

# **ANEXO A1**

**Estudio de factibilidad**

# 1 Estudio de factibilidad

## 1.1 Selección de proceso

Existen diversas formas de fabricar los implantes de cadera total de contacto metal-metal, podemos mencionar a grandes rasgos tres posibles procesos: El forjado, el maquinado a partir de placas provenientes de procesos termomecánicos y la fundición. Por razones tanto de disponibilidad de infraestructura así como de la obtención de muestras prototipo con las variables que se utilizaron en este trabajo, se seleccionó la metodología de fusión y vaciado de precisión o comúnmente conocida como vaciado a la cera perdida. Este proceso además de tener ventajas como la facilidad para obtener geometrías complejas a tolerancias cerradas, tiene la ventaja de poder fabricar los implantes a bajo costo, lo cual contribuye con uno de los objetivos de este trabajo: obtener los elementos necesarios para poder integrarlos a una empresa de base tecnológica que participe en la satisfacción de muchos pacientes que necesitan de un implante de cadera total. Por otra parte, el proceso de fusión y vaciado de precisión, es uno de los métodos que ofrece grandes ventajas en el acabado superficial de las piezas, esto significa que los pasos para obtener las dimensiones finales del producto, son mínimos disminuyendo los costos y tiempos de procesos posteriores. Los subprocesos generales de la metodología de fusión y vaciado de precisión son:

- Diseño del prototipo
- Inyección de cera
- Formación del árbol de colada en cera
- Lavado de árbol de cera
- Recubrimiento cerámico
- Evacuación de cera en el autoclave
- Sinterización
- Fusión y vaciado
- Subprocesos finales (acabado)

## 1.2 Pruebas

Básicamente, el estudio de factibilidad preliminar, se realizó con el objeto de obtener información acerca de:

- El efecto de un sistema enfriador sobre la solidificación
- Conocer la viabilidad para obtener superficies de acabado de copas y esferas sin realizarles un maquinado.

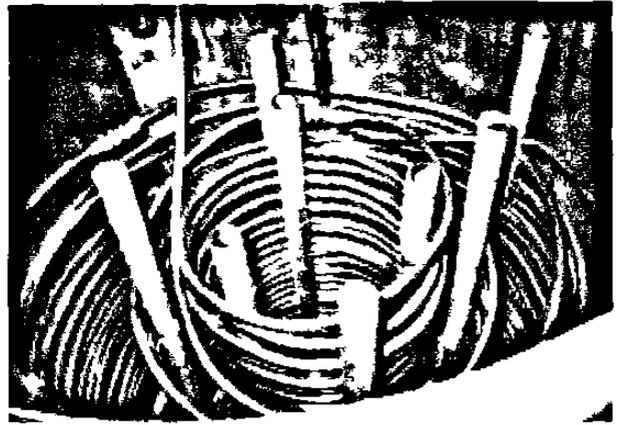
En los siguientes puntos, se describe de forma general las pruebas junto con los resultados los cuales sirvieron como información inicial para el desarrollo de las muestras prototipo de la presente tesis.

### *Solidificación forzada a través de un dispositivo enfriador.*

Para las pruebas de solidificación forzada, se construyó un sistema enfriador el cual se puede ver en la figura A1-1, el sistema enfriador esta formado por un contenedor metálico aislado térmicamente, en el interior se coloca CO<sub>2</sub> seco a fin de estar en contacto con un tubo de cobre de 28 metros de longitud en forma de serpentín. Uno de los extremos del serpentín, esta conectado a una línea de aire comprimido el cual es enfriado al pasar por el circuito del contenedor, una vez enfriado, es conducido hacia un aditamento visto en el inciso **a** de la figura A1-2, cuya función es distribuir el aire frío hacia la superficie de las 4 esferas (cabezas femorales) inferiores del molde cerámico como se puede apreciar en el inciso **b** de la misma figura.

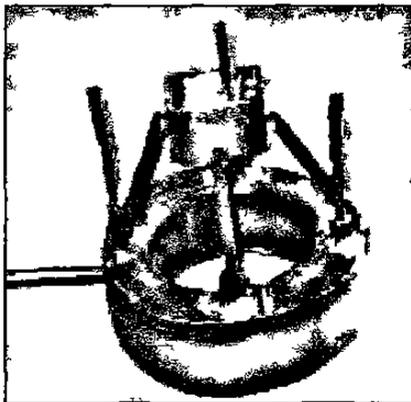


a) Exterior



b) Interior

Figura A1-1 Sistema enfriador de aire



a) Distribuidor de aire

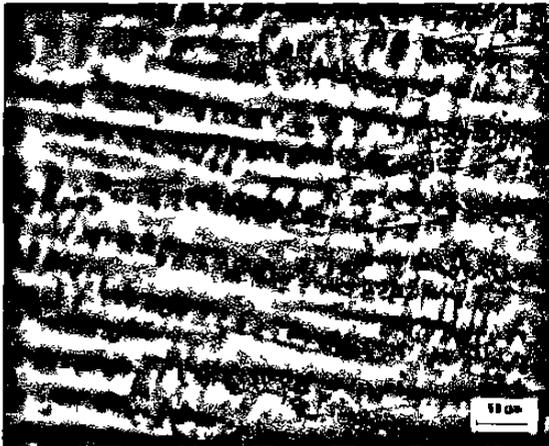


b) Inyección de aire frío a molde cerámico

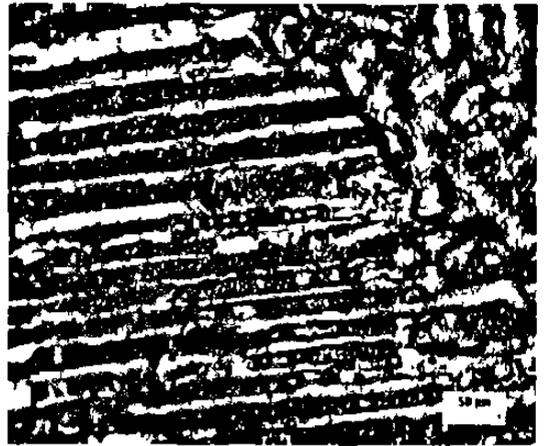
Figura A1-2 Inyección de aire frío sobre la superficie de las esferas.

De acuerdo al estudio metalográfico de figura A1-3 el cual fue realizado en el corte transversal de una esfera con solidificación al aire a) y otra con solidificación forzada por convección de aire frío generado por el sistema mencionado b). Se pudo apreciar que ambas piezas, mostraron un crecimiento dendrítico columnar, el cual se promovió por la nucleación heterogénea efectuada en la superficie de la pared del molde hacia el centro

de la pieza. En el caso de la solidificación forzada, se puede apreciar que el espaciado interdentrítico secundario es menor, sin embargo no lo suficiente para presentar cambios significativos entre ambas microestructuras en la zona de trabajo de estas durante las pruebas tribológicas.



a) solidificación al aire



b) Solidificación forzada

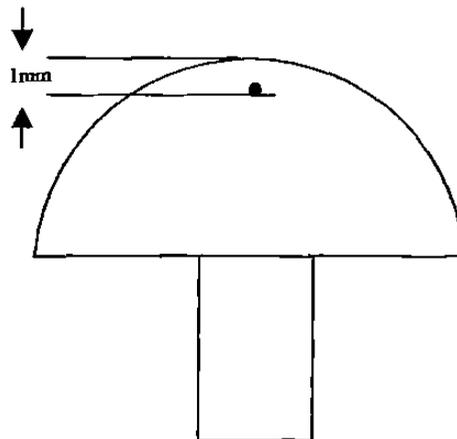


Figura A1-3 Metalografías a 100x sobre corte transversal de esferas con enfriamiento al aire y con enfriamiento forzado. Las metalografías se realizaron a 1 milímetro bajo la superficie según se puede ver en el inciso c.

*Pruebas para conocer la factibilidad de eliminar el maquinado.*

El maquinado representa un alto costo para el desarrollo de implantes de cadera metal-metal así como para el desarrollo de este proyecto, debido a esta razón, se realizaron pruebas preliminares para lograr un ensamble apto proveniente de fundición sin realizar un maquinado. Para esto se fabricaron 4 probetas tipo semiesferas mediante un molde improvisado según se puede ver en la figura A1-4. En la tabla A1-1, se presentan las contracciones para las cuatro muestras en cera y en metal. Esto da como resultado una contracción promedio para la esfera de un 2.95%.

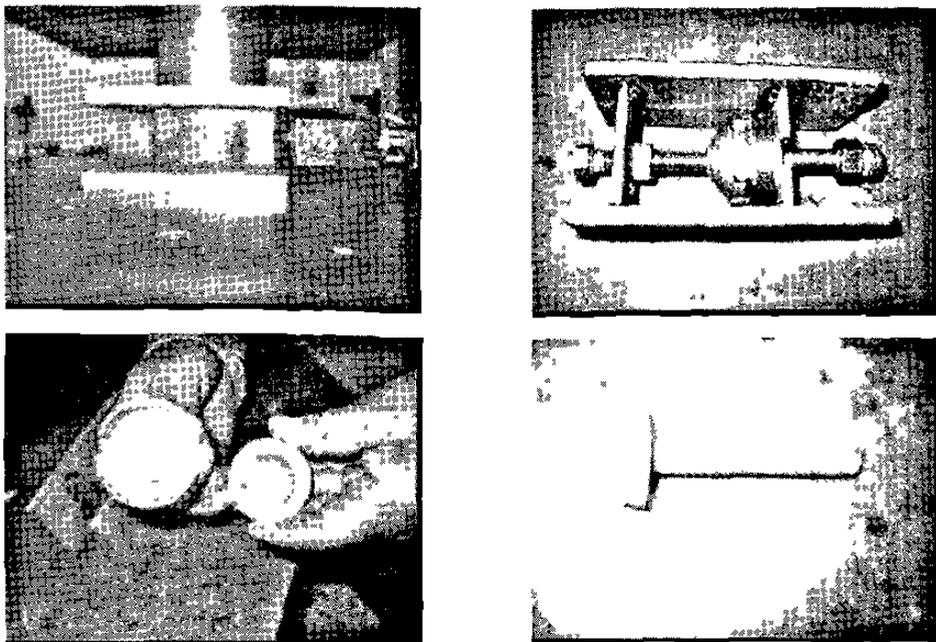


Figura A1-4 Obtención de muestras para estudios de contracción

Tabla A1-1

N. Muestra	PARAMETROS DE INYECCIÓN						Flujo de Inyección	mm	mm	Dimension	Dimension	Modo Enfriamiento
	Temperatura baño (C)	Temp. de Pistones (C)	Temp. de Manguera (C)	Temp. Inyección (C)	Tiempo Inyección (seg)	Presión Inyección PSI		Ø Molde	Ø Cera	Acabado	Metal con Acabado	
I	166	153	150	143	30	640	1	30.64 1.20635	30.46 1.1995	29.74	29.48	H2O
II	163	152	150	142	30	640	1	30.64 1.20635	30.49 1.2005	29.75	29.51	H2O
III	160	153	153	142	30	640	1	30.64 1.20635	30.51 1.2010	29.70	29.477	H2O
IV	158	151	153	143	30	640	1	30.64 1.20635	30.45 1.2000	29.70	29.51	H2O
V	155	152	150	143	30	640	1	30.64 1.20635	30.45 1.2000			H2O

Una vez obtenida la contracción, se generaron patrones en cera tipo escalera (ver figura A1-5), a estos patrones en cera, se les aplicaron diferentes procedimientos de ataque superficial y diferente composición de recubrimiento cerámico en la primera capa. esto con el objeto obtener el procedimiento óptimo para generar una menor rugosidad en la pieza metálica fundida. Los resultados se pueden ver en las figuras A1-6 a A1-9 siendo el tratamiento superficial de enjuague en agua y el recubrimiento de harina de zirconia malla 325 en la primera capa, la que generó la menor rugosidad ( $Ra = 37 \mu\text{in}$ ) en la superficie final del molde cerámico.



Figura A1-5

A pesar de lograr obtener bajas rugosidades de colada y el ensamble con un sobre-material controlado, se presentaron defectos superficiales por arrastre de cerámicos durante el vaciado de metal, este fenómeno no se pudieron eliminar por completo, debido a esta razón, se hizo imprescindible el maquinado de las áreas de contacto en copa y esfera.



Figura A1-6 Primera capa: Harina de zirconia malla 325

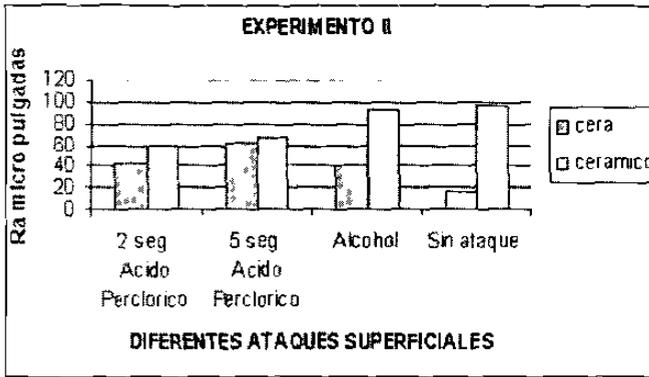


Figura A1-7 Primera capa: Alúmina malla 100

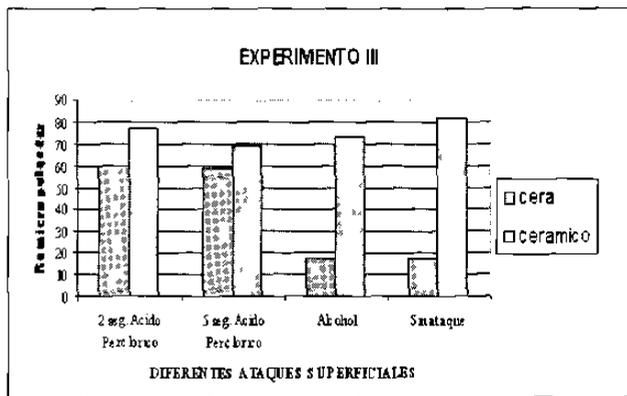


Figura A1-8 Primera capa: 30% sílica malla 125, 70% zirconia malla 350

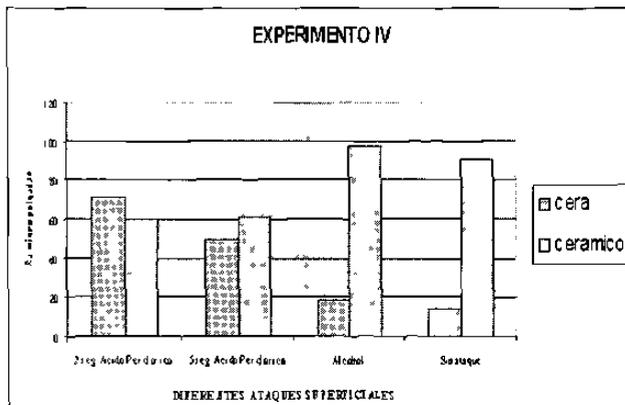
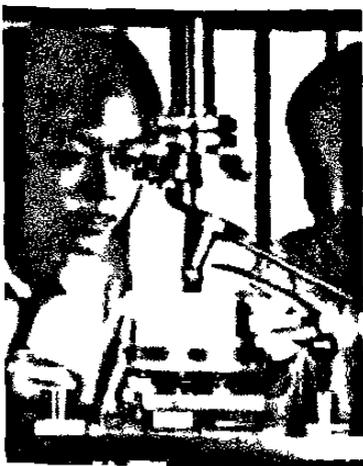


Figura A1-9 Primera capa: 100% zirconia malla -80+100

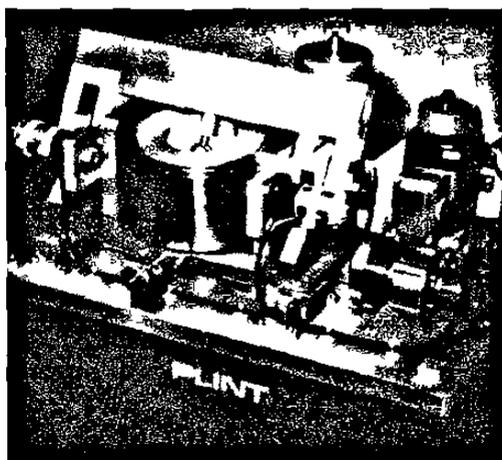
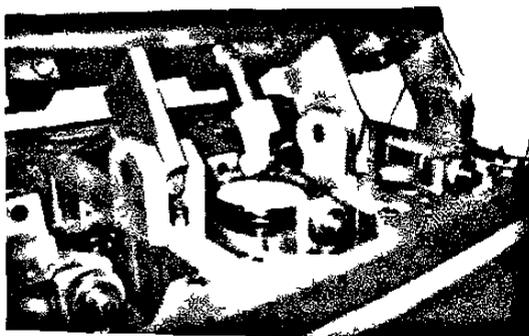
# **ANEXO A2**

**Simuladores de cadera**

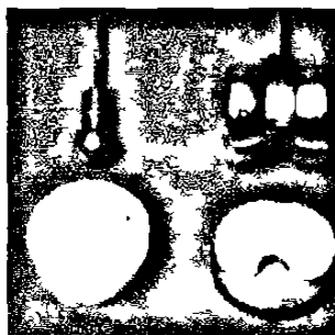
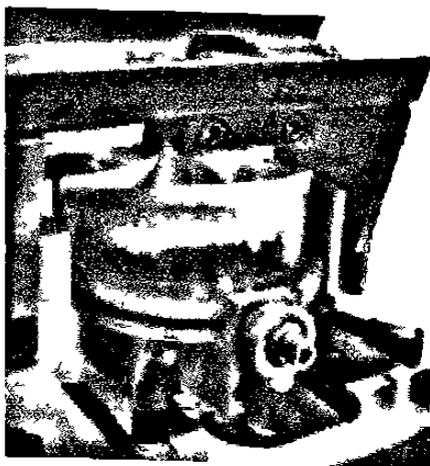


Simulador de desgaste de cadera INSTRON

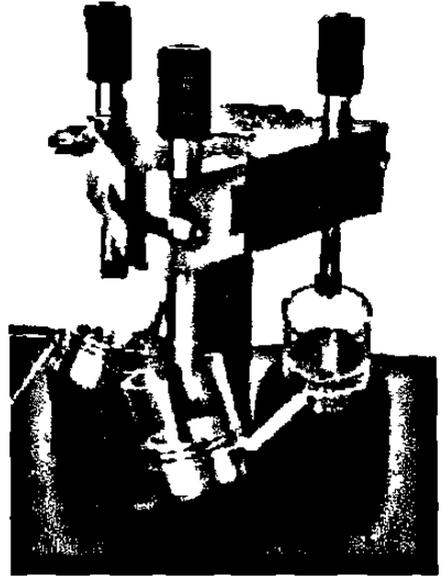
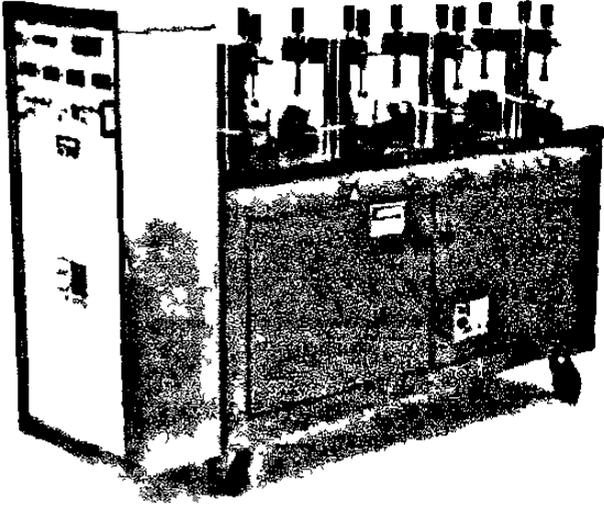
Simuladores PLINT



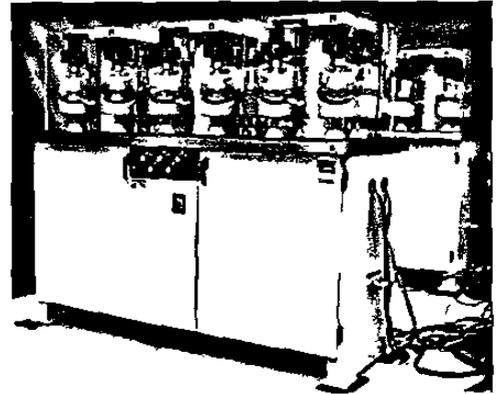
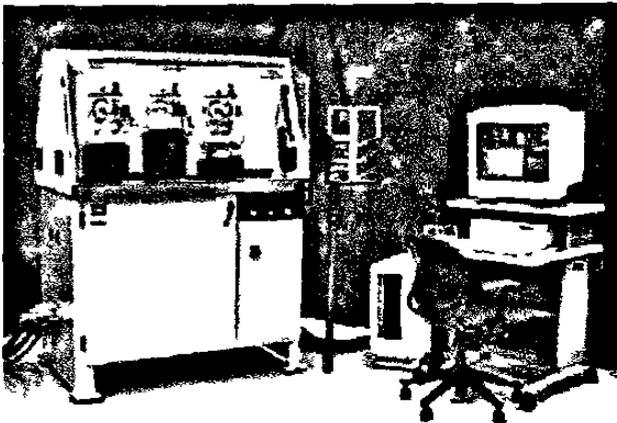
Muestras de cadera y rodilla para



Simulador de la UNIVERSIDAD SHORE WESTERN



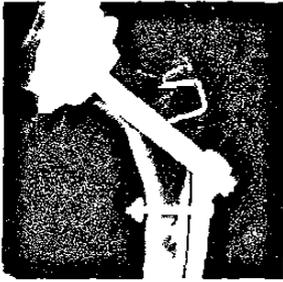
Simulador de desgaste MTS



# **ANEXO A3**

**Historia de los implantes de cadera total de contacto metal-metal**

## Historia de los implantes de cadera total de contacto metal sobre metal



1938  
P. Wiles, Londres (UK)  
6 operaciones, resultados desconocidos.



1956.  
G. K. McKee (UK)  
Prótesis tipo "Thompson"  
26 implantes.



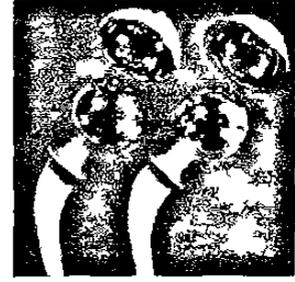
1959  
K. M. Sivash (Moscow)  
Hecha de acero y después de aleación Co-Cr.



1964  
P. Ring - Redhill (UK)  
Copa con un vástago implantado.



1965  
K. McKee-J. Farrar (UK)  
Revisión de la prótesis de Thompson



1965  
A. H. Huggler - Chur (CH)  
Primeros pares de metal-metal producidos en Suiza.



1965

M. E. Muller - St. Gallen  
(UK)



1972

B. G. Weber - St. Gallen  
(CH) Cabeza rotacional de Co-Cr.  
Sigue a la venta.



1988

B. G. Weber - St. Gallen  
(CH) Primer implante  
Metasul.



Modelo de Harlan C.  
Amstutz influenciado por  
los diseños de JUDET  
(1945)



1998  
Metasul se introduce en el  
Mercado americano.

# **ANEXO A4**

**Programa CNC utilizado para el maquinado de las muestras prototipo**

Programa de maquinado para torno CNC de las muestra prototipo utilizadas en el presente trabajo.

Programa para esfera:

```
[BILLET X31 Z30
  TOOLDEF T01
N010 G21
N020 G40 G98
N 25 G28 U0 W0
N030 M06 T0101
N040 M03 S1000
N050 G00 X32 Z2
N060 X0
N061 G73 U.9 W.35 R9
N062 G73 P070 Q090 U.05 W0 F100
N070 G01 Z0
N080 G03 X31.5 Z-15.75 K-15.75
N090 G00 Z2
N140 G28 U0 W0
N150 M06
N160 M30
```

Programa para copa:

```
[BILLET X38 Z30
[TOOLDEF T04
N010 G21
N020 G40 G98
N030 G28 U0 W0
N035 M06 T0404
N040 M03 S1000
N050 G00 X29 Z2
N060 G01 Z0 F100
N560 G03 X0 Z-14.5 I-14.5
N570 G00 Z1
```

N580 X29.1  
N590 G01 Z0  
N600 G03 X0 Z-14.55 I-14.55  
N610 G00 Z1  
N620 X29.3  
N630 G01 Z0  
N640 G03 X0 Z-14.65 I-14.65  
N650 G00 Z1  
N660 X29.5  
N670 G01 Z0  
N680 G03 X0 Z-14.75 I-14.75  
N690 G00 Z1  
N700 X29.7  
N710 G01 Z0  
N720 G03 X0 Z-14.85 I-14.85  
N730 G00 Z1  
N740 X29.9  
N750 G01 Z0  
N760 G03 X0 Z-14.95 I-14.95  
N770 G00 Z1  
N780 X30.1  
N790 G01 Z0  
N800 G03 X0 Z-15.05 I-15.05  
N810 G00 Z1  
N820 X30.3  
N830 G01 Z0  
N840 G03 X0 Z-15.15 I-15.15  
N850 G00 Z1  
N860 X30.5  
N870 G01 Z0  
N880 G03 X0 Z-15.25 I-15.25  
N890 G00 Z1  
N891 X30.6  
N892 G01 Z0  
N893 G03 X0 Z-15.3 I-15.3  
N894 G00 Z1  
N895 X30.7  
N896 G01 Z0

N897 G03 X0 Z-15.35 I-15.35  
N898 G00 Z1  
N899 X30.8  
N899 G01 Z0  
N899 G03 X0 Z-15.4 I-15.4  
N899 G00 Z1  
N899 X30.9  
N899 G01 Z0  
N899 G03 X0 Z-15.45 I-15.45  
N899 G00 Z1  
N899 X31.0  
N899 G01 Z0  
N899 G03 X0 Z-15.5 I-15.5  
N900 G00 Z1  
N900 X31.2  
N900 G01 Z0  
N900 G03 X0 Z-15.6 I-15.6  
N900 G00 Z1  
N900 X31.3  
N900 G01 Z0  
N900 G03 X0 Z-15.65 I-15.65  
N900 G00 Z1  
N901 G28 UC W0  
N910 M05  
N920 M30

# **ANEXO A5**

**Especificaciones técnicas de la MMC EOS**



# **ANEXO A6**

**Fracción de carburos, dureza y rugosidad**



## 1.2 Durezas (RC)

	Bajo carbono			Alto carbono		
	AS CAST	TS	TSp +TE	AS CAST	TS	TSp + TE
Ubicación de la indentación	<b>4,3</b>	<b>5,3</b>	<b>5,6</b>	<b>9,6</b>	<b>6,3</b>	<b>9,3</b>
Matriz + Carb	30	34	43	30	38	42
Matriz + Carb	32	35	44	33	40	43
Matriz + Carb	33	36	41	31	37	39
Matriz + Carb	32	35	45	33	40	42
Promedio en HRC	32,3	35,5	42,5	32,3	39,0	43

## 1.3 Rugosidades (Ra)

Muestra	Rugosidad en $\mu\text{m}$	Muestra	Rugosidad en $\mu\text{m}$
4,1	0,011	9,4	0,014
	0,015		0,014
	0,018		0,011
	0,023		Promedio = 0,013
	Promedio = 0,01675		S.D
	0,005057997		0,001732051
4,2	0,014	9,5	0,011
	0,015		0,015
	0,0158		Promedio = 0,013
	Promedio = 0,01493		S.D
	S.D		0,002828427
	0,00090185		
5,1	0,014	6,1	0,02
	0,017		0,019
	0,013		0,012
	Promedio = 0,01466		Promedio = 0,017
	S.D		S.D
	0,002081666		0,004358899
5,2	0,013	6,2	0,011
	0,01		0,011
	0,011		0,01
	Promedio = 0,01133		Promedio = 0,01066
	S.D		S.D
	0,001527525		0,00057735
5,4	0,027	9,1	0,016
	0,025		0,014
	0,017		0,017
	0,021		0,0179
	0,025		Promedio = 0,01622
	Promedio = 0,023		S.D
	S.D		0,001674067
	0,004	9,2	0,016
5,5	0,019		0,019
	0,022		0,016
	0,024		0,018
	Promedio = 0,02166		Promedio = 0,01725
	S.D	S.D	
	0,002516611		0,0015

# RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

**Marco Antonio Loudovic Hernández Rodríguez**

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales

Tesis

INFLUENCIA MICROESTRUCTURAL Y DIMENSIONAL EN EL DESGASTE  
DE PROTOTIPOS DE PROTESIS DE CADERA METAL-METAL  
FABRICADOS EN Co-Cr-Mo-C

Marco Antonio L. Hernández Rodríguez nació en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, el 5 de noviembre de 1976. Es hijo del Sr. Marco Antonio Hernández Urbano y la Sra. Blanca Elia Rodríguez de la Peña. Tiene el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico obtenido en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, habiendo terminado sus estudios profesionales en 1998. Ingresó al programa de graduados en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Mecánica obteniendo el título de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales en el 2001, Posteriormente ingreso al programa doctoral de la misma Facultad. Actualmente labora como investigador en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales donde participa en proyectos de investigación y desarrollo tecnológico de implantes quirúrgicos, superaleaciones y fundición.

