peso de 13.79 kg de cenizas con contenido metálico, al fundir las cenizas con contenido metálico se obtuvo un lingote dore de una mezcla de oro, plata, cobre y otros metales con un peso de 0.572 kg (ver tabla 4). Posterior a este proceso se procederá a separar el oro, plata y cobre de dicho lingote.

El contenido metálico y las cenizas es un 67.17%, contenido de materia orgánica que se volatilizo es de 32.83%, al fundir las cenizas con contenido metálico se obtuvo un lingote de 2.79% y una escoria de 64.38% (ver tabla 5).

Tabla 4

Balance de materiales del proceso de recuperación de metales a partir de residuos de joyería en peso

N°	Materia prima de residuos de joyería (kg)	Separación de metales de la materia orgánica		Fundición	
		Cenizas + metal (kg)	Materia orgánica (kg)	Lingote (kg)	Escoria (kg)
1	20.530	13.790	6.740	0.572	13.218

Nota: Elaboración propia

Tabla 4

Balance de materiales del proceso de recuperación de metales a partir de residuos de joyería en porcentaje

N°	Materia prima de residuos de joyería (%)	Separación de metales de la materia orgánica		Fundición	
		Cenizas + metal (%)	Materia orgánica (%)	Lingote (%)	Escoria (%)
1	100.00	67.17	32.83	2.79	64.38

Nota: Elaboración propia

c) Análisis mediante rayos X la composición química del lingote

Al obtener el lingote se procedió a realizar análisis mediante rayos X para determinar su composición química, el cual se obtuvo el siguiente resultado (ver tabla 6), teniendo contenido de oro, plata, cobre, níquel, paladio y otros. Se realizaron dos pruebas en distintos puntos en la misma probeta.

Tabla 5

Reporte del análisis químico del lingote metálico (Ag)

N°	Elemento	Análisis N° 01 (%)	Análisis N° 02 (%)	Promedio (%)
1	Plata	80.78	81.07	80.925
2	oro	9.97	10.40	10.185
3	cobre	8.72	8.36	8.540
4	Níquel	0.269	0.169	0.219
5	paladio	0.085	-	
6	Otros	0.176	-	0.130
6	total	100.00	100.00	100.00

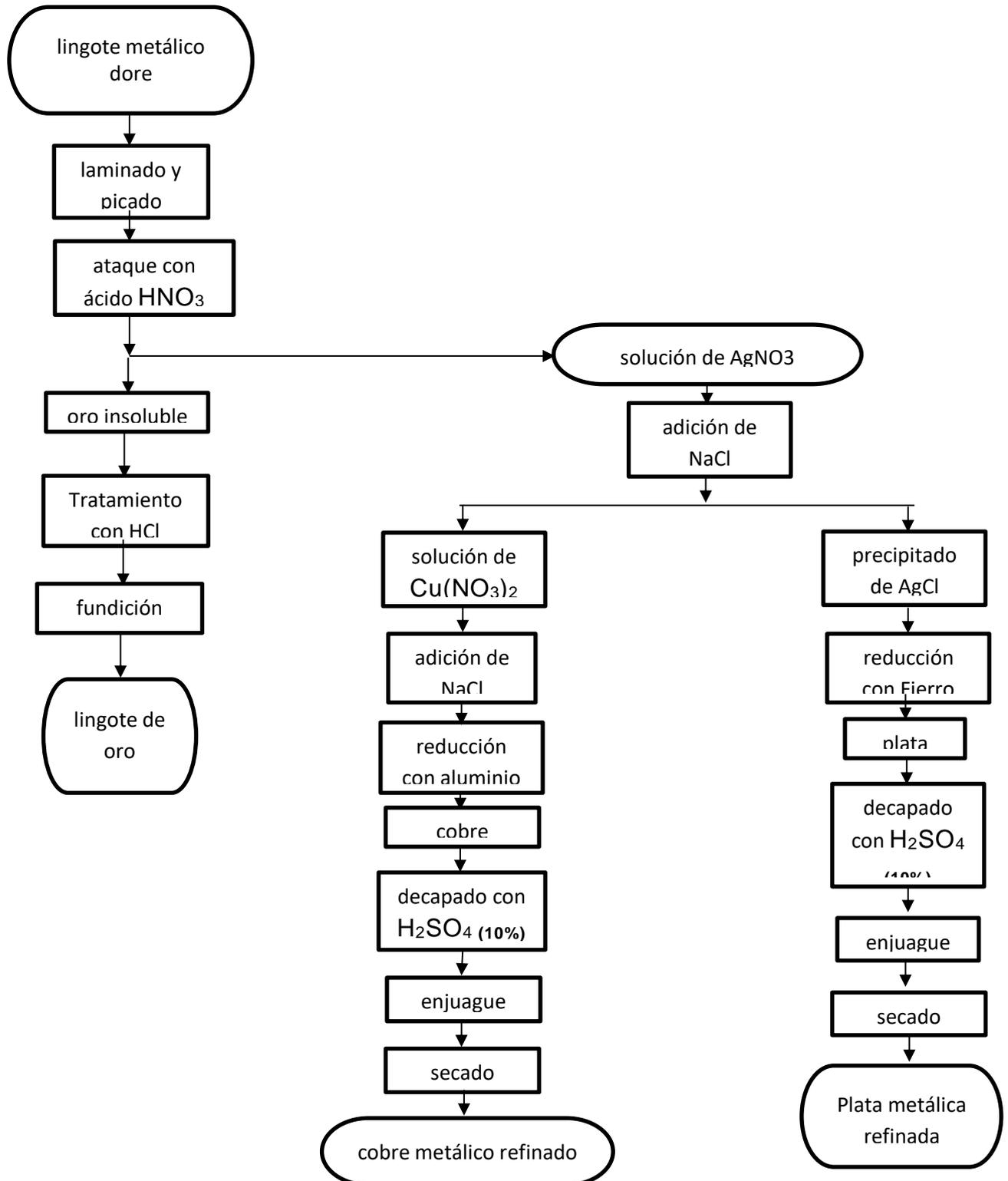
Nota: Elaboración propia

Las imágenes realizadas mediante rayos X, se encuentran en el anexo B – 3.

3.2.1. Diagrama del proceso de refinación de oro, plata y cobre a partir de lingote metálico dore.

Figura 27.

Diagrama de refinación de oro, plata y cobre.



Nota: Elaboración propia

a) Equipos y herramientas en laboratorio

Equipos

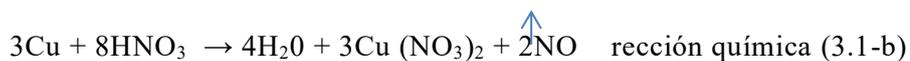
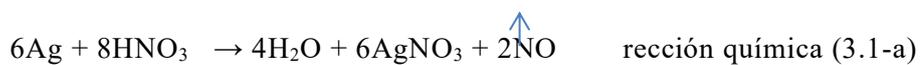
- Agitador magnético con calentador, para reacciones químicas
- Laminadora eléctrica de Joyería
- Horno de fundición

Herramientas y materiales

- Vasos de precipitado capacidad de 2 litros
- Reactivos
- Material de laboratorio
- EPP
- otros

b) Proceso de refinación de oro, plata y cobre

- ✓ El lingote dore se procede a laminar hasta un espesor de 0.5mm y se corta en porciones de a un centímetro cuadrado aproximadamente.
- ✓ Se vierte en un recipiente pírrex y se ataca con ácido nítrico HNO_3 obteniéndose soluciones de nitrato de plata AgNO_3 y nitrato de cobre CuNO_3 con partículas sólidas de oro debido a que el oro no reacciona con al ácido nítrico de acorde a las reacciones químicas 3.1-a y 3.1-b, liberando óxido nítrico como gas.



- ✓ Las partículas de oro insolubles se le hace un tratamiento con ácido clorhídrico y posteriormente se procede a la fundición del metal obteniéndose un lingote de oro.
- ✓ A la solución de nitrato de plata AgNO_3 y nitrato de cobre CuNO_3 se le introduce cloruro de sodio NaCl el cual reacciona con la plata precipitándose como cloruro de plata AgCl (ver figura 3.4-a) y por otra parte obteniéndose nitrato de sodio NaNO_3 (ver reacción química 3.1-c).



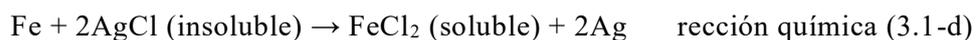
- ✓ La solución de cloruro de plata AgCl al entrar en reacción con el hierro metálico se precipita (ver figura 28-b) formando una solución de cloruro de hierro FeCl_2 , quedando la plata en estado metálico (ver reacción química 3.1-d).

Figura 28

a) precipitación de cloruro de plata AgCl , b) reducción del cloruro de plata en plata metálica.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca



- ✓ La solución de nitrato de cobre CuNO_3 al entrar en reacción química con el aluminio metálico se reduce y precipita como cobre metálico (ver reacción química 3.1-e) y se forma una solución de nitrato de aluminio, y queda el cobre en estado metálico (ver figura 29).

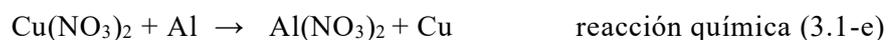
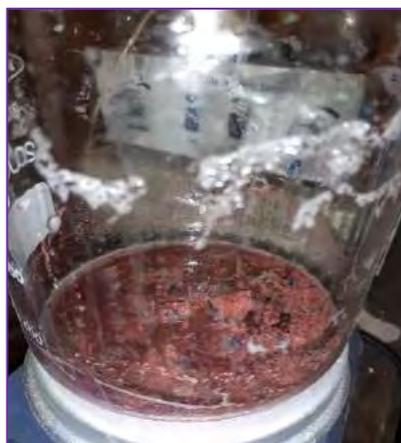


Figura 29.

Precipitado de cobre metálico.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

3.4.2. Fabricación de matriz para la compactación de polvos metalúrgicos.

a) Equipos y herramientas

Equipos

- Torno
- Esmeril
- Horno

Herramientas y materiales

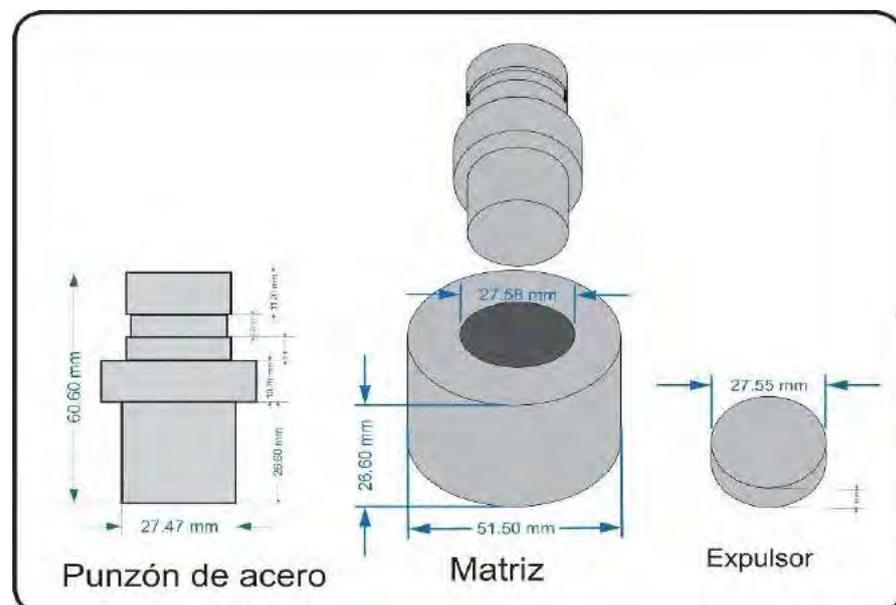
- Bulones de acero
- Ejes de acero
- Buriles HSS
- Micro motor de brazo flexible
- EPP
- otros

b) Diseño de matrices de compactación

Se hizo el diseño de la matriz para el compactado de los polvos en un software de diseño (Corel DRAW) con las dimensiones que son adecuadas para una placa para confeccionar dijes, aretes, sortijas y eslabones para cadenas de plata, (ver figura 30).

Figura 30

Diseño de matriz en software (Corel DRAW) para compactado de polvos de plata 925.

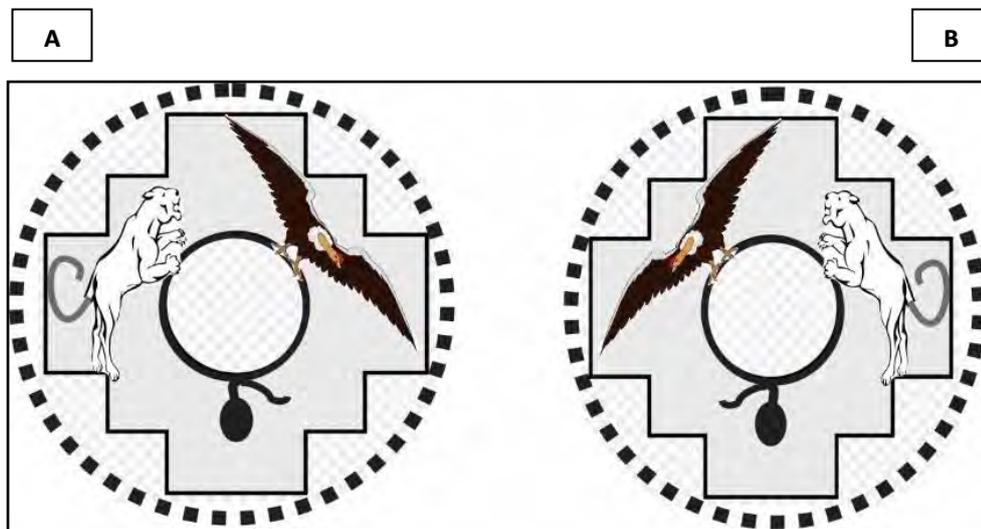


Nota: Elaboración propia

Utilizando el software de diseño (Corel DRAW), se realizó las figuras que se grabaron tanto en el punzón y el expulsor, para que las placas tengan diseño con características comerciales para joyería, (ver figura 31) y anexo B-9.

Figura 31.

Diseño en software (Corel DRAW) de figuras en matriz de compactado de la trilogía Inca dentro de la cruz andina a) positivo y b) negativo.



Nota: Elaboración propia

c) Fabricación de matrices para compactación de polvos de plata 925

Se fabricó las matrices utilizando aceros aleados de bulones y ejes de piezas auto motrices, estos materiales fueron recocidos a 850 °C, luego cortados, torneados, y grabados, figura 32.

Figura 32.

Proceso de fabricación de matrices para compactado.



Nota: Elaboración propia

El grabado de los diseños se realizó utilizando herramientas de corte como buriles HSS y fresas de acero al tungsteno (ver figura 33).

Figura 33.

Proceso de grabados de diseños comerciales para joyería.

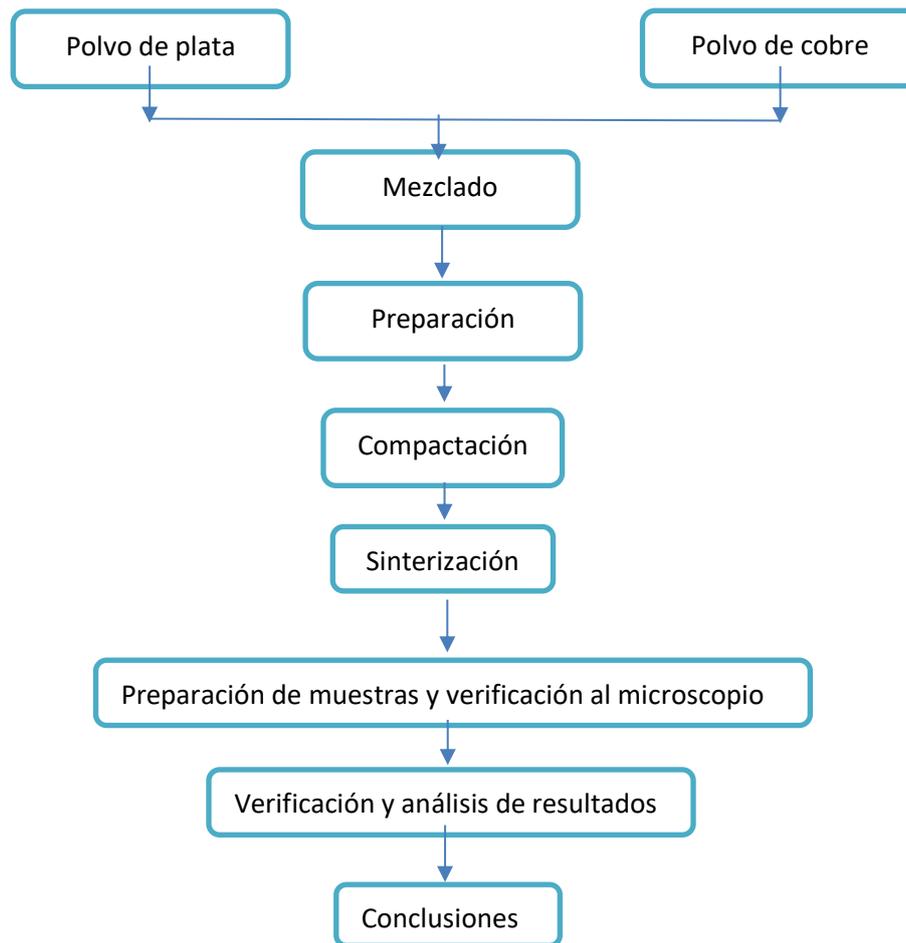


Nota: Elaboración propia

3.5. Descripción de los procesos experimentales

- Los polvos metalúrgicos de plata y de cobre se clasifican según su granulometría (tamizado).
- Se realiza el análisis químico por rayos X, del cobre y la plata por separado para determinar la pureza de cada muestra.
- Los polvos metalúrgicos de cobre y plata se mezclan en una proporción de 92.5% de plata y 7.5% de cobre.
- Se procede a compactar las muestras a tres diferentes fuerzas de compactación.
- Se toma datos de diámetro y espesor posterior al compactado en verde.
- Se procede a sinterizar en un horno de sinterización las muestras compactadas previamente a tres diferentes temperaturas y tres diferentes tiempos de sinterización.
- Se preparan superficialmente las muestras sinterizadas y se verifica al microscopio las muestras.
- Se toma datos de diámetro y espesor posterior al sinterizado.
- Se realizan análisis químico de las muestras acabadas.
- Se analizan los resultados obtenidos.

3.2.2. Diagrama del proceso



Nota: Elaboración propia

3.5.1. Equipos y herramientas

Equipos

- Compactadora hidráulica
- Horno para sinterización
- Pulidor de superficies
- Microscopio electrónico
- Equipo de rayos X

Herramientas y materiales

- Pinzas
- Crisol
- Calibrador
- Bolsas para guardar muestras
- EPP

3.6. Adecuamiento de los polvos metalúrgicos

Para el adecuamiento de los polvos metalúrgicos deben pasar una serie de operaciones como son:

3.6.1. Análisis granulométrico

Se realizó el tamizado de los polvos metalúrgicos de plata y de cobre según la norma ASTM por separado.

a) Análisis granulométrico de polvo metalúrgico (PM) de plata (Ag)

Se toma como muestra inicial 463.14 gramos de plata y se procede con el tamizado en las mallas; (+48), (+150) y (-150) ver tabla 7.

Figura 34.

Tamizado de polvos metalúrgicos de plata.



Nota: Adaptado de Laboratorio de procesamiento de minerales de la esc. profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

Tabla 6 .

Resultados del tamizado de polvo metalúrgico de plata

Material	Peso inicial (g)	Malla +48 (g)	Malla +150 (g)	Malla -150 (g)	Pérdidas (g)
polvo de plata	463.14	167.65	107.70	177.06	10.73

Nota: Elaboración propia

Para los trabajos de laboratorio se toma como muestra el material retenido en la malla (+150) para el polvo de plata.

b) Análisis granulométrico de polvo metalúrgico PM de cobre (Cu)

Se toma como muestra inicial 71.24 gramos de cobre y se procede con el tamizado en las mallas; (+60), (+100), (+150), (+200) y (-200) ver tabla 8.

Figura 35.

Tamizado de polvo metalúrgico de cobre.



Nota: Adaptado de Laboratorio de procesamiento de minerales de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

Tabla 7.

Resultado del tamizado de polvo metalúrgico de cobre.

Material	Peso inicial (g)	Mallas					Pérdidas (g)
		+60 (g)	+100 (g)	+150 (g)	+200 (g)	-200 (g)	
polvo de cobre	71.24	25.36	9.55	8.00	6.49	20.93	0.91

Nota: Elaboración propia

Para los trabajos de laboratorio se toma el material pasante a la malla (-200) para el caso del polvo de cobre.

3.6.2. Muestreo

El muestreo se realizó seleccionando el material más menudo representativo al total de la población muestral, para tener un producto acabado de mejor calidad.

La clase de muestra recogida es de tipo no probabilístico por conveniencia de forma aleatoria simple donde se tomó como muestra representativa de polvo metalúrgico de plata (Ag) el material retenido en la malla (+150) y para el polvo metalúrgico de cobre (Cu) el material pasante a la malla (-200), con los cuales se trabajaron de aquí en adelante las muestras de laboratorio para la compactación y el sinterizado.

3.6.3. Análisis químico de polvos metalúrgicos por rayos X

a) Análisis químico de polvos metalúrgicos de plata

Los polvos metalúrgicos de plata (Ag) antes de ser mezclados deben pasar por el análisis químico mediante rayos X (ver figura 36), para determinar la composición química y la pureza del metal y hacer los cálculos respectivos de peso del polvo metalúrgico de plata para la aleación de plata 925.

Los resultados de análisis químico de contenido de plata en los polvos metalúrgicos (tabla 9) indican que tiene presencia de plata de 99.557% y un contenido de hierro de 0.443% en promedio, de acorde a estos resultados se realizaran las aleaciones con cobre para obtener la plata 925.

Tabla 8.

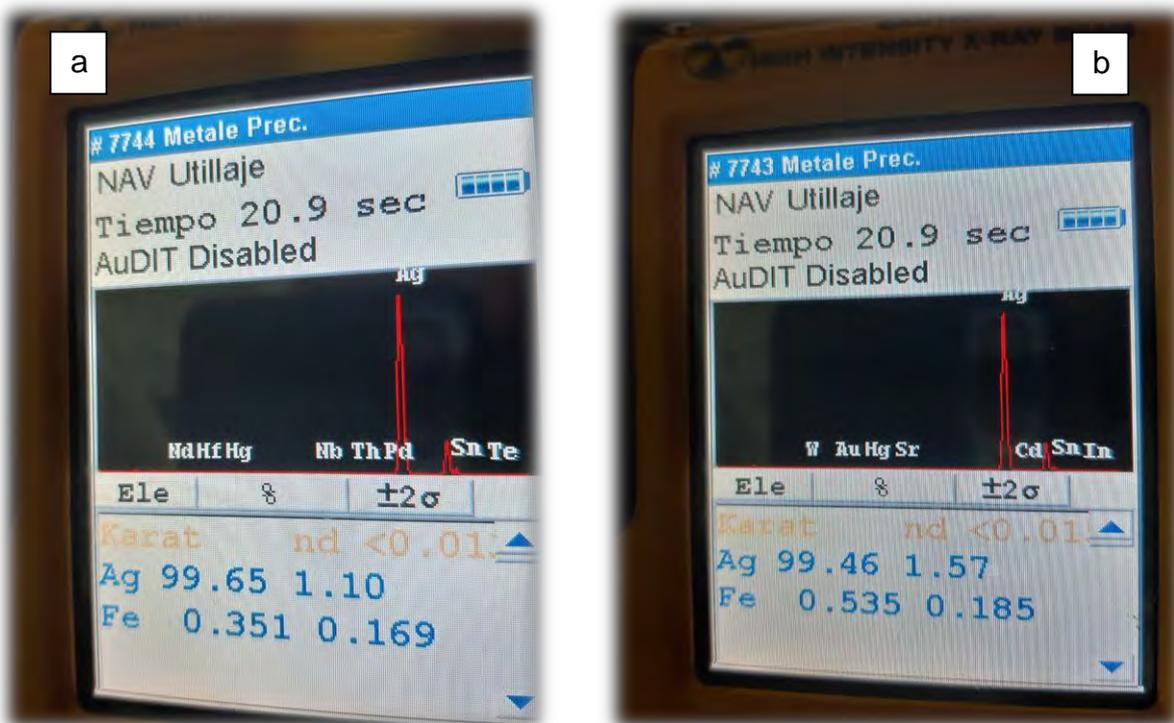
Reporte del análisis químico de polvo metalúrgico de plata (Ag).

N°	Elemento	Pruebas de análisis químico		Promedio (%)
		Número 01 (%)	Número 02 (%)	
1	plata (Ag)	99.465	99.649	99.557
2	hierro (Fe)	0.535	0.351	0.443
3	total	100.00	100.00	100.00

Nota: Elaboración propia

Figura 36.

Análisis químico de polvo metalúrgico de plata. Se tiene 2 reportes a y b



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

b) Análisis químico de polvos metalúrgicos de cobre

Los polvos metalúrgicos de cobre (Cu) antes de ser mezclados pasaron por un análisis químico mediante rayos X (figura 37), para determinar la composición química y la pureza del metal.

Los resultados de análisis químico de contenido de cobre en los polvos metalúrgicos (ver tabla 10) indican que tiene presencia de cobre en un 99.205%, plata 0.242%, paladio 0.318%, hierro de 0.069% y zinc 0.166% en

promedio, de acorde a estos resultados se realizaran las aleaciones para obtener la plata 925.

Tabla 9.

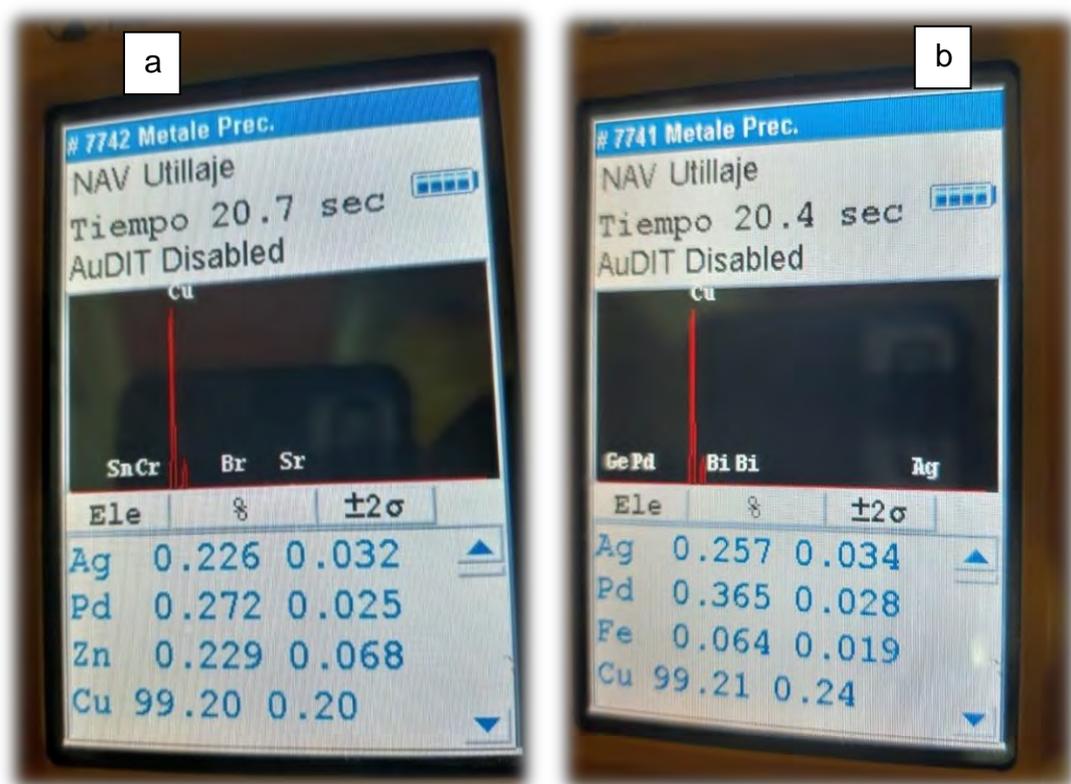
Reporte del análisis químico de polvo metalúrgico de cobre (Cu).

N°	Elemento	Pruebas de análisis químico		Promedio (%)
		Número 01 (%)	Número 02 (%)	
1	plata (Ag)	0.257	0.226	0.242
2	cobre (Cu)	99.210	99.20	99.205
3	paladio (Pd)	0.365	0.272	0.318
4	hierro (Fe)	0.064	0.073	0.069
5	zinc (Zn)	0.104	0.229	0.166
6	total	100.00	100.00	100.00

Nota: Elaboración propia

Figura 37.

Análisis químico de polvo metalúrgico de cobre. Se tiene 2 reportes a y b



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

3.7. Pruebas de aleación de plata con cobre

3.7.1. Aleación de plata 925

- Para las pruebas de laboratorio se requieren 27 muestras y cada una de las muestras de 6 gramos, los cuales suman un total de 162 g de aleación de plata 925.
- Considerando un 10 % en pérdidas será un total de 180 gramos de plata 925.
- Cálculo de la cantidad de polvo metalúrgico de cobre para 180 gramos de plata, se considera la pureza de la plata de 99.557% (tabla 3.7).

$$W. PM. Cu = \frac{(995.57 - 925) * 180.00g}{925}$$

$$W. PM. Cu = 13.733g$$

- Se tiene como resultado 13.733 gramos de polvo metalúrgico de cobre, para 180.00 gramos de polvo metalúrgico de plata.
- Se pesan 180 gramos de polvo metalúrgico de plata y 13.733 gramos de polvo metalúrgico de cobre, se procede a mezclar en un tambor rotatorio durante 15 minutos.
- Se pesan y separan 27 muestras, cada muestra de 6.00 gramos de aleación de polvo metalúrgico de plata 925.

3.8. Pruebas de compactación de polvos metalúrgicos en laboratorio

3.8.1. Pruebas de compactación de polvo metalúrgico en plata 925

- Se gradúa la máquina de compactación hidráulica en 3.00 toneladas de fuerza.

- Las muestras de polvos metalúrgicos de plata 925, de 6 gramos cada muestra, se vierte en la matriz de compactado una a la vez (ver figura 38-a y figura 38-b) y se compactan una a una.
- Se compactan las nueve muestras a 3.00 toneladas de fuerza.
- Se gradúa la máquina de compactación hidráulica en 5.00 toneladas fuerza.
- Se procede a verter las muestras de polvos metalúrgicos de plata 925 una a una y se compactan las nueve muestras a 5.00 toneladas fuerza.
- Se gradúa la máquina de compactación hidráulica en 7.00 toneladas de fuerza.
- Se procede a verter las muestras de polvos metalúrgicos de plata 925 una a una y se compactan las nueve muestras a 7.00 toneladas de fuerza en cada replica.

Figura 38.

Llenado de la matriz de compactación con polvo metalúrgico de aleación de plata 925.

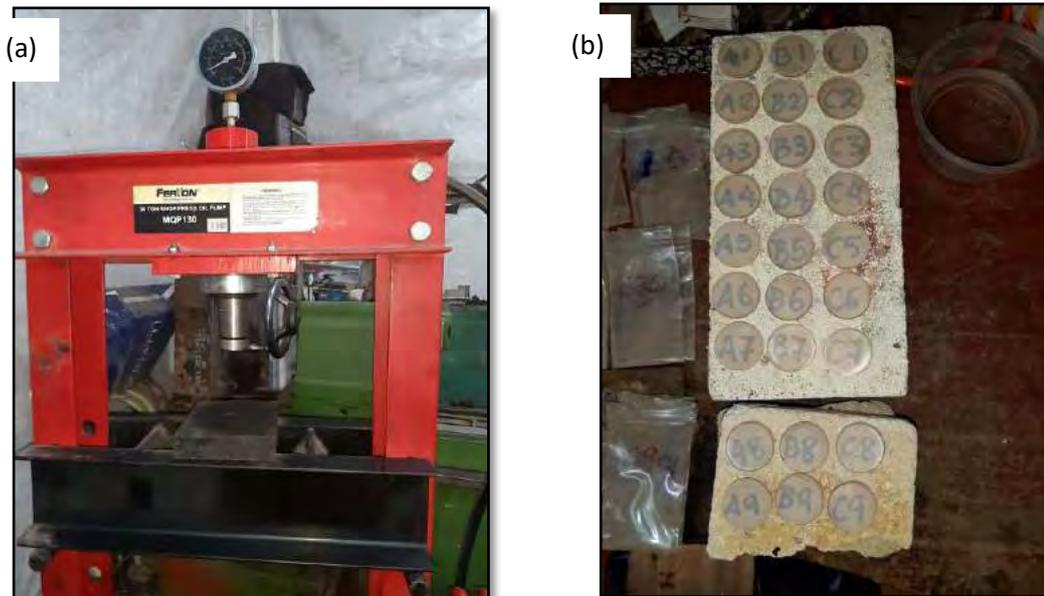


Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

- ❖ Se procede a retirar las muestras compactadas en verde y se clasifica por códigos (ver figura 39-b).

Figura 39.

a) proceso de compactación, b) muestras compactadas de polvos metalúrgicos en aleación de plata 925.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

3.2.3. Resultado de las pruebas de compactación en plata 925

- Los polvos metalúrgicos al ser compactados toman la forma de la matriz en la cual se compactan.
- En la tabla 11 se muestran los resultados del diámetro y espesor del compactado en verde en cada réplica.
- Todas las pruebas de compactación realizadas son de aleación de plata 925, a temperatura y presión ambiente de la ciudad de cusco.

Tabla 11.

Reporte de pruebas de compactación de polvos metalúrgicos de plata 925 en cada réplica.

Numero de muestra	Clasificación de muestra	PESO			Espesor			Diámetro		
		P-1	P-2	P-3	E-1	E-2	E-3	D-1	D-2	D-3
1	A-1	5.67	5.66	5.67	1.59	1.66	1.68	26.76	27.20	27.14
2	A-2	5.69	5.68	5.68	1.67	1.63	1.59	26.91	26.91	26.86
3	A-3	5.60	5.60	5.60	1.71	1.61	1.67	26.87	26.88	26.89
4	A-4	5.63	5.63	5.62	1.65	1.71	1.64	26.45	26.52	26.52
5	A-5	5.60	5.60	5.60	1.66	1.71	1.59	26.07	26.05	26.06
6	A-6	5.56	5.57	5.56	1.59	1.66	1.57	25.79	25.74	25.76
7	A-7	5.55	5.55	5.55	1.55	1.65	1.54	24.67	24.62	24.70
8	A-8	5.58	5.57	5.57	1.33	1.42	1.44	25.25	25.24	25.27
9	A-9	5.48	5.48	5.48	1.48	1.55	1.52	24.54	24.59	24.62
10	B-1	5.69	5.68	5.68	1.43	1.53	1.54	27.33	27.36	27.32
11	B-2	5.72	5.72	5.72	1.47	1.59	1.45	27.12	27.13	27.12
12	B-3	5.62	5.60	5.60	1.56	1.47	1.40	27.06	27.08	27.07
13	B-4	5.66	5.65	5.65	1.45	1.48	1.58	26.95	26.95	26.96
14	B-5	5.52	5.52	5.52	1.36	1.50	1.44	26.60	26.57	26.63
15	B-6	5.67	5.67	5.68	1.41	1.49	1.52	26.37	26.38	26.35
16	B-7	5.62	5.61	5.61	1.45	1.47	1.38	25.61	25.60	25.62
17	B-8	5.52	5.52	5.51	1.61	1.49	1.52	25.02	25.04	24.98
18	B-9	5.51	5.51	5.50	1.30	1.41	1.37	25.32	25.34	25.30
19	C-1	5.53	5.52	5.53	1.27	1.48	1.37	27.33	27.33	27.39
20	C-2	5.55	5.54	5.54	1.37	1.25	1.41	27.20	27.17	27.19
21	C-3	5.43	5.41	5.41	1.41	1.21	1.36	27.20	27.20	27.21
22	C-4	5.49	5.48	5.48	1.35	1.34	1.25	26.91	26.95	26.91
23	C-5	5.43	5.42	5.42	1.23	1.40	1.33	26.74	26.69	26.70
24	C-6	5.41	5.41	5.41	1.22	1.26	1.34	26.73	26.60	26.58
25	C-7	5.43	5.40	5.42	1.35	1.21	1.26	25.82	25.77	25.72
26	C-8	5.42	5.43	5.42	1.34	1.15	1.29	25.82	25.82	25.85
27	C-9	5.53	5.52	5.53	1.35	1.22	1.24	25.54	25.44	25.58

Nota: Elaboración propia

3.8.2. Resultado de las pruebas de sinterización en plata 925

- ❖ Las probetas compactadas en verde se proceden a sinterizar según la matriz de diseño y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 12 donde se muestra el porcentaje de porosidad en cada réplica que se realizó.

Tabla 12

Reporte de pruebas de sinterización de los polvos metalúrgicos en plata 925.

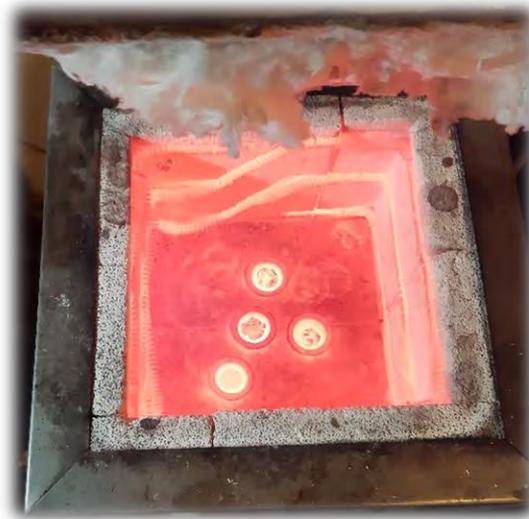
Numero de muestra	Clasificación de muestra	Porcentaje de porosidad		
		Replica N° 01	Replica N° 02	Replica N° 03
1	A-1	39.03%	43.58%	43.90%
2	A-2	42.40%	41.09%	39.38%
3	A-3	44.47%	41.06%	43.22%
4	A-4	40.29%	42.69%	40.35%
5	A-5	39.23%	40.92%	36.51%
6	A-6	35.63%	38.00%	34.66%
7	A-7	27.97%	32.06%	27.68%
8	A-8	19.44%	24.62%	25.84%
9	A-9	24.73%	28.42%	27.18%
10	B-1	34.78%	39.28%	39.50%
11	B-2	35.23%	40.16%	34.34%
12	B-3	39.77%	36.40%	33.17%
13	B-4	34.20%	35.65%	39.77%
14	B-5	29.77%	36.18%	33.82%
15	B-6	29.20%	33.05%	34.11%
16	B-7	27.65%	28.71%	24.18%
17	B-8	32.95%	27.66%	28.88%
18	B-9	19.06%	25.49%	23.21%
19	C-1	28.63%	38.87%	34.13%
20	C-2	32.96%	26.50%	34.93%
21	C-3	36.27%	26.01%	34.22%
22	C-4	31.25%	31.07%	25.88%
23	C-5	24.41%	33.47%	30.02%
24	C-6	24.02%	25.71%	30.04%
25	C-7	26.14%	17.73%	20.39%
26	C-8	25.72%	13.29%	23.02%
27	C-9	23.12%	14.41%	16.56%

Nota: Elaboración propia

- ❖ Las probetas se sinterizan en hornos a temperaturas entre 0.7Tm y 0.9Tm (el proceso de sinterización se desarrolló en el ítem 2.7.3) donde los átomos se difunden en los espacios vacíos (ver figura 40).

Figura 40.

Sinterización de las probetas verdes previamente compactadas.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

3.9. Pruebas de compactado y sinterizado de polvos metalúrgicos en plata 925 en diseños de matrices comerciales

Con los resultados obtenidos en las anteriores pruebas de compactado y sinterizado, se realizó las pruebas de elaboración de las **piezas de joyería en plata 925**, utilizando matrices preparadas con diseños comerciales de joyas para el mercado.

a) Equipos y herramientas

Equipos

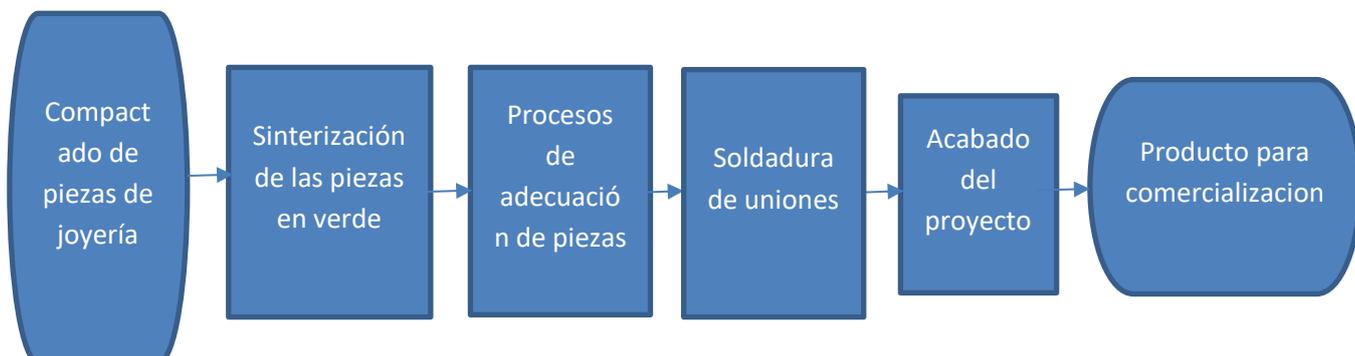
- Prensa hidráulica.
- Laminadora eléctrica de Joyería
- Horno eléctrico.

Herramientas y materiales

- Herramientas de joyería
- Reactivos
- Material polvo de plata y cobre
- EPP

➤ otros

b) Diagrama del proceso de elaboración de piezas de joyería y fabricación de joyas en plata 925



c) Compactado de piezas de joyería en plata 925 con diseños comerciales

Las pruebas de compactación fueron realizadas con polvos metalúrgicos en plata 925 con diseños comerciales (ver figura 41).

Figura 41.

Piezas de joyería en verde compactados a 07 toneladas de fuerza.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

d) Sinterizado de piezas de joyería en plata 925 con diseño comercial

Con los resultados de las pruebas de sinterizado, se usó la temperatura de 780°C, con un tiempo de 10 minutos. Siendo piezas de un volumen considerable, no se requiere una alta densidad (ver figura 42).

Figura 42.

Sinterizado de piezas de joyería a 780°C y 10 minutos.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

e) Procesos de adecuación y acabado de joyas en plata 925

En estos procesos se realiza el calado (ver figura 43), micro soldadura (ver figura 45), limado, lijado, y acabados; Hasta la obtención de piezas de joyería.

El proceso de soldadura se realizó con soldadura de aporte con una composición 70% Ag, 20%Cu, y 10%Zn. Durante el proceso se observó que la soldadura tiene una buena fluidez, en las pruebas manuales de tracción realizadas, se ve que hay una buena soldabilidad (ver figura 44).

Figura 43.

Proceso de calado de las piezas sinterizadas.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

Figura 44.

Formado de piezas en dijes y aretes.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

Figura 45.

Microsoldadura de uniones con aporte de material.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

Después de todas las etapas de acabados de joyería se logró obtener varias piezas de joyería terminadas y listas para su comercialización (ver figuras 46 y 47) se observar que tienen una buena apariencia.

Figura 46.

Juego de aretes y dije en plata 925 con diseño de la trilogía inca con cruz andina



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

Figura 47.

Dije en plata 925 con diseño de un ave precolombino.



Nota: Adaptado de Empresa Oro Inca

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción

El presente capítulo toma la técnica del diseño factorial de experimentos, al ser un método con fundamento estadístico de amplia difusión entre los investigadores.

- ✓ La experimentación activa – diseño de experimentos; se lleva a cabo, mediante un diseño establecido, que es un plan organizado de experimentos que permiten evaluar todas las variables consideradas y además evaluar la fuerza de interacción entre las variables y reducir el número de experimentos a llevarse a cabo (Walpole, Myers, & Myers, 1998).

4.2. Método, tipo y nivel de investigación

- Siendo el trabajo de carácter experimental el enfoque de la investigación es cuantitativo.
- El tipo de investigación para este trabajo es experimental, porque se experimentó y cambiando intencionalmente los valores de las variables independientes, hasta obtener parámetros adecuados a partir de las variables.
- El alcance de esta investigación es correlacional y descriptivo porque mediremos el grado de asociación que existe entre las variables, y sabremos cómo se comporta una variable al conocer el comportamiento de las otras variables vinculadas a ella.

4.3. Universo y muestra

Universo: las muestras de polvo de plata y cobre.

Muestra: los polvos metalúrgicos de plata retenidos en la malla +150 y los polvos metalúrgicos de cobre pasantes a la malla -200. haciéndose una mezcla de polvos metalúrgicos de plata y cobre, en una proporción de; 92.5% de plata y 7.5% de cobre.

4.4. Técnica e instrumento de recolección de datos

4.4.1. Técnica

- Lectura visual de los equipos
- Ensayos experimentales
- Análisis de la composición química de los metales en polvo
- Apuntes diarios de los experimentos

4.4.2. Instrumentos de recolección de datos

- Equipo de rayos x portátil, para análisis químico.
- Guía de observación de laboratorio

4.4.3. Materiales e insumos

- Polvo metalúrgico de plata
- Polvo metalúrgico de cobre
- Pinzas
- Recipientes de enfriamiento
- Elementos de protección personal (EPP)
- Aglomerantes
- Otros.

4.5. Análisis de las pruebas con diseño factorial 3^3

Se usa como herramienta el diseño factorial 3^3 , que estudia el efecto de tres factores en tres niveles cada uno, con respecto a las respuestas; es decir, se busca estudiar la relación entre los factores y las respuestas. Este estudio consta de $3*3*3 = 27$, tratamientos diferentes o punto de diseño.

$$n^k = 27$$

$$3^3 = 27$$

Donde:

$k = 3$: niveles de pruebas.

$n = 3$: factores o número de variables.

27 : número de experimentos o corridas.

Para el mejor entendimiento del diseño, es conveniente definir:

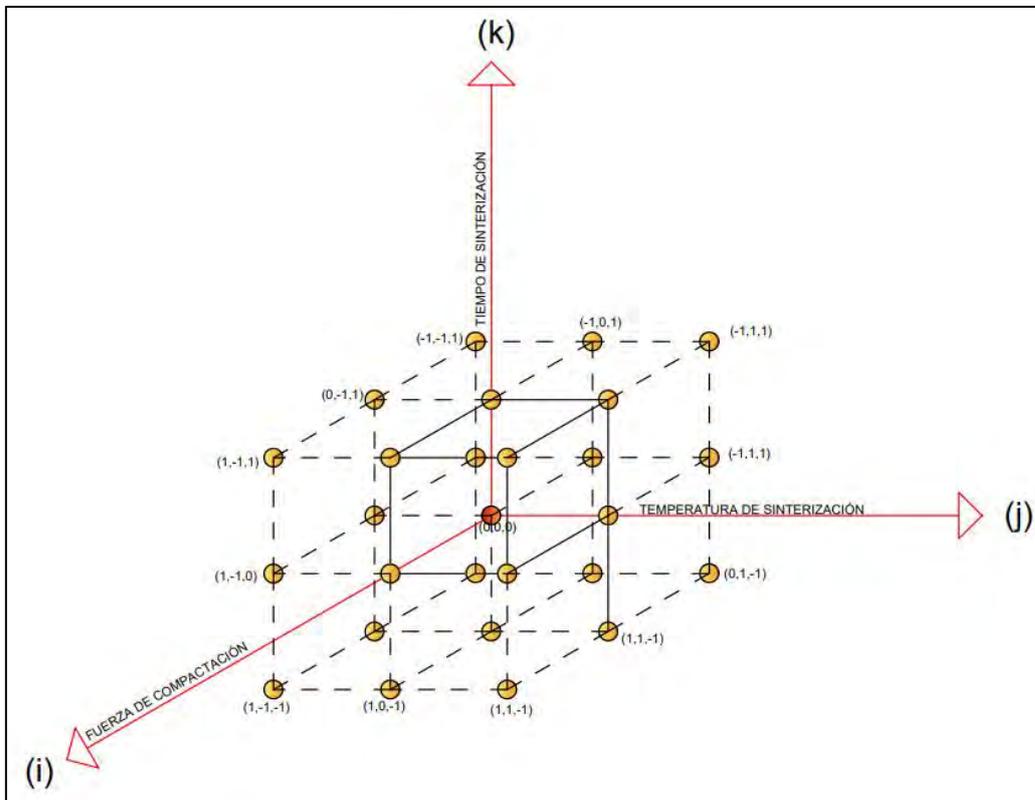
- ✓ Los **niveles** de un factor; son los distintos valores asignados a un factor en un experimento, es decir el grado de intensidad de un factor.
- ✓ La **combinación** de tratamiento; es el conjunto de todos los factores empleados en una experiencia determinada, siendo una combinación específica cualesquiera de niveles de factor.
- ✓ La **respuesta**; es el resultado numérico de una experiencia, que viene a ser la variable dependiente.
- ✓ El **efecto** de un factor; es la variación en la respuesta, producida por un cambio en el nivel del factor, solo en dos niveles; siendo simplemente la diferencia entre el promedio de las respuestas de todas las experiencias en el nivel superior menos el promedio en el nivel inferior.
- ✓ La **interacción**; es la respuesta diferencial a un factor en combinación en niveles variables de un segundo factor aplicado simultáneamente; la interacción es el efecto adicional o conjunto, debido a la influencia combinada de dos o más factores.
- ✓ La **unidad experimental**; es la unidad básica sobre la cual se aplica un tratamiento dado o combinación de tratamientos.
- ✓ El **error experimental**; es la diferencia entre dos respuestas cuando dos unidades experimentales idénticas reciben el mismo tratamiento y combinación de tratamiento, con respuestas o mediciones diferentes entre sí.

Los niveles de prueba para cada factor en unidades originales y unidades codificadas, se muestra en la siguiente tabla:

Representación geométrica de factorial 3x3x3

Figura 48.

Representación geométrica del diseño factorial 3x3x3.



Nota: Elaboración propia en el software AutoCAD.

Tabla 13.

Niveles de prueba según codificaciones originales y codificadas.

Factor	Unidades Originales			Unidades Codificadas		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
A: fuerza de compactación (ton)	3	5	7	-1	0	1
B: temperatura de sinterización (C°)	720	780	840	-1	0	1
C: tiempo de sinterización (min)	5	10	15	-1	0	1

Nota: Elaboración propia

DISEÑO DEL EXPERIMENTO: tres factores, con tres niveles cada uno, según la siguiente descripción:

FACTORES	NIVELES
1. Fuerza de compactación	a ₁ : 3.00 toneladas - fuerza a ₂ : 5:00 toneladas - fuerza a ₃ : 7:00 toneladas - fuerza
2. Temperatura de sinterización	b ₁ : 720° grados Celsius b ₂ : 780° grados Celsius b ₃ : 840° grados Celsius
3. Tiempo de sinterización	c ₁ : 5:00 minutos c ₂ : 10:00 minutos c ₃ : 15:00 minuto

Los niveles de los factores se escogieron por las siguientes razones;

- Las fuerzas de compactación de (3, 5 y 7) toneladas se escogieron porque a esta fuerza de compactación se obtienen porcentajes de porosidad superiores a 5% y menores a 20% (ítems 2.8).
- Las temperaturas de (720, 780 y 840) °C se escogieron porque, 720°C está por debajo de la temperatura eutéctica, 780°C es la temperatura eutéctica y 840°C esta por encima de la temperatura eutéctica y por debajo de la temperatura de fusión (figura 4), y estos valores se encuentran entre 0.5T_m y 0.9T_m (ítems 2.7.3).
- Los tiempos de (5, 10 y 15) minutos se escogieron de acorde al tiempo de sinterización de los metales y aleaciones.

Las combinaciones según la tabla N° 14 según unidades originales y la tabla

N° 12, con los resultados de nuestro experimento se construye el siguiente cuadro:

Tabla 14.

Resultado de porcentaje de porosidad según codificaciones y clasificación de muestra.

Clasificación de muestra	A-1									A-2									A-3								
	B-1			B-2			B-3			B-1			B-2			B-3			B-1			B-2			B-3		
C-1	39.03	43.58	43.90	40.29	42.69	40.35	27.97	32.06	27.68	34.78	39.28	39.50	34.20	35.65	39.77	27.65	28.71	24.18	28.63	38.87	34.13	31.25	31.07	25.88	26.14	17.73	20.39
C-2	42.40	41.09	39.38	39.23	40.92	36.51	19.44	24.62	25.84	35.23	40.16	34.34	29.77	36.18	33.82	32.95	27.66	28.88	32.96	26.50	34.93	24.41	33.47	30.02	25.72	13.29	23.02
C-3	44.47	41.06	43.22	35.63	38.00	34.66	24.73	28.42	27.18	39.77	36.40	33.17	29.20	33.05	34.11	19.06	25.49	23.21	36.27	26.01	34.22	24.02	25.71	30.04	23.12	14.41	16.56

Nota: Elaboración propia en el Software Excel.

Con estos resultados se procede al análisis de variaciones (ANOVA) de acuerdo a la tabla N° 2 para diseño factorial de 3x3x3, para lo cual se procesan los resultados en el software Minitab que se muestran en la tabla 15 y en Excel que se muestran en la tabla 16, donde se hace un consolidado de datos el cual concuerdan con el software Minitab, como se ven en dichas tablas.

Tabla 15

Resultado de procesamiento de datos ANOVA para el diseño factorial 3³.

Información del factor en software Minitab

Factor	Niveles Valores
FUERZA DE COMPACTACIÓN	3 3; 5; 7
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	3 720; 780; 840
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	3 5; 10; 15

Análisis de Varianza

Fuente	GL
Modelo	26
Lineal	6
FUERZA DE COMPACTACIÓN	2
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	2
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	2
Interacciones de 2 términos	12
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	4
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	4
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	4
Interacciones de 3 términos	8
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	8
Error	54
Total	80
Fuente	SC Ajust.
Modelo	3774.14
Lineal	3542.84
FUERZA DE COMPACTACIÓN	1049.39
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	2390.82
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	102.63
Interacciones de 2 términos	149.95
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	78.52
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	34.57
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	36.86
Interacciones de 3 términos	81.35
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	81.35
Error	635.31
Total	4409.44
Fuente	MC Ajust.
Modelo	145.16
Lineal	590.47
FUERZA DE COMPACTACIÓN	524.69
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	1195.41
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	51.32
Interacciones de 2 términos	12.50
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	19.63
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	8.64
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	9.21
Interacciones de 3 términos	10.17
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	10.17
Error	11.76
Total	
Fuente	Valor F

Modelo	12.34
Lineal	50.19
FUERZA DE COMPACTACIÓN	44.60
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	101.61
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	4.36
Interacciones de 2 términos	1.06
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	1.67
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.73
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.78
Interacciones de 3 términos	0.86
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.86
Error	
Total	
Fuente	Valor p
Modelo	0.000
Lineal	0.000
FUERZA DE COMPACTACIÓN	0.000
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	0.000
TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.018
Interacciones de 2 términos	0.409
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN	0.171
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.572
TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.541
Interacciones de 3 términos	0.552
FUERZA DE COMPACTACIÓN*TEMPERATURA DE SINTERIZACIÓN*TIEMPO DE SINTERIZACIÓN	0.552
Error	
Total	

Nota: Elaboración propia en el Software Minitab.

Donde:

FV: fuente de variación, SC: sumatoria de cuadrados, GL: grados de libertad, CM: cuadrados medios, F_0 : es la estadística de prueba usada para determinar si al modelo le están faltando los términos de orden superior que incluyan los predictores en el modelo actual, F crítica: es la estadística de prueba usada para determinar si el término está asociado con la respuesta, Valor – P: es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula.

Tabla 16.

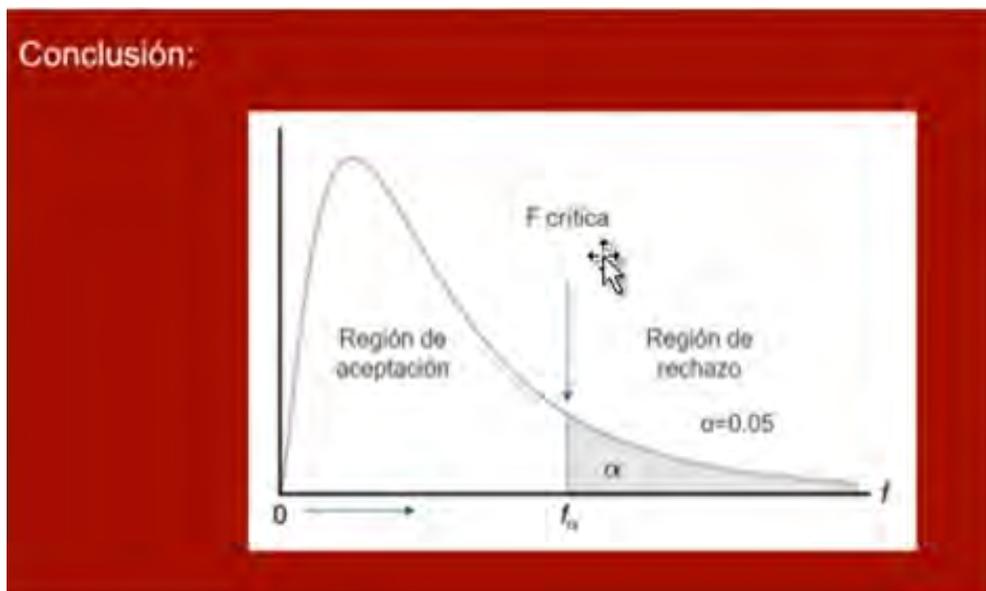
Resultado de procesamiento de datos ANOVA para el diseño factorial 3^3 .

FV	SC	GL	CM	Fo	F critica	Valor - P
Efecto A	1,049.39	2	524.69	44.598	3.16824597	3.66838E-12
Efecto B	2,390.82	2	1195.41	101.608	3.16824597	4.97281E-19
Efecto C	102.63	2	51.32	4.362	3.16824597	0.017540021
Efecto AB	78.52	4	19.63	1.669	2.54291753	0.170714616
Efecto AC	34.57	4	8.64	0.734	2.54291753	0.572469552
Efecto BC	36.86	4	9.21	0.783	2.54291753	0.541071478
Efecto ABC	81.35	8	10.17	0.864	2.11522328	0.551905826
Error	635.31	54	11.76			
Total	4,409.44	80				

Nota: Elaboración propia en el Software Excel.

Figura 49.

Representación gráfica del modelo lineal de análisis de varianza.



Nota: Adaptado de <https://www.google.com/search?q=graficos+para+análisis+de+varianza>.

De acuerdo a la tabla 17 según el análisis de varianzas (ANOVA) para diseño factorial 3^3 , se construye la siguiente tabla de aceptación y rechazo con la figura N° 49 donde se analiza los efectos en cada factor de la siguiente manera:

Tabla 17.

Resultado de análisis de efectos de datos ANOVA para el diseño factorial 3³.

FV	SC	GL	CM	Fo	F crítica	Valor - P	análisis de efectos
Efecto A	1,049.39	2	524.69	44.598	3.16824597	3.66838E-12	se rechaza
Efecto B	2,390.82	2	1195.41	101.608	3.16824597	4.97281E-19	se rechaza
Efecto C	102.63	2	51.32	4.362	3.16824597	0.017540021	se rechaza
Efecto AB	78.52	4	19.63	1.669	2.54291753	0.170714616	se acepta
Efecto AC	34.57	4	8.64	0.734	2.54291753	0.572469552	se acepta
Efecto BC	36.86	4	9.21	0.783	2.54291753	0.541071478	se acepta
Efecto ABC	81.35	8	10.17	0.864	2.11522328	0.551905826	se acepta
Error	635.31	54	11.76				
Total	4,409.44	80					

Nota: Elaboración propia en el Software Excel.

Para un mejor análisis de los resultados se debe interpretar el efecto de las variables con respecto al porcentaje de porosidad.

Resumen de análisis de varianza en Excel.

Tabla 18.

Análisis estadístico de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0.0868	0.029	11.398	8.84042E-05
Residuos	23	0.0584	0.003		
Total	26	0.1451			

Nota: Elaboración propia en el Software Excel.

Tabla 19.

Análisis estadístico de varianza y ecuación de regresión.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	1.135111311	0.14832714	7.65275543	9.10529E-08	0.82827325	1.44194937	0.82827325	1.44194937
Variable X 1	-0.016804722	0.00593677	-2.83061779	9.47801E-03	-0.02908586	-0.00452358	-0.02908586	-0.00452358
Variable X 2	-0.000883398	0.00018107	-4.87877180	6.30174E-05	-0.00125797	-0.00050883	-0.00125797	-0.00050883
Variable X 3	-0.003662889	0.00237471	-1.54245907	1.36610E-01	-0.00857535	0.00124957	-0.00857535	0.00124957

Nota: Elaboración propia en el Software Excel.

A partir del análisis de varianza del diseño factorial (tabla 18.) donde se acepta y rechaza el efecto de las variables se hace el análisis estadístico de varianza y ecuación de regresión (tabla 19.), donde se interpreta la ecuación a partir de los resultados de la (tabla 12.) a partir de los porcentajes de porosidad, donde se tiene la ecuación 4-2:

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 \quad \text{ecuación (4-1)}$$

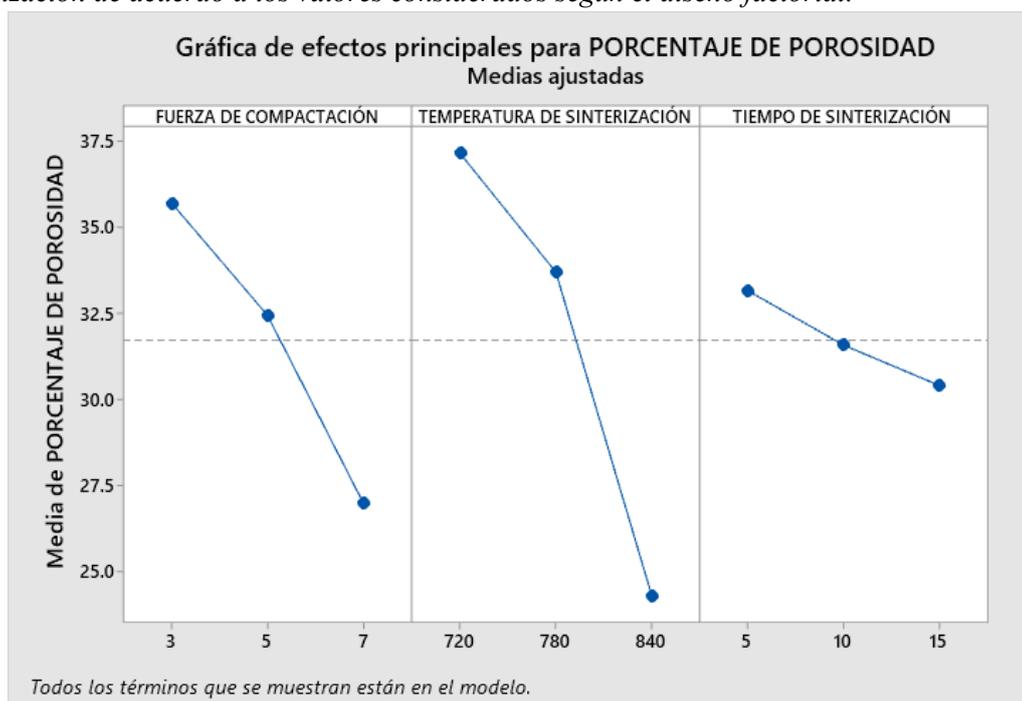
$$Y = 1.13511 - 0.01680X_1 - 0.00088X_2 - 0.00366X_3 \quad \text{ecuación (4-2)}$$

La ecuación 4-2, es el resultado de la interpretación de los resultados del análisis de varianza de los resultados de compactación y sinterización donde X_1 es la fuerza de compactación, X_2 es la temperatura de sinterización y X_3 el tiempo de sinterización.

4.1.1. Interpretación del efecto de la compactación

Figura 50.

Representación gráfica de la fuerza de compactación, temperatura de sinterización y tiempo de sinterización de acuerdo a los valores considerados según el diseño factorial.

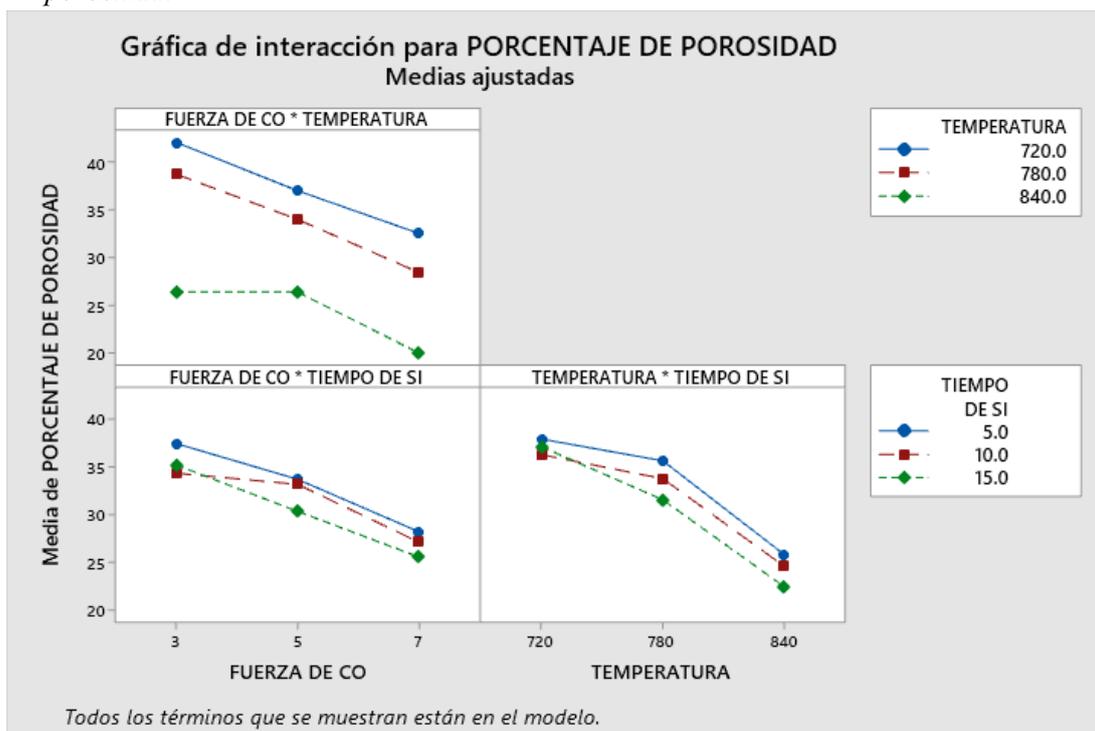


Nota: Elaboración propia en el software Minitap.

- La compactación se desarrolló a tres fuerzas distintas según matriz de diseño los cuales se tomó a 3.00 toneladas, 5.00 toneladas y 7.00 toneladas.
- Conforme se incrementa la fuerza de compactación disminuye el porcentaje de porosidad (ver figura 50).

Figura 51.

Comportamiento de las variables a tres niveles diferentes con respecto al porcentaje de porosidad.



Nota: Elaboración propia en el software Minitap.

4.1.2. Interpretación del efecto de la temperatura de sinterización

- En el diagrama de fases cobre – plata (figura 3) se aprecia que por encima de la temperatura eutéctica de 780°C entre 7.90% de plata a 92.00% de plata donde la plata se encuentra en dos fases solido-liquido ($\beta + L$). Por los cuales se escogió las temperaturas de 720°C, 780°C y 840°C, tomando en consideración que la aleación de plata con contenido de 92.50% plata y 7.5% de cobre se funde aproximadamente a 893°C.
- A 720°C la aleación de plata - cobre tendrá lugar la difusión de la red a través de vacantes, difusión a través de los límites de grano, por cizallamiento en los límites de granos y por recristianización. Teniendo en consideración que el material sigue en estado sólido ($\alpha + \beta$).

- A 780°C la aleación de plata 925 tendrá lugar la difusión a través de los límites de grano, a través de vacantes, por recristianización por cizallamiento de los límites de grano y fluencia plástica. Teniéndose en consideración que el material se encuentra en dos fases ($\beta + L$) plata parcialmente líquida y granos de plata - cobre sólido.
- A 840°C la aleación de plata 925 tendrán lugar la difusión de átomos a través de los límites de grano, por vacantes, por recristianización, incrementándose la fluencia plástica conforme incrementa la temperatura. Considerándose que el material se encuentra en dos fases ($\beta + L$) plata parcialmente líquida y granos de plata - cobre sólido. A comparación de 780°C a 840°C se tiene más plata en forma líquida.
- En la figura 50 podemos ver que conforme la temperatura de sinterización es inversamente proporcional al porcentaje de porosidad.

4.1.3. Interpretación del efecto del tiempo de sinterización

- De acuerdo al diseño de matriz se tiene los resultados a tres niveles de tiempo que son (5,10 y 15) minutos, para la sinterización, sin considerar tiempo de la etapa de precalentamiento y enfriamiento (figura 22).
- A cada temperatura distinta, se observa que el tiempo de sinterización es directamente proporcional a la densidad del material e inversamente proporcional a la porosidad (ver figura 50).
- Si comparamos los factores como la fuerza de compactación, temperatura de sinterización y tiempo de sinterización con respecto al resultado que es el porcentaje de porosidad (ver figura 51), se observa que la fuerza de compactación, la temperatura de sinterización, tiempo de sinterización es inversamente proporcional al porcentaje de porosidad.

4.1.4. Interpretación del estudio metalográfico de las probetas sinterizadas de Ag-Cu

Las probetas tienen una aleación sinterizada a base de Ag 92.5% y Cu 7.5%, se utilizó microscopio del laboratorio de Metalurgia Física para el estudio, a una medida de 100X de aumento.

Las probetas fueron desbastadas en papel esmeril N° 400 y 600, luego pulidas en alúmina de 1µm por un tiempo de 3 min.

No se atacaron químicamente las probetas observándose al microscopio solo en estado pulido.

- ✓ Se muestran granos de plata con cobre (Ag-Cu) color oscuro en una matriz de plata (Ag) color blanco.
- ✓ Las probetas que fueron compactadas con presiones de 7 ton. Tienen mayor compactación, menor porosidad y mayor densidad, que las probetas que fueron compactadas a 5 ton y 3 ton.
- ✓ Se observa que las probetas sinterizadas a temperatura mayor a (840 °C), muestran mayor deformación, presentando hendiduras en la superficie.

CONCLUSIONES

- Es factible obtener piezas de joyería en plata 925 a partir de polvos metalúrgicos por compactación – sinterización donde la fuerza de compactación, temperatura y tiempo de sinterización son inversamente proporcional al porcentaje de porosidad.
- La fuerza de compactación es inversamente proporcional a la porosidad, por lo que la más adecuada es a 5 ton-f, lo cual depende del tipo y calidad de joya que se quiera fabricar (voluminosas y ligeras) o (compactas y densas).
- La temperatura adecuada de sinterización es de 780 °C, dado que al porcentaje de 92.5% de plata y 7.5% de cobre, la aleación se encuentra en fase sólido β y los granos de Cu-Ag en la matriz de plata (β) son de tamaño pequeño y están distribuidos homogéneamente, además que no se observa deformación superficial en las muestras de estudio a comparación de las muestras sinterizadas a 840 °C, si se baja la temperatura a 720 °C requerirá más tiempo de sinterización lo cual incrementa el consumo de energía, tiempo y mano de obra.
- El tiempo óptimo de sinterización es de 10 a 15 minutos, dado que el tiempo y el costo es inversamente proporcional al porcentaje de porosidad.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de pre factibilidad para la instalación de una planta de fabricación de joyas por el método de compactación - sinterización de polvos metalúrgicos en aleación de plata 925.
- Se aconseja la fabricación piezas de joyería por este método, con porosidades y peso controlado.
- Investigar el compactado de los polvos metalúrgicos a granulometrías diferentes.
- Se sugiere investigar con polvos metalúrgicos de aleaciones de plata diferentes a la aleación 925.
- Se recomienda investigar a tiempos prolongados de sinterización y baja compactación.
- Se debe hacer estudios del proceso de sinterización incluyendo el precalentamiento, sinterización y enfriamiento, de forma continua, en un horno con atmósfera controlada para evitar la oxidación de los materiales.
- Se sugiere realizar pruebas de recubrimientos metálicos en rodio para mejorar el aspecto físico superficial de las joyas sinterizadas.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

1. Askeland R.D., (2017). Ciencia e ingeniería de materiales. (7ma. ed.). México, D.F.
2. Calderón C.J., (2008). Sinterización y estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ para la fabricación de cojinetes auto lubricados. Tesis de doctorado. Lima, Perú.
3. CEPECT., (1987). Geología, minería y metalurgia del oro. Grafotécnica Editores E Impresiones S.R.L. Lima, Perú.
4. Codina, C., (2004). Orfebrería. Parramón Ediciones S.A. España.
5. De La Valle, Carcedo, (2001). Colección APU CA; Lima, Perú.
6. Groover, M. P., (2014). Introducción a los procesos de manufactura. (2da. ed.). México, D.F.
7. Hernández, S. R., (2010). Metodología de la investigación. (5a. ed.). México, D.F.
8. INDECOPI., (2013). Norma técnica peruana para productos de joyería y orfebrería artesanal elaborado en metales preciosos, hechos a mano. (2da. ed.). Lima, Perú.
9. Lean, G. Mc., (1991). Professional goldsmithing a contemporary guide to traditional jewelry techniques. USA.
10. Marroquin A.J., (2008). Instalación de una planta industrial de joyería en el departamento de cusco (proyecto de pre - factibilidad). Tesis de pre – grado. Cusco – Perú.
11. Misari, F.S., (2010). Metalurgia del oro. Editorial San Marcos. Lima, Perú.
12. Reed Hill, R. E., (1980). Principios de metalurgia física. (2da. ed.). México, D.F.
13. Schey, J. A., (2002). Procesos de manufactura. (3ra. ed.). México, D.F.
14. Segovia H.M., (2010). Refinación del oro a partir de precipitados electrolíticos. Seminario de tesis. Cusco, Perú.
15. Vargas, G.J., (1992). Metalurgia del oro y la plata. Editorial San Marcos. Lima, Perú.
16. Vetter P.L., (2006). Oro del Perú antiguo. Lima, Perú.

Tesis

1. Tesis “ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROCESO DE SINTERIZACIÓN DE ALEACIONES DE ORO – PLATA” tesis de pregrado; Gina C. Aguilar Palomino, Colombia, 2008.
2. Tesis “SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN 92CU8ZN1ZN (C10H35O2)2 PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTO LUBRICADOS” tesis de doctorado; Julia M. Calderón Celis, Lima, 2008.
3. Tesis "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA RICO EN 80% DE COBRE, ALEADO CON ZINC Y ESTEARATO DE ZINC PARA EVALUAR LA DUREZA Y EL DESGASTE VÍA LA PULVIMETALURGIA" tesis de pregrado; Ángel J. Huanacuni Quelcahuanca, Arequipa, 2015.
4. Tesis “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS CERMETS BASE MULLITA REFORZADOS CON NANOPARTÍCULAS DE PLATA” tesis para doctorado; Mercedes G. Téllez Arias, México, 2019.

Páginas de internet

1. <http://www.precolombino.cl/recursos-educativos/tecnologias-precolombinas/metalurgia/>
2. http://notigrafix.com/?attachment_id=6608.
3. <http://notigrafix.com/sinterizacion-de-polvos-metalurgicos>.
4. https://www.promusica.es/88364-large_default/altus-1019se.jpg
5. <https://www.pinterest.com/pin/659355201666629576/?lp=true>
6. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/126/12653600006/html/index.html>
7. <https://www.google.com/search?q=graficos+para+ analisis+de+varianza>.
8. https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/2e._ analisis _de _varianza _de _disenos _experimentales-multifactorial.pdf

ANEXOS

Anexo - A

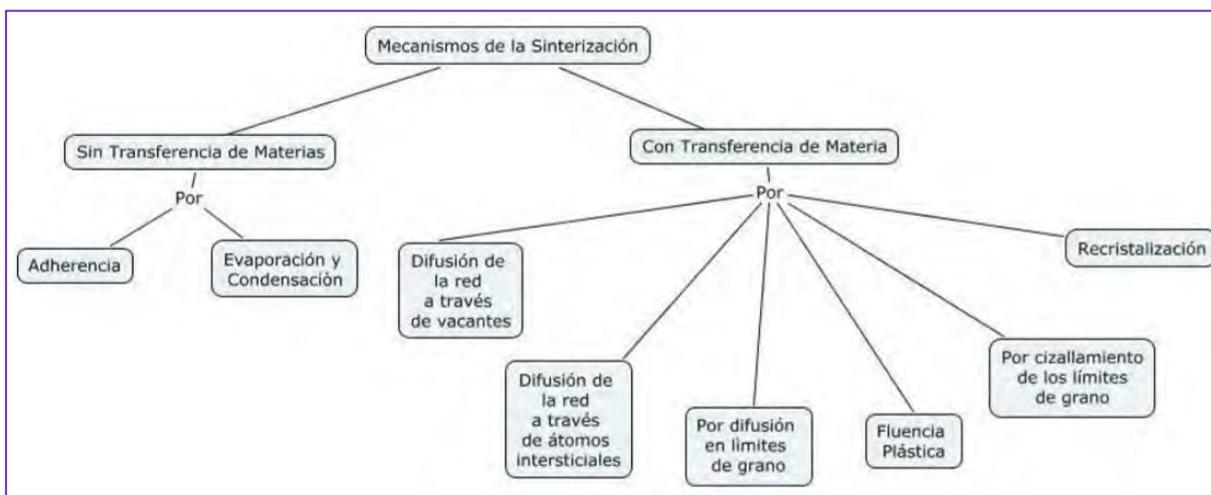


Figura A-1 mecanismos de sinterización. Adaptado de Calderón Celis Julia M. Sinterización y estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación 92Cu8Zn1Zn(C10H35O2)2 para la fabricación de cojinetes auto lubricados. Tesis de doctorado.

Name	Composition	Density	Melting point
	Ag – Cu	(g/cm ³)	(°C)
Fine silver	1000 -	10.49	961.00
Sterling silver	925 75	10.40	893.00
Coin silver	900 100	10.30	875.00
European silver	800 200	10.20	819.40

Figura A-2 tabla de propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de plata. Adaptado de Lean, G. Mc., (1991). Professional Goldsmithing a contemporary guide to traditional jewelry techniques. USA, pg. 207

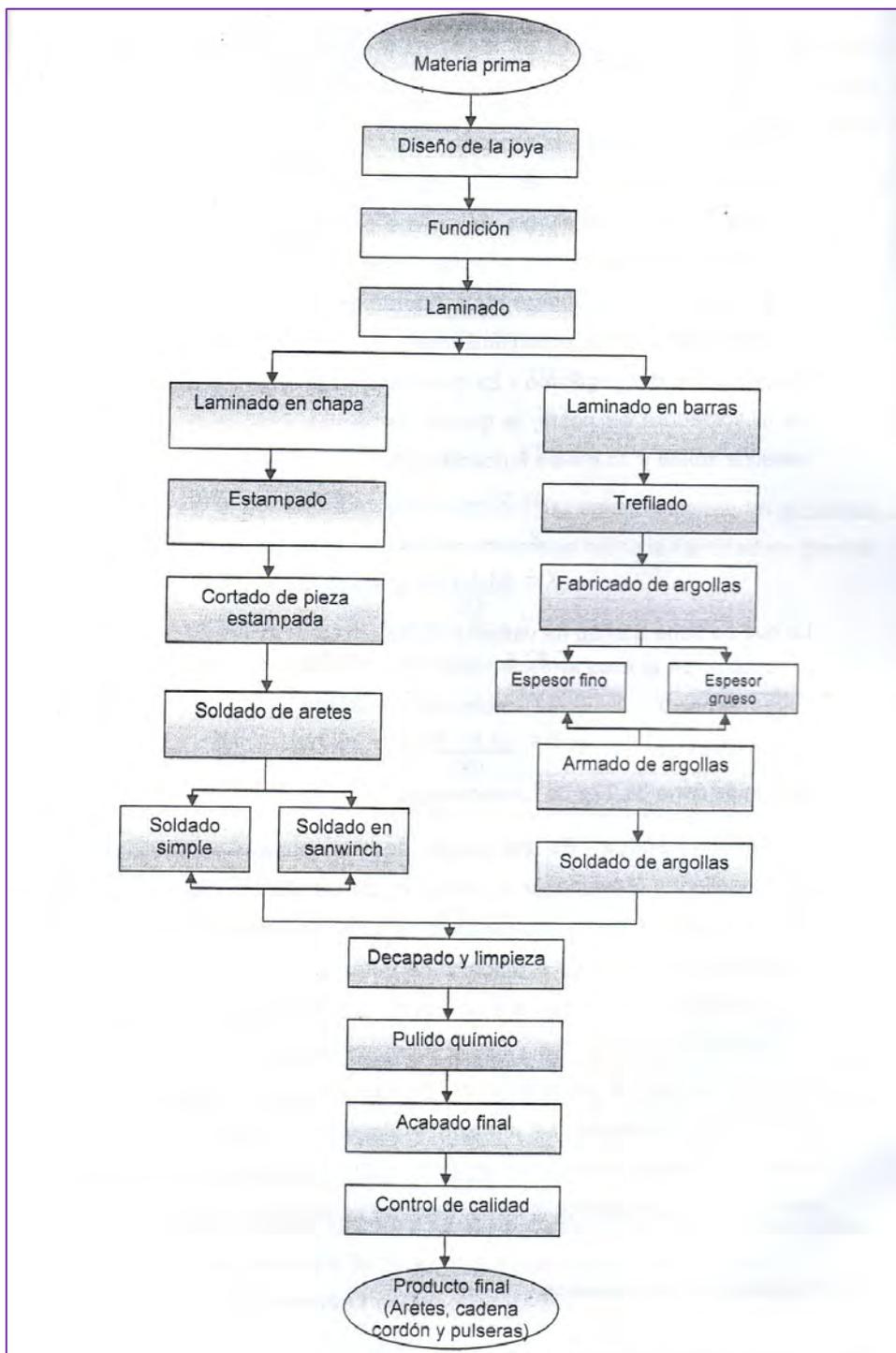


Figura A-3 diagrama del proceso de fabricación de una joya. Adaptado de Angles Marroquin Jessika D, instalación de una planta industrial de joyería en el departamento de cusco (proyecto de pre - factibilidad). Tesis de pre - grado

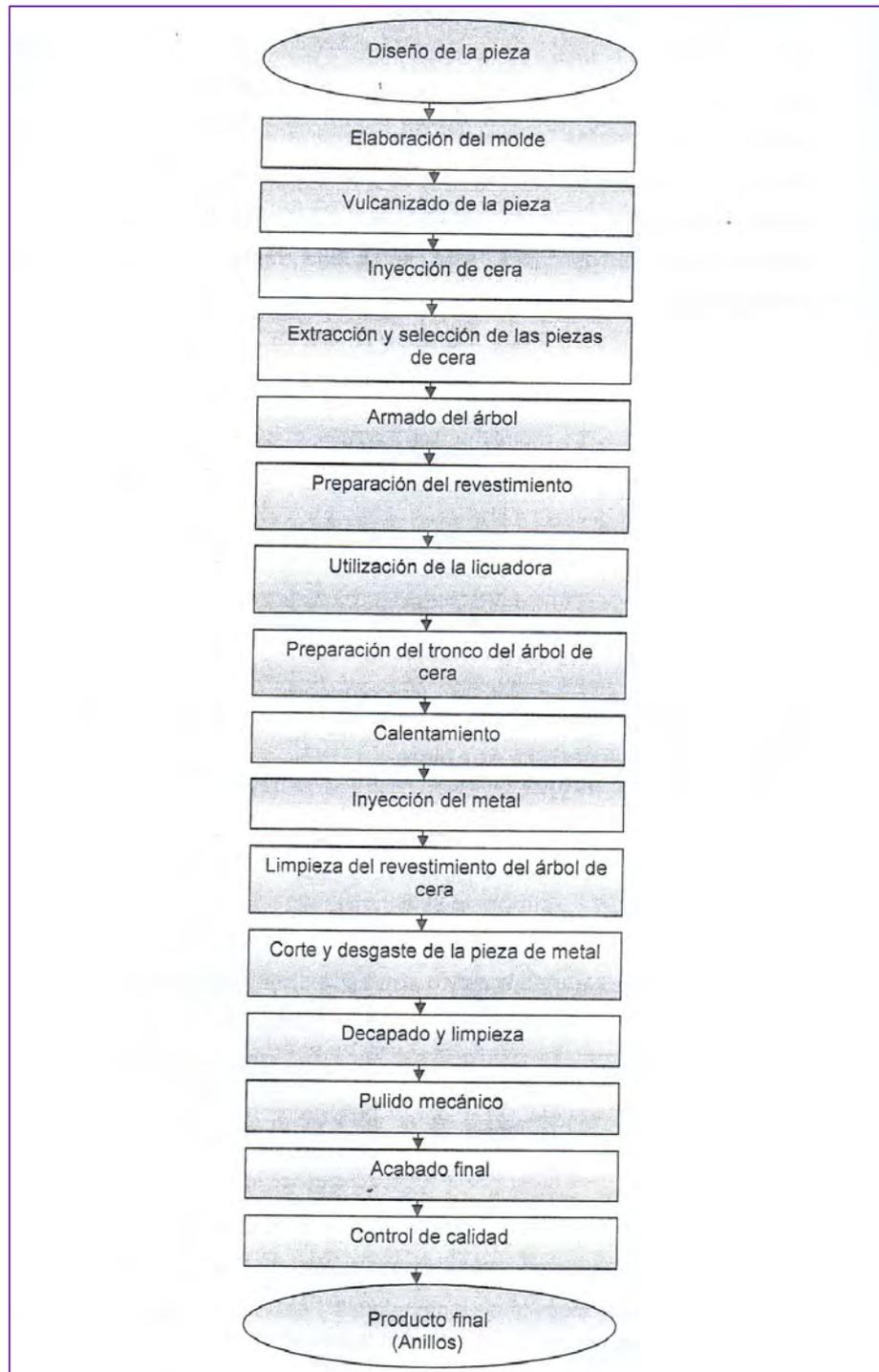


Figura A-4 diagrama del proceso de fabricación de una joya a la cera perdida.

Adaptado de Angles Marroquin Jessika D, instalación de una planta industrial de joyería en el departamento de cusco (proyecto de pre - factibilidad). Tesis de pre – grado

S10		Página		1	
Presupuesto					
Presupuesto	1101002	FABRICACION DE JOYAS POR METODO ARTESANAL - MANUAL			
Subpresupuesto	001	FABRICACION DE JOYAS POR FUNDICION Y LAMINADO			
Cliente	S10 S.A.C.	Costo al		04/02/2021	
Lugar	CUSCO - CUSCO - CUSCO				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	FABRICACION DE JOYAS POR METODO ARTESANAL - MANUAL				87.51
01.01	DISEÑO DE PIEZAS DE JOYERIA	und	1.00	3.07	3.07
01.02	FUNDICION	kg	1.00	15.28	15.28
01.03	LAMINADO	pza	1.00	9.36	9.36
01.04	TRAFILADO	pza	1.00	9.36	9.36
01.05	FABRICACION DE PIEZAS	pza	1.00	1.07	1.07
01.06	ARMADO DE PIEZAS	pza	1.00	15.52	15.52
01.07	MICROSOLDADURA	gib	1.00	8.04	8.04
01.08	DECAPADO, LIMPIEZA Y PULIDO MECANICO	und	1.00	8.66	8.66
01.09	PULIDO QUIMICO	pza	1.00	7.65	7.65
01.10	ACABADO FINAL	und	1.00	4.83	4.83
01.11	CONTROL DE CALIDAD	und	1.00	4.67	4.67
	Costo Directo				87.51
	SON : OCHENTISIETE Y 51/100 NUEVOS SOLES				

Figura A-5 presupuesto para elaboración de joyas por el método artesanal – manual.

Nota: Elaboración propia en el software S10.

S10		Página		1	
Presupuesto					
Presupuesto	1101001	FUNDICION A LA CERA PERDIDA			
Subpresupuesto	001	FUNDICION A LA CERA PERDIDA			
Cliente	S10 S.A.C.	Costo al		30/01/2021	
Lugar	CUSCO - CUSCO - CUSCO				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	FUNDICION A LA CERA PERDIDA				86.46
01.01	DISEÑO DE PIEZAS DE JOYERIA	und	1.00	3.00	3.00
01.02	ELABRACION DE MATRIZ	und	1.00	4.41	4.41
01.03	VULCANIZADO DE PIEZAS	und	1.00	2.91	2.91
01.04	INYECCION DE CERA	und	1.00	2.64	2.64
01.05	EXTRACCION Y SELECCION DE PIEZAS DE CERA	und	1.00	1.38	1.38
01.06	ARMADO DE ARBOL DE CERA	und	1.00	2.95	2.95
01.07	PREPARACION DE REVESTIMIENTOS	und	1.00	8.48	8.48
01.08	PREPARACION DEL TRONCO DE ARBOL DE CERA	und	1.00	4.94	4.94
01.09	CALENTAMIENTO DEL MOLDE	und	1.00	9.02	9.02
01.10	INYECCION DEL METAL	gib	1.00	36.54	36.54
01.11	LIMPIEZA DEL REVESTIMIENTO DEL ARBOL DE CERA	gib	1.00	0.83	0.83
01.12	CORTE Y DESGASTE DE PIEZAS DE METAL	gib	1.00	1.65	1.65
01.13	DECAPADO, LIMPIEZA Y PULIDO MECANICO	und	1.00	4.25	4.25
01.14	ACABADO FINAL	und	1.00	1.53	1.53
01.15	CONTROL DE CALIDAD	und	1.00	1.93	1.93
	Costo Directo				86.46
	SON : OCHENTISEIS Y 46/100 NUEVOS SOLES				

Figura A-6 presupuesto para elaboración de joyas por el método de fundición a la

cera perdida. Nota: Elaboración propia en el software S10.

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	FABRICACION DE JOYAS POR COMPACTACION - SINTERIZACION				73.89
01.01	DISEÑO DE PIEZAS DE JOYERIA	und	1.00	5.07	5.07
01.02	PREPARACION DE POLVOS METALURGICOS	gib	1.00	35.09	35.09
01.03	COMPACTACION DE POLVOS METALURGICOS	gib	1.00	7.04	7.04
01.04	SINTERIZACION	gib	1.00	15.44	15.44
01.05	DECAPADO, LIMPIEZA Y PULIDO MECANICO	und	1.00	4.50	4.50
01.06	ACABADO FINAL	und	1.00	3.03	3.03
01.07	CONTROL DE CALIDAD	und	1.00	3.72	3.72
	Costo Directo				73.89
SON : SETENTITRES Y 89/100 NUEVOS SOLES					

Figura A-7 presupuesto para elaboración de joyas por el método de compactación – sinterización. Nota: Elaboración propia en el software S10.

Anexo - B

Trabajos de laboratorio



Figura B-1 equipo de rayos X, que mide el % de metal presente en las muestras.
Adaptado de Empresa Oro Inca

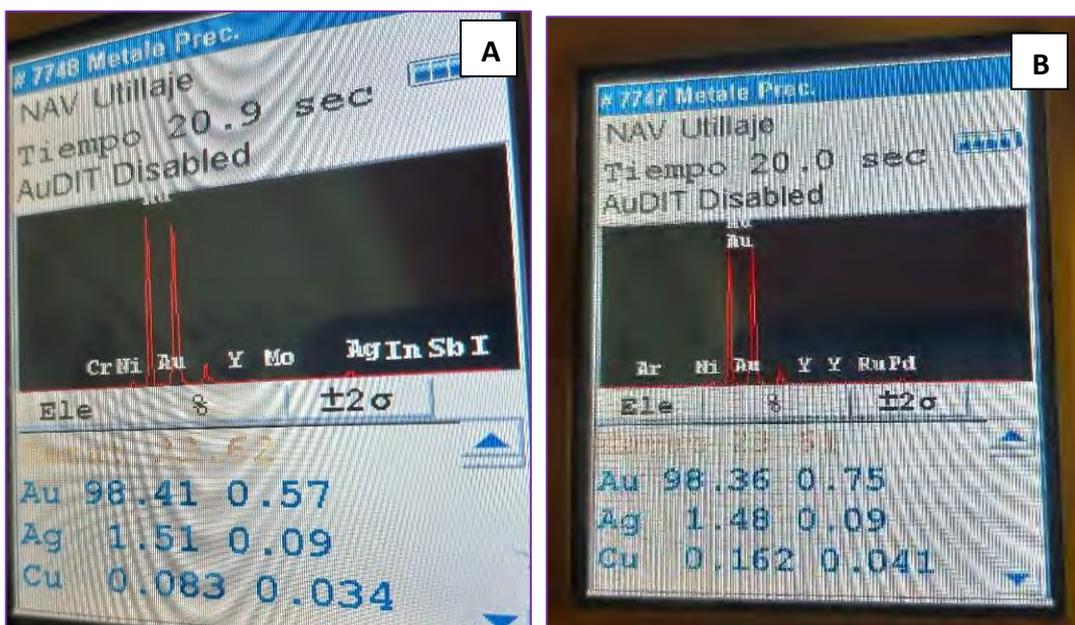


Figura B-2 resultado del análisis de rayos X, lingote de oro refinado, que fue obtenido de la recuperación de los residuos de producción de joyería. Adaptado de Empresa Oro Inca

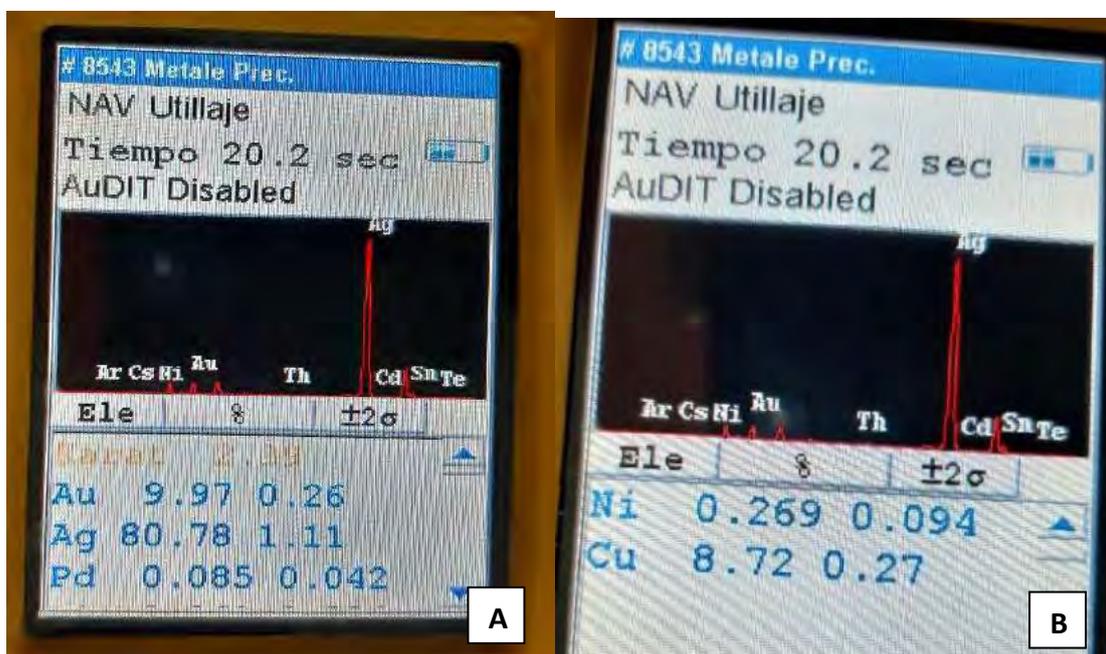


Figura B-3 resultado del análisis de rayos X, del lingote dore, que fue obtenido de la recuperación de los residuos de producción de joyería en oro y plata. Adaptado de Empresa Oro Inca

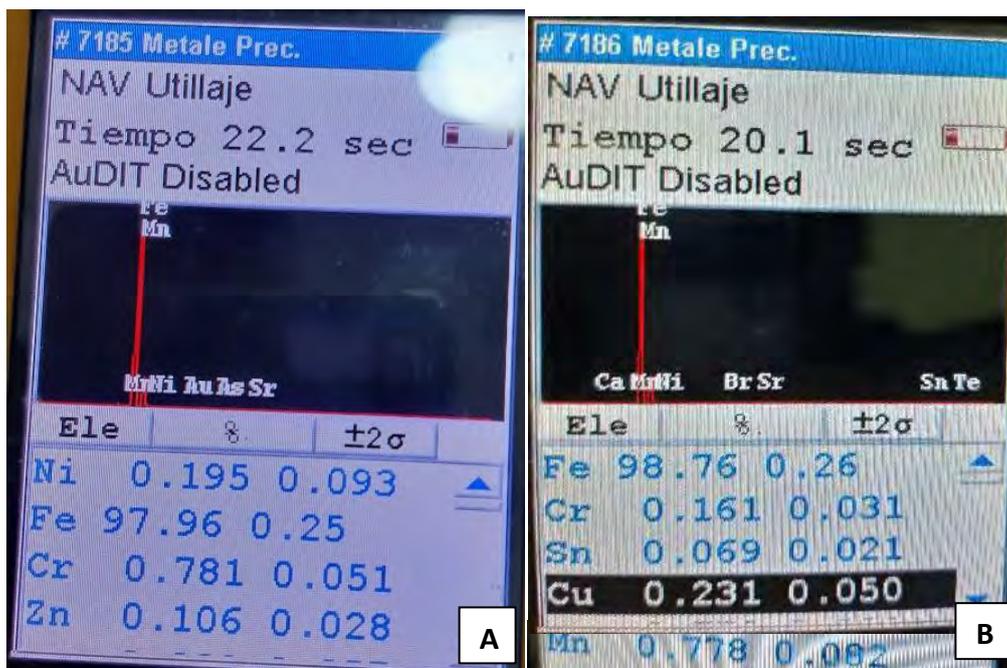


Figura B-4 resultado del análisis de rayos X, de bulón y de eje de acero respectivamente, piezas de automotriz, para fabricación de matriz de compactación. Adaptado de Empresa Oro Inca

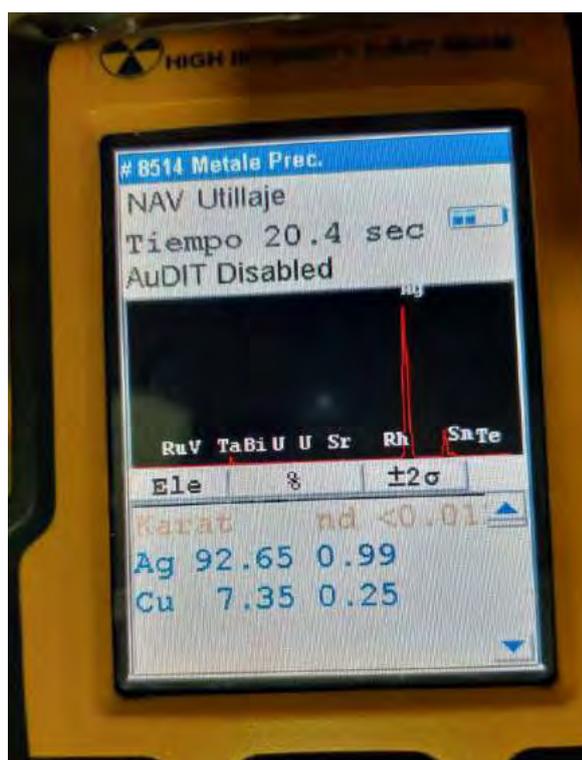


Figura B-5 resultado del análisis de rayos X, de las probetas post sinterización. Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-6 resultado del análisis de rayos X, de las probetas post sinterización.

Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-7 resultado del análisis de rayos X, de las probetas post sinterización.

Adaptado de Empresa Oro Inca

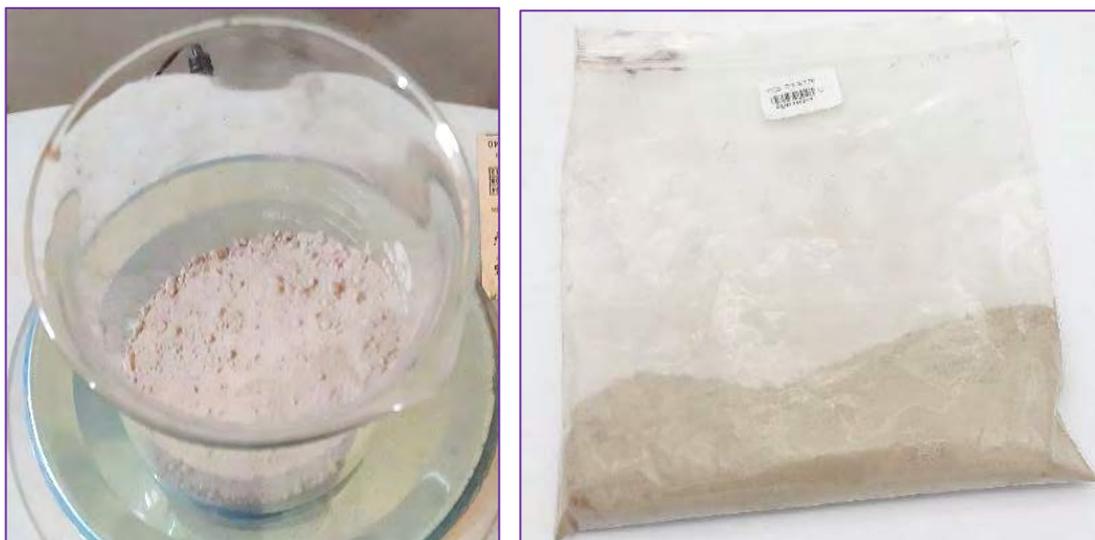


Figura B-8 obtención del polvo metalúrgico de plata. Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-9 proceso de filtrado de la solución de nitrato de cobre $\text{Cu}(\text{NO}_3)$. Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-10 diseños comerciales de joyas, iconografía precolombina de diseño de ave.

Adaptado de <https://www.pinterest.com/pin/659355201666629576/?lp=true>

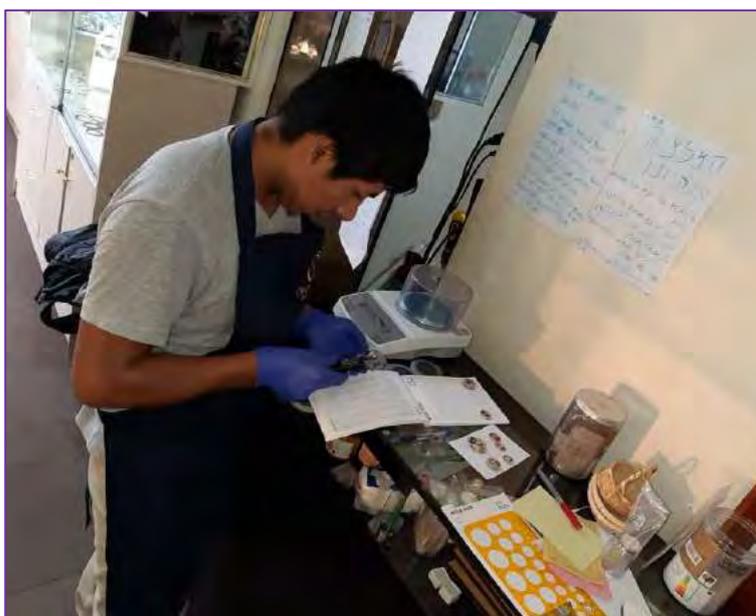


Figura B-11 toma de datos de las muestras en laboratorio. Adaptado de Empresa Oro Inca

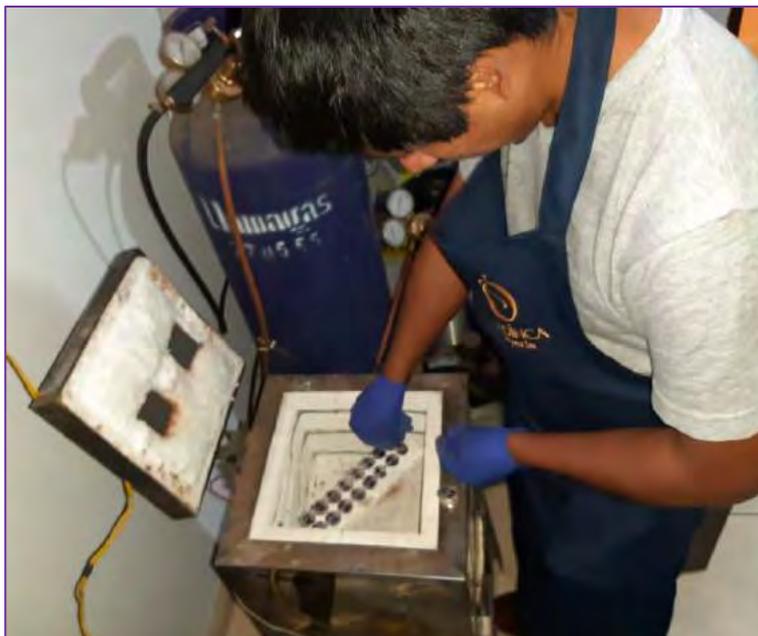


Figura B-12 introducción de muestras en el horno para el secado. Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-13 preparación de muestras en laboratorio. Adaptado de Empresa Oro Inca



Figura B-14 toma de datos de las muestras en laboratorio. Adaptado de Empresa Oro Inca

N°	Elemento	Análisis N° 01 (%)	Análisis N° 02 (%)	Promedio (%)
1	Oro (Au)	98.41	98.36	98.385
1	Plata (Ag)	1.51	1.48	1.495
2	Cobre (Cu)	0.083	0.162	0.1225
3	Total	100.00	100.00	100.00

Figura B-15 reporte de análisis químico de rayos X de bulón refinado. Adaptado de elaboración propia



Figura B-16 microscopio óptico. Adaptado de laboratorio de Metalúrgia física la escuela profesional de ingeniería metalúrgica UNSAAC

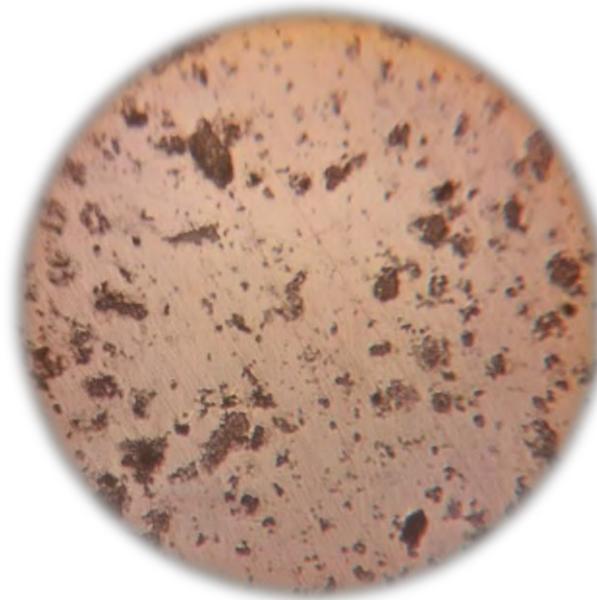


Figura B-17 vista al microscopio de la probeta (A-3) 3ton, sinterizado a 720°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa distribución de granos Cu-Ag en matriz de plata (β) en forma y porciones de tamaño grande, formando cuerpos grandes de color oscuro, con presencia de porosidad del mismo tamaño de los granos de ($\alpha+\beta$). Adaptado de laboratorio de Metalurgia física de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica UNSAAC

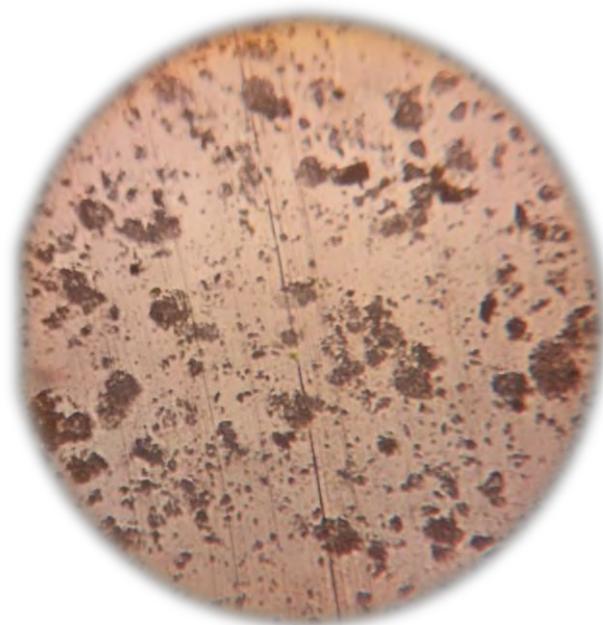


Figura B-18 vista al microscopio de la probeta (A-6) 3ton, sinterizado a 720°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa presencia de granos Cu-Ag en forma agrupada en matriz de plata (β) con porosidad agrupada. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

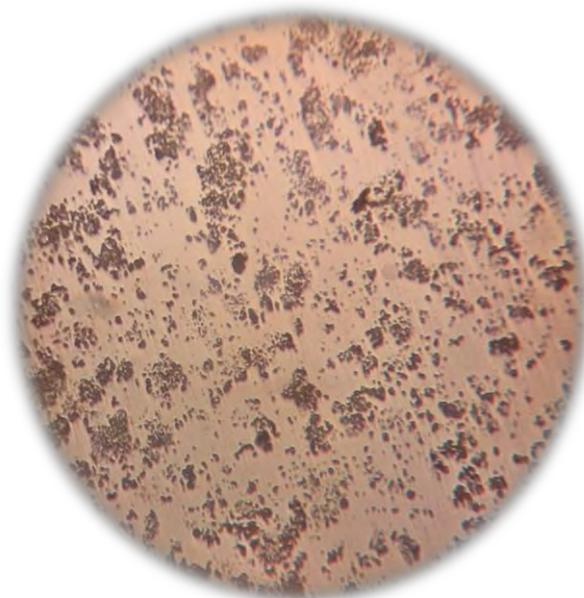


Figura B-19 vista al microscopio de la probeta (A-9) sinterizado a 840°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observo una distribución más homogénea de granos Cu-Ag y porosidad en matriz de plata (β), en cuanto al tamaño y forma. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

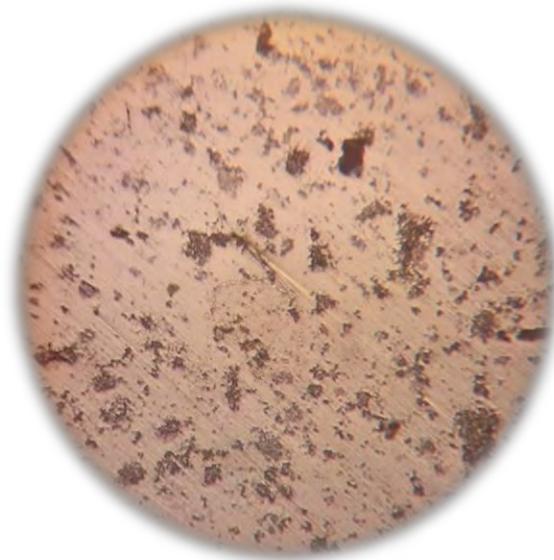


Figura B-20 vista al microscopio de la probeta (B-3)5ton, sinterizado a 720°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa presencia de granos Cu-Ag en matriz de plata (β) con presencia de porosidad aislada. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

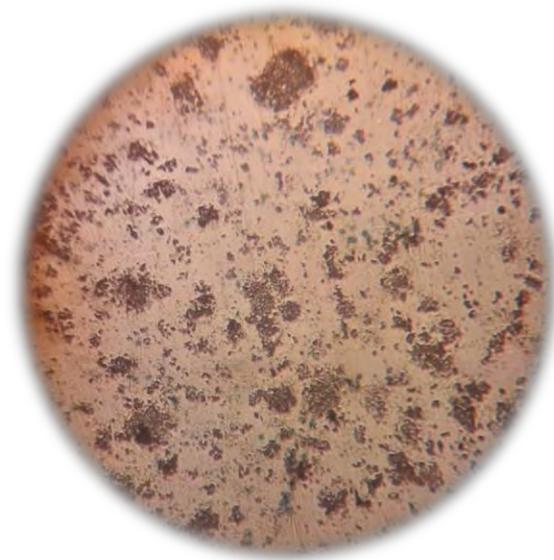


Figura B-21 vista al microscopio de la probeta (B-6) 5ton, sinterizado a 780°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa una distribución de granos Cu-Ag en matriz de plata (β) con tendencia a la homogenización de granos y poros, escasa presencia granos de gran tamaño. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC

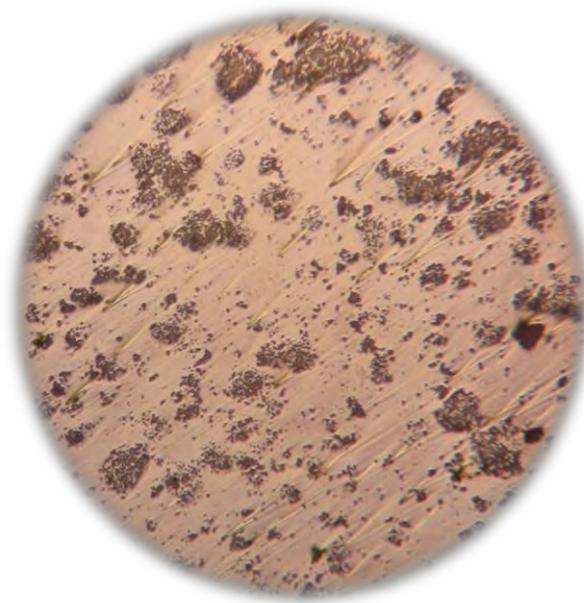


Figura B-22 vista al microscopio de la probeta (B-9) 5ton, sinterizado a 840°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa una distribución más homogénea de granos de Cu-Ag y porosidad en una matriz de plata (β). Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC.



Figura B-23 vista al microscopio de la probeta (C-3) 7ton, sinterizado a 720°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa una distribución homogénea de granos Cu-Ag y porosidad ambas de formas esféricas formando cuerpos grandes, porciones aisladas. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC



Figura B-24 vista al microscopio de la probeta (C-6) 7ton, sinterizado a 780°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa granos de Cu-Ag y porosidad en matriz de plata (β) de tamaño pequeño distribuidos homogéneamente. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC.

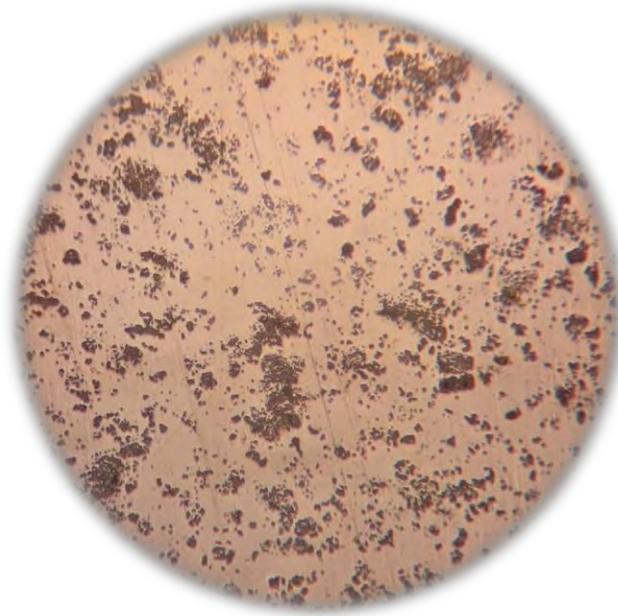


Figura B-25 vista al microscopio de la probeta (C-9) 7ton, sinterizado a 840°C y 15 minutos. Sin ataque químico, 100x. Se observa granos de Cu-Ag y porosidad de forma esférica en matriz de plata (β) con tendencia a presentar partículas uniformemente distribuidas. Adaptado de laboratorio de metalurgia física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC.

Anexo - C

C-1; Matriz de consistencia

Producción de piezas de joyería en plata 925 por compactación-sinterización				
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema principal</p> <p>¿Será factible producir piezas de joyería en plata 925 (aleación de 92.5% de Ag y 7.5% de Cu), por compactación - sinterización a partir de polvos metalúrgicos?</p> <p>Problemas secundarios</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cómo determinar la fuerza de compactación necesaria para producir piezas de joyería? ➤ ¿De qué manera determinar la temperatura de sinterización adecuada para producción de piezas de joyería? ➤ ¿Cómo establecer el tiempo adecuado de sinterización para producir piezas de joyería? 	<p>Objetivo general</p> <p>Realizar la producción de piezas de joyería por compactación - sinterización a partir de polvos metalúrgicos en plata 925.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Determinar la fuerza de compactación necesaria para producir piezas de joyería. ✓ Determinar la temperatura de sinterización adecuada para producir piezas de joyería. ✓ Establecer el tiempo adecuado de sinterización para producir piezas de joyería. 	<p>Hipótesis general</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Por el método de compactación sinterización es probable producir piezas de joyería en plata 925 de calidad. <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Con la compactación se logra que los polvos metalúrgicos adquieran la forma y resistencia necesaria, para su posterior sinterización. ➤ A mayor temperatura de sinterización es mayor la velocidad de sinterización y viceversa si la temperatura disminuye la cinética de sinterización disminuye. ➤ A mayor tiempo de sinterización las piezas de plata 925 compactadas adquieren mayor densidad aproximándose a la densidad teórica (10.40 g/cm³) y la porosidad del material disminuye. 	<p>variable dependiente</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Porcentaje de porosidad. <p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuerza de compactación. ✓ Temperatura de sinterización. ✓ Tiempo de sinterización. 	<p>Alcance de la investigación.</p> <p>El alcance de esta investigación es correlacional y descriptivo porque mediremos el grado de asociación que existe entre las variables y sabremos cómo se comporta una variable al conocer el comportamiento de las otras variables vinculadas a ella. El tipo de investigación para este trabajo es experimental, enfocado en la investigación cuantitativa.</p>

