

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA EVALUACIÓN
DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE
SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS”**

REALIZADO POR:

CHRISTOPHER D. J. DÍAZ G.

JOSÉ D. ALLEN A.

Trabajo de Grado Presentado Ante la Universidad de Oriente como Requisito Parcial
para Optar al Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA EVALUACIÓN
DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE
SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS”**

ASESORES

Prof. GLORYS LÓPEZ

Asesor Académico

Firma

Prof. YMBHER BRIGGS

Co – Asesor Académico

Firma

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA EVALUACIÓN
DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE
SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS”**

JURADO

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

E X C E L E N T E

Asesor Académico

Co-Asesor Académico

Jurado Principal

Jurado Principal

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 44 del Reglamento de Trabajos de Grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza para cumplir esta meta tal como siempre lo imaginé.

A mis padres: Dramelis y Delfín Carol, por ser los seres más maravillosos en mi vida.

A mis hermanos: Edward, Darelys y Carol José, por creer en todas las metas que me he propuesto.

A mis tías: Rosa, Meris, Aracelis y María Angélica, por convertirse en mis segundas mamás.

A Favia y a mi hija Favia Daniela, por ser mi fuente de motivación.

A mis sobrinos Juan y Eduardo, por ser un hermoso regalo que Dios me dio. Que este logro les sirva de motivación en un futuro para alcanzar sus metas personales.

A mis maestras de primaria: Ada Zamora y Oleida Durán, por haber influido notablemente en mi formación integral. ¡Estoy muy agradecido con la vida por haber tenido unas maestras como ustedes!.

Christopher Daniel Díaz

DEDICATORIA

A Dios, por darme la dicha de llegar a este momento tan especial e importante en mí vida. Y además porque sé que donde me encuentre, él me acompaña y me protege, para así poder lograr cada una de mis metas.

Para quienes son las personas más importantes, mi ejemplo a seguir y los que me han hecho ser el hombre que soy hoy: mis padres José Salvador y Nereida Caridad, quienes me han apoyado, ayudado y motivado, en cada una de las etapas de mi vida y más aun en la universidad, ustedes son las personas a las que más “AMO”. Han sido gran parte de la fortaleza, constancia, perseverancia y superación, ésto es por y para ustedes. Gracias por ser quienes son, “MIS HÉROES”.

A mis hermanos: “Richard”, “Daniel” y “Sergio”, orgulloso estoy de tener hermanos como ustedes, juntos hemos salido adelante y espero que así siga siendo por siempre, han sido parte importante en mi vida y ejemplo a seguir.

A mi sobrinita querida Orly, que ahora comienza sus estudios universitarios y que le sirva de enseñanza, que con ganas, esfuerzo y dedicación puedes lograr lo que te propongas en este mundo.

A mi queridísima abuela Carlina Chávez, mi “Princesita”, que a pesar de no estar físicamente conmigo, te llevo siempre muy dentro de mi corazón, quisiera dedicártelo especialmente, siendo tú como mi segunda mamá y unas de las personas que más quería que me acompañara en este momento, al igual que mis padres. Además una de las personas que más amo en este mundo, aunque me da gran tristeza saber que no estarás, espero que estés muy orgullosa de mi. “Te amo y te extraño mucho”.

A mis tíos, primos, sobrinos y demás familiares, quienes han estado a mi lado de una u otra manera, para reír o llorar, a cualquier hora y momento. “Los quiero mucho”.

A mi bella novia Anadeska, que llegó a mi vida, para acompañarme y transformarla completamente de alegrías, cariño, ilusión, apoyo y mucho amor. “Te quiero y te amo mucho Preciosa”.

A mis grandes amigos con quienes he compartido, que han estado en los buenos y en los malos momentos: Álvaro Paraqueimo, Edith Figuera, Vivian Guevara, Mayerlin Pérez, Yarisbay Noriega, Germán (Biblioteca), Leonor Villanueva, Patricia Tamayo, Eliézer Lozada, Avi Luna, José Mayatis, Rosanny Mongua, Sheila Gámez, Angélica María, Edgardo Marchan, Edgar (El mocho), Carlos González, Leonel, Carlucho (Maroa), Francisco (Olaman), Jesús Sucre (Chacalito), Rodrigo, Javier Gómez, Horta (El Ilustre), Pedro, Patete, Tayupo, Giovanella, Marcela, Mario, Alfrevir, Camacho, Simón (Chimón), Richard Arias, Richard Itriago, Abrahan, Ángel, David (Plastilina), Edinson (Mudo), Freddy, Iván, Cruz, Jesús García, Lis, Maira, Mislady, Numan y todos aquellos que de alguna manera formaron parte de este logro, a todos ustedes gracias, he aprendido muchísimo con ustedes sobre todo el verdadero valor de la amistad. Les deseo lo mejor.

A mi compañero Christopher Díaz, que ahora nos graduaremos de Ingenieros Mecánicos. Gracias por aguantarme como compañero de Tesis. Y de mi parte te deseo el mayor de los éxitos.

José Daniel Allen Armas

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser un amigo incondicional, por estar allí cuando más lo necesitaba y cuando no le encontraba sentido a las cosas.

A mi mamá Dramelis, por ser mi mejor amiga, por darme desde pequeño, su apoyo y protección, por enseñarme que las cosas se hacen con paciencia y con fe. Gracias por apoyarme en absolutamente todo lo que me he propuesto alcanzar en pro de mi formación académica, por darme esas palabras de aliento cuando pensaba que todo era imposible de realizar. Gracias al todopoderoso por darme una mamá como tú, con una forma de ser excepcional.

A mi papá Delfín Carol, por darme su apoyo cuando más lo he necesitado y por demostrarme su interés en el cumplimiento de mis metas.

A mi hermano Edward (Alf), por ser un hermano excepcional, por demostrarme su ayuda de manera tangible, por ayudarme a llevar a cabo todo mi proyecto de vida. A su esposa Yoly, por ser una más de la familia y por darme también todo su apoyo incondicional.

A mi hermana Darelys (Cari) por ser mi compañera de crianza, por compartir todos aquellos momentos imborrables de la infancia, por cuidarme, por darme su apoyo, por quererme (aunque muy poco me lo diga verbalmente).

A mi tía Rosa (La Vieja), por ser mi segunda mamá, por darme mucho amor y cariño desde chiquito, por creer en lo que hacía y hago, por darme siempre su voto de confianza, por escucharme, por compartir mis aciertos y desaciertos desde que

era un niño. A ti debo mucho que esta meta se haya concretado. A mi tío Miguel, por ser una persona receptiva y amigable a lo largo de toda mi vida.

A mi tía Meris y a mis primas: Yanneris, Yarelys, Jennifer y Rosita, por brindarme su hogar, su comprensión, su ayuda, su apoyo, su amistad. ¡Muchas gracias!, ¡sin ustedes hubiese sido más difícil!.

A mi tía Aracelis y a mi tío Toño, por ayudarnos en los momentos más cruciales del desarrollo de este proyecto.

A mi tía María Angélica (Enco), por ser una persona admirable, por escucharme siempre y por tratarme con mucho cariño.

A mi adorada Favia, por apoyarme física y moralmente, por motivarme e inspirarme, por ser una excelente compañera, por querer formar una familia conmigo, por ser única y especial, por demostrarme lo importante que soy para ella, por amarme y valorarme...

A mis primos y primas: Jesús, Ricardo, Grecia, Rebequita, Maryoris, Greta, Alexei (El Negro).

A Amparo y a Manuel Antonio, por ayudarme siempre y por brindarme a toda hora su cálido hogar.

A mi compañero de tesis José Daniel (J.D.), por acompañarme en el cumplimiento de este reto académico. Por ser un buen pana tanto en las buenas como en las malas. Gracias por tu ayuda y por compartir conmigo tus ideas creadoras e ingeniosas.

A la Familia Rojas: Carlos, Maura, Carlitos, Eliana, Mirna y César. Por ayudarme de manera incondicional a realizar este proyecto. A Carlos, por ser esa persona que Dios nos mandó para ayudarnos. A Maura, por ser como una madre-amiga, por comprenderme en este largo proceso de realización del proyecto. ¡Muchas gracias!. Dios siempre los bendecirá.

A Darwin (Morochu), por ser no sólo mi mejor amigo de bachillerato y de siempre, sino por ser como un hermano. Gracias por dar tu granito de arena para que esta meta se hiciera realidad.

A Gera y a toda su familia (Maya, Hugo, Huguito y La Negra), por ofrecermme su hogar, su amistad, su ayuda cuando más la necesité, por darme ánimo y por valorar mi amistad. A ti Gera, debo agradecerte muchísimas cosas: gracias por ser una amiga-hermana y esa persona con la cual muchas veces anduve por los pasillos de la universidad (aquellas largas conversaciones que frecuentemente teníamos sobre nuestros problemas universitarios me sirvieron de mucho para madurar como persona). Gracias por valorarme y hacerme sentir importante en tu vida.

A mi compañero y hermano Alfrevir (Alfre), por ser ese amigo al cual busqué desde que ingresé a estudiar en la Universidad de Oriente (UDO), por compartir los momentos gratos y no tan gratos durante la carrera, por brindarme su hogar, su ayuda, su apoyo incondicional. Gracias por confiar en mí y por brindarme tu amistad. ¡Que Dios te bendiga siempre hermano!.

A mis compañeras y altas panas de comienzo de estudios en la Universidad: Tania Martínez y Keila Chique. Por ser únicas y especiales conmigo. Por brindarme su sincera amistad y por creer en el cumplimiento de los sueños. Nunca las voy a olvidar, a donde vaya siempre las recordaré con mucho cariño, como lo que son, mis grandes amigas de la UDO. ¡Sí se pudo!.

A la Profesora Glorys, por ayudarme a cumplir aquella meta que me planteé cuando cursé Ciencias de los Materiales: realizar una tesis de esta área. Gracias por permitirme aprender de usted como estudiante, como preparador y como tesista. Todo este conocimiento que me llevo es para mí invaluable, trabajar con usted significó una gran oportunidad para crecer personal y académicamente. Gracias por confiar y creer en mí, por convertirse en un ejemplo a seguir, por valorar mis ideas y aportes, por entenderme, por ser empática, colaboradora, humilde, paciente, buena amiga, buena consejera... Que Dios la siga ayudando a alcanzar sus metas, que le siga dando mucho ingenio y por sobre todas las cosas que le dé muchísima salud.

Al Profesor Ymbher, por todo su apoyo y orientación dada durante la realización de este trabajo. Gracias por esas palabras de aliento que nos dio cuando pensábamos que las cosas no se podían realizar.

Al Taller METALAY, específicamente al Ing. Jerzy Lojewski y al Señor José Gregorio por su gran aporte en la culminación de este trabajo. A Alejandro Fernández (Taller Sitelca), por solidarizarse con nosotros y aportar su granito de arena.

A la Familia Poito Salazar, por brindarme su ayuda y apoyo cuando más lo he necesitado. A la Señora Yesenia, al Señor Arquímidez y a mis panas María de los Ángeles y Estaban José.

A la Profesora María Eugenia Vicioso, por ser la persona que a través de su motivación me impulsó al estudio de las Ciencias de los Materiales y Metalurgia.

A Marcela Seijas, por sus sabios consejos, amistad, cariño y confianza. Gracias por compartir conmigo todos tus conocimientos y experiencias académicas; siempre te estaré agradecido.

A la UDO y a sus excelentes profesores, por cimentar en mí una formación académica que perdurará hasta el último momento de mi existencia. A todos los Profesores del Departamento de Mecánica, por compartir con nosotros un poco sobre su visión ingenieril.

A mis compinches y panas de la universidad: Orangel Maza, Freddy Rodríguez, Claudia López, Migdalia Vásquez, Janinna, Leorangelis, Juan Carlos Zerpa, Luis Eduardo, Mariela, Jesús Sucre, Ángel Acosta, Ángel y Andrés Rodríguez, Rafael Cequea, Vanesa Guzmán, Mariany De Jesús, Mario Hernández, Solinca, Giovanela, Melissa, Graciela, Ormarelis, Agustín, Víctor Faneitti, José Mago y César Moreno, por compartir esos inolvidables momentos en las aulas, pasillos y alrededores de la universidad.

A mis amigos y amigas de toda la vida: Rosa Cruz, Edgar Genaro, Dessiré, Krishna, Ana Carina, Estela, Arlenny, María Eugenia, Yaquelin Guevara, Odalis, Irse Querecuto, Anderson, Ronnie, Yennireth, Verónica Urbano y Alexis Guanique.

A todas aquellas personas (familiares, amigos, compañeros de clases y de estudio) e instituciones (que ahorita no las recuerdo) que de una u otra forma contribuyeron a la cristalización de este trabajo.

Christopher Daniel Díaz

AGRADECIMIENTOS

En especial a Dios, por darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, y darme la dicha de llevar a cabo esta investigación al lado de personas muy amables y capacitadas, tal como mi compañero de Tesis, Christopher Díaz, una persona muy preparada para lo que le depara el mundo.

A la Profesora Glorys López, por su confianza e interés; de mi parte un “gracias” se queda muy pequeño, por orientarnos y por responder cada una de nuestras inquietudes, aparte por habernos dado la oportunidad y el honor de compartir este proyecto con usted.

A mi querida prima Yannina Sarrameda, por su ayuda a través de la Mitsubishi. “Te estoy muy agradecido”

Al Sr. Carlos, al Sr. Toño, Alejandro Fernández del Taller Sitelca y al Taller Metalay, por su gran aporte para con nosotros, en especial en cada una de las etapas de la fabricación de la máquina, siendo éstos más que calificados y capacitados para tan ardua labor. “Muchas gracias”.

A los profesores: Ymbher Briggs, Luis Martínez, Carmen García, Richard Estaba Darwin Bravo y Carlos Gómez, por sus continuos y sabios consejos, además del tiempo y la dedicación puesta en cada detalle de esta investigación. Y a los diversos profesores que conforman al departamento de Mecánica, quienes muy amables y cordialmente nos atendieron en cualquier momento y a cualquier hora que fue necesario.

José Daniel Allen Armas

RESUMEN

En este trabajo de investigación, se fabricó una máquina para la evaluación de la adhesión de recubrimientos depositados sobre substratos metálicos y cerámicos, la cual se diseñó para funcionar bajo el principio básico del ensayo de rayado y determinar las cargas críticas requeridas para producir fallas adhesivas y/o cohesivas en películas de recubrimientos. Los parámetros de ensayo considerados para tal diseño fueron tomados de la norma ASTM C1624-05. Para su construcción, se utilizaron materiales, equipos y herramientas disponibles que implicaron un bajo costo de inversión. Con el objeto de verificar su funcionalidad, se realizaron pruebas de rayado sobre dos grupos de probetas, recubiertas con: A) pintura automotriz y B) recubrimientos metálicos y cerámicos, obteniéndose huellas con una longitud máxima de rayado de 10 mm. A partir de un programa computarizado (analizador de imágenes APPLIED VISION) y del uso de microscopía óptica (MO), se pudo determinar las cargas críticas y los posibles modos de falla de los recubrimientos ensayados. En los ensayos de rayado se obtuvo que en el grupo A, la adhesión de las probetas con pinturas mejoró (mayor carga crítica) con la adición de una nueva capa de pintura; y en el grupo B, la adhesión mejoró con el aumento de la dureza del compuesto, sobresaliendo las muestras con nitruro de zirconio (ZrN) y cromo duro que presentaron mayores cargas críticas. Por otra parte, se realizaron ensayos de evaluación de adhesión con el método de cinta adhesiva en las muestras recubiertas con pintura automotriz, a fin de verificar la correspondencia o no de resultados para ambas pruebas. Los resultados de esta prueba indicaron que existe relación para algunas muestras recubiertas que mostraron el mayor porcentaje de falla cuando la carga crítica fue baja.

ÍNDICE

	Pág.
RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN.....	XIV
ÍNDICE	XV
LISTA DE FIGURAS	XIX
LISTA DE TABLAS	XXIV
INTRODUCCIÓN	XXVII
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA.....	29
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.2. OBJETIVOS.....	31
1.2.1. Objetivo General.....	31
1.2.2. Objetivos Específicos.....	31
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	33
2.1. ANTECEDENTES.....	33
2.2. RECUBRIMIENTO	35
2.2.1. Definición.....	35
2.2.2. Clasificación.....	36
2.2.2.1. Según su espesor	36
2.2.2.2. Según su naturaleza.....	37
2.2.2.3. De acuerdo a su proceso de aplicación	37
2.2.3. Aplicaciones.....	39
2.3. ADHESIÓN	40
2.3.1. Definición.....	41
2.3.2. Tipos de interfases	42
2.3.3. Evaluación de la adhesión.....	44
2.3.3.1. Ensayos mecánicos para la evaluación de la adhesión de películas delgadas.....	45
2.3.4. Ensayo de rayado (Scratch Adhesion Test)	50
2.3.4.1. Determinación de la carga crítica.....	52
2.3.4.2. Parámetros y factores que afecta la carga crítica en la prueba de rayado.....	53
2.3.4.3. Teoría y modelado de la prueba de rayado	58
2.3.4.4. Modos de falla en la prueba de rayado.....	64

2.3.4.5. Clasificación de los modos de falla de los recubrimientos	71
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	74
3.1. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	74
3.1.1. Primera etapa. Revisión bibliográfica: Determinación de las variables que inciden en la adhesión de recubrimientos sobre sustratos metálicos y cerámicos	74
3.1.2. Segunda etapa: Diseño de la máquina de rayado	76
3.1.2.1. Establecimiento de los parámetros y de la magnitud de las variables de la prueba de rayado según el criterio de ensayo de la norma ASTM C1624-05	77
3.1.2.2. Propuestas de diseños conceptuales de la máquina de rayado a diseñar	79
3.1.2.3. Diseño del prototipo final de la máquina de rayado seleccionada	88
3.1.3. Tercera etapa: Construcción de la máquina de rayado	110
3.1.3.1. Adquisición de materiales y equipos	111
3.1.3.2. Fabricación y ensamblaje de las distintas piezas, elementos y partes constitutivas de la máquina de rayado “RAYANIEL”	113
3.1.3.3. Elaboración del manual de usuario de la máquina de rayado “RAYANIEL”	122
3.1.4. Cuarta etapa: Caracterización de probetas y ensayos de rayado	122
3.1.4.1. Caracterización de probetas	123
3.1.4.2. Ensayos de rayado	132
3.1.4.3. Determinación de las cargas críticas	136
3.1.4.4. Ensayos de rayado con método de cinta adhesiva	137
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	141
3.2.1. Fabricación de la máquina de rayado	141
3.2.1.1. Materiales	141
3.2.1.2. Equipos	142
3.2.1.3. Sustancias	143
3.2.2. Realización de ensayos de rayado	143
3.2.2.1. Materiales	143
3.2.2.2. Equipos	144
3.2.2.3. Sustancias	144
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	145
4.1. VARIABLES QUE INCIDEN EN LA RESISTENCIA DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS	145
4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE RAYADO “RAYANIEL”	147
4.2.1. Cálculos de diseño	147

4.3. PRUEBAS DE RAYADO EN RECUBRIMIENTOS (GRUESOS Y DELGADOS) REALIZADAS CON LA MÁQUINA CONSTRUIDA	149
4.3.1. Cargas críticas	149
4.3.1.1. Relación de las cargas críticas con algunos parámetros intrínsecos y extrínsecos que afectan la prueba de rayado	150
4.3.2. Análisis de huellas	164
4.3.2.1. A velocidad variable y constante	164
4.4. PRUEBA DE CINTA ADHESIVA EN RECUBRIMIENTOS GRUESOS (PINTURA AUTOMOTRIZ)	172
4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RAYADO Y LA PRUEBA DE CINTA ADHESIVA	174
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	176
5.1. CONCLUSIONES	176
5.2. RECOMENDACIONES	179
BIBLIOGRAFÍA	181
APÉNDICE A: EJEMPLOS DE CÁLCULOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.1. CÁLCULOS DE DISEÑO DE LA MÁQUINA DE RAYADO “RAYANIEL”	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.1.1. Determinación del espesor de las láminas de soporte inferior y superior.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.1.1. Lámina de soporte inferior	¡Error! Marcador no definido.
A.1.1.2. Lámina de soporte superior	¡Error! Marcador no definido.
A.1.2. Cálculo de diámetro mínimo de los tornillos de sujeción de las láminas inferior y superior.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.2.1. En lámina inferior	¡Error! Marcador no definido.
A.1.2.2. En lámina superior	¡Error! Marcador no definido.
A.1.3. Diseño de la leva	¡Error! Marcador no definido.
A.1.4. Diseño del eje	¡Error! Marcador no definido.
A.1.5. Cálculo de la potencia del motor.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.6. Verificación de esfuerzos en las camisas del porta-resorte.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.7. Cálculo del diámetro mínimo de las barras o ejes guías.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.8. Verificación de resistencia a carga compresiva en las columnas....	¡Error! Marcador no definido.
A.1.9. Selección de resortes	¡Error! Marcador no definido.
A.1.10. Análisis de esfuerzos y deflexiones en los resortes helicoidales de compresión	¡Error! Marcador no definido.

A.1.10.1. Análisis de esfuerzos y de deflexión en el Resorte “B” para Fo = 10N	¡Error! Marcador no definido.
A.1.10.2. Análisis de esfuerzos y de deflexión en el Resorte “A” para Fo = 100N	¡Error! Marcador no definido.
APÉNDICE B: IMÁGENES DE HUELLAS DE RAYADO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
B.1. HUELLAS DE RAYADO Y CARGAS CRÍTICAS A VELOCIDAD VARIABLE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
B.2. HUELLAS DE RAYADO Y CARGAS CRÍTICAS A VELOCIDAD CONSTANTE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
B.3. METALOGRAFÍA A TRAVÉS DEL ESPEORES DE LAS MUESTRAS RECUBIERTAS UTILIZADAS PARA ENSAYO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE C: MANUALES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
C.1. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA REALIZACIÓN DE HUELLAS SOBRE RECUBRIMIENTOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
C.2. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
C.2.1. Descripción, definición de términos, especificaciones y equipo estándar	¡Error! Marcador no definido.
C.2.1.1. Descripción.....	¡Error! Marcador no definido.
C.2.1.2. Definición de términos básicos	¡Error! Marcador no definido.
C.2.1.3. Especificaciones.....	¡Error! Marcador no definido.
C.2.1.4. Equipo estándar	¡Error! Marcador no definido.
C.2.1.5. Limitaciones del equipo	¡Error! Marcador no definido.
C.3. MANUAL DE MANTENIMIENTO Y ENSAMBLAJE .	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
C.3.1. Instrucciones para el mantenimiento del equipo	¡Error! Marcador no definido.
C.3.1.1. Lubricación.....	¡Error! Marcador no definido.
C.3.1.2. Recambio de la punta de diamante Rockwell C	¡Error! Marcador no definido.
C.3.1.3. Inspección de la leva	¡Error! Marcador no definido.
C.3.1.4. Cambio del resorte del penetrador. ...	¡Error! Marcador no definido.
C.3.1.5. Medidas de seguridad en el uso de la máquina .	¡Error! Marcador no definido.
C.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAMBLAJE. .	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE D: NORMAS UTILIZADAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
D.1. NORMA ASTM C1624-05	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

D.2. NORMA ASTM C3359-05	; ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE E: PLANOS DE LA MÁQUINA.....	; ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	184

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 2.1. TIPOS DE ENLACES MÁS COMUNES ENTRE RECUBRIMIENTO Y SUBSTRATO	42
FIGURA 2.2. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE DISTINTOS TIPOS DE INTERFASES ENTRE SUBSTRATO Y RECUBRIMIENTO	42
FIGURA 2.3. ENSAYO DE TENSIÓN DIRECTA.....	46
FIGURA 2.4. ENSAYO TOPPLE TEST.....	46
FIGURA 2.5. ENSAYO ULTRACENTRÍFUGA	47
FIGURA 2.6. ENSAYO DE PULSO LÁSER.....	49
FIGURA 2.7. ENSAYO DE CINTA ADHESIVA	49
FIGURA 2.8. ESQUEMA QUE ILUSTRA EL PRINCIPIO DEL ENSAYO DE RAYADO.....	51
FIGURA 2.9. PRINCIPALES MECANISMOS DE FALLA Y SU RELACIÓN CON LOS TIPOS DE DAÑO OBSERVADOS EN EL ENSAYO DE RAYADO	52
FIGURA 2.10. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE RAYADO/VELOCIDAD DE_CARGA (DL/DX) CON LA CARGA CRÍTICA	54
FIGURA 2.11. CONTRIBUCIONES AL DESPEGUE DE LA CAPA DE RECUBRIMIENTO EN LA PRUEBA DE RAYADO (SEGÚN MODELO DE BURNETT Y RICKERBY)	60
FIGURA 2.12. FALLA INTERFASIAL POR ROMPIMIENTO DEL RECUBRIMIENTO AL FRENTE DEL PENETRADOR (SEGÚN MODELO SUGERIDO POR F. ATTAR Y T. JOHANNESSON)	63
FIGURA 2.13. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA PUNTA DE DIAMANTE Y DE LA APARIENCIA GENERAL DE LA RAYA OBTENIDA POR DEBAJO Y POR ENCIMA DE LA CARGA CRÍTICA DURANTE LA PRUEBA DE RAYADO.....	65

FIGURA 2.14. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SUPERFICIE DE LA GRIETA QUE PUEDE LLEVAR A LA SEPARACIÓN DEL RECUBRIMIENTO BAJO ESFUERZO COMPRESIVO O DE Tensión	66
FIGURA 2.15. AGRIETAMIENTO Y DESPRENDIMIENTO CAUSADO POR ESFUERZOS COMPRESIVOS EN EL RECUBRIMIENTO	69
FIGURA 3.1. ETAPA INICIAL CUMPLIDA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.....	75
FIGURA 3.2. SECUENCIA DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA SEGUNDA ETAPA ...	76
FIGURA 3.3. PENETRADOR ROCKWELL C RECOMENDADO PARA EL ENSAYO DE RAYADO.	79
FIGURA 3.4. ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE OPERACIÓN CONSIDERADO PARA EL DISEÑO DE LA MÁQUINA DE RAYADO	80
FIGURA 3.5. PROTOTIPO DE MÁQUINA CONSIDERANDO EL MECANISMO DE CADENA-GUAYA.	81
FIGURA 3.6. BOCETO DE MÁQUINA TOMANDO COMO BASE DE DISEÑO EL MECANISMO PIÑÓN-CREMALLERA.	83
FIGURA 3.7. DISEÑO CONCEPTUAL CONSIDERANDO EL MECANISMO LEVA-SEGUIDOR..	85
FIGURA 3.8. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN LA MÁQUINA DE RAYADO.	89
FIGURA 3.9. BOCETO GENERAL DE LA VISTA DE FRENTE DE LA MÁQUINA DE RAYADO.	92
FIGURA 3.10. DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA NORMAL.....	92
FIGURA 3.11. LEVA CON PERFIL DE VELOCIDAD CONSTANTE DISEÑADA.	95
FIGURA 3.12. CONDICIONES NECESARIAS PARA EL DISEÑO DE LA LEVA.	95
FIGURA 3.13. CONJUNTO LEVA-SEGUIDOR CONSIDERADO PARA EL DISEÑO	96
FIGURA 3.14. A) SEGUIDOR; B) SOPORTE BASE SEGUIDOR; C) ACOPLÉ LEVA-SEGUIDOR/SOPORTE BASE.....	96
FIGURA 3.15. ELEMENTOS DE SUJECIÓN DE LAS BARRAS GUÍAS.	97
FIGURA 3.16. DISPOSITIVO DE MOVIMIENTO VERTICAL PARA PROBETAS.....	98
FIGURA 3.17. DISEÑO CONCEPTUAL DE LAS PRENSAS DE SUJECIÓN DE PROBETAS.....	99
FIGURA 3.18. SISTEMA DE PORTA-PROBETAS DISEÑADO	99
FIGURA 3.19. DISPOSITIVO MÓVIL PORTA-RESORTE.	100
FIGURA 3.20. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS FUERZAS ACTUANTES EN EL PORTA-RESORTE.....	100
FIGURA 3.21. VIGA SIMPLEMENTE APOYADA REPRESENTATIVA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PLANCHA INFERIOR A DISEÑAR	101
FIGURA 3.22. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA COLUMNA EN LA CONDICIÓN EMPOTRADA-EMPOTRADA	102
FIGURA 3.23. ÁNGULO DE SUJECIÓN O DISPOSITIVO DE UNIÓN UTILIZADO PARA LA UNIÓN DE LAS COLUMNAS CON LA PLANCHA METÁLICA SUPERIOR.....	105
FIGURA 3.24. ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LAS DEFLEXIONES EN LOS RESORTES.....	106
FIGURA 3.25. CURVA CARGA-DEFLEXIÓN PARA EL RESORTE A	108
FIGURA 3.26. CURVA CARGA-DEFLEXIÓN PARA EL RESORTE B	108
FIGURA 3.27. CURVA DISTANCIA CRÍTICA-CARGA CRÍTICA PARA EL RESORTE A.....	109

FIGURA 3.28. CURVA DISTANCIA CRÍTICA-CARGA CRÍTICA PARA EL RESORTE B	109
FIGURA 3.29. ESQUEMA CONCEPTUAL DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA TERCERA ETAPA	110
FIGURA 3.30. DIMENSIONES DE LA COLUMNA, DE LA LÁMINA INFERIOR Y SUPERIOR. .	113
FIGURA 3.31. BASTIDOR DE LA MÁQUINA DE RAYADO	114
FIGURA 3.32. LAMINAS METÁLICAS VERTICALES UTILIZADAS PARA CUBRIR LA PARTE INFERIOR DE LA MÁQUINA.	114
FIGURA 3.33. EJE MECANIZADO	115
FIGURA 3.34. LEVA CON PERFIL DE VELOCIDAD CONSTANTE FABRICADA CON CNC..	116
FIGURA 3.35. ASPECTO FINAL DEL SEGUIDOR Y DE SU SOPORTE UNA VEZ FABRICADOS.....	117
FIGURA 3.36. DISPOSITIVOS DE SUJECCIÓN DE LAS BARRAS GUÍAS.....	118
FIGURA 3.37. DISPOSITIVO MÓVIL USADO COMO PORTA-RESORTE/PORTA- PENETRADOR.....	119
FIGURA 3.38. DISPOSITIVO VERTICAL DEL PORTA-PROBETAS.....	120
FIGURA 3.39. MORDAZAS PARA SUJECCIÓN DE PROBETAS.	121
FIGURA 3.40. SISTEMA DE PORTA-PROBETAS	121
FIGURA 3.41. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO LLEVADO A CABO PARA CUMPLIR LA CUARTA ETAPA.....	122
FIGURA 3.42. PROBETAS METÁLICAS UTILIZADAS PARA SER RECUBIERTAS.	124
FIGURA 3.43. IMÁGENES DE LAS PROBETAS RECUBIERTAS	124
FIGURA 3.44. MUESTRAS ADICIONALES PARA ENSAYO	125
FIGURA 3.45. EQUIPO PARA MEDICIÓN DE MICRODUREZA VICKERS (HV).....	126
FIGURA 3.46. RUGOSÍMETRO UTILIZADO EN LA CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA DE LAS PROBETAS.....	126
FIGURA 3.47. PANTALLA DEL PROGRAMA APPLIED VISION	127
FIGURA 3.48. REGLILLA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES	128
REALES CON EL USO DEL PROGRAMA APPLIED VISION	128
FIGURA 3.49. A) MUESTRAS EMPOTRADAS EN RESINAS; B) ESPESOR DE PELÍCULAS DE RECUBRIMIENTOS (MAG. 400X).....	128
FIGURA 3.50. VELOCIDAD DEL PENETRADOR PROPORCIONADA POR EL MECANISMO YUGO ESCOCÉS.....	133
FIGURA 3.51. VISTA SUPERIOR DEL MECANISMO DE VELOCIDAD VARIABLE UTILIZADO.....	134
FIGURA 3.52. DETERMINACIÓN DE CARGA CRÍTICA EN UNA MUESTRA RECUBIERTA ..	136
FIGURA 3.53. MATERIALES UTILIZADOS EN EL MÉTODO DE CINTA ADHESIVA	138
FIGURA 3.54. A) REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CORTES DE RAYADO. B) TÉCNICA DE REALIZACIÓN DE LAS RAYAS.	138
FIGURA 3.55. A) LIMPIEZA DE LA ZONA ENSAYADA; B) USO DE LA LUPA PARA LA VERIFICACIÓN DE LOS CORTES REALIZADOS	139
FIGURA 3.56. A) TÉCNICA DE PEGADO DE LA CINTA; B) FROTACIÓN DE LA CINTA CON LA BORRA DEL LÁPIZ.....	139
FIGURA 3.57. MODO DE RETIRO DE LA CINTA.....	140

FIGURA 4.1. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	145
FIGURA 4.2. MÁQUINA DE RAYADO FABRICADA; A) VISTA FRONTAL Y B) VISTA SUPERIOR.	148
FIGURA 4.3. COMPARACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS A VELOCIDAD CONSTANTE Y VARIABLE EN LOS RECUBRIMIENTOS GRUESOS Y BLANDOS	151
FIGURA 4.4. COMPARACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS A VELOCIDAD CONSTANTE Y VARIABLE EN LOS RECUBRIMIENTOS DELGADOS Y DUROS	154
FIGURA 4.5. CARGAS CRÍTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS R1, R2 Y R4 EN FUNCIÓN DE: A) LA DUREZA VICKERS DEL SUBSTRATO Y B) DUREZA VICKERS DEL COMPÓSITO.....	155
FIGURA 4.6. CARGAS CRÍTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS R3 Y R5 EN FUNCIÓN DE: A) LA DUREZA VICKERS DEL SUBSTRATO Y B) DUREZA VICKERS DEL COMPÓSITO.....	156
FIGURA 4.7. CARGAS CRÍTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS DELGADOS Y DUROS EN FUNCIÓN DE LA DUREZA VICKERS DEL SUBSTRATO Y DEL COMPÓSITO.	157
FIGURA 4.8. CARGAS CRÍTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS: A) R1, R2 Y R4 Y B) R3 Y R5; EN FUNCIÓN DE SU ESPESOR.	158
FIGURA 4.9. CARGAS CRÍTICAS EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE LOS RECUBRIMIENTOS DELGADOS Y DUROS.	159
FIGURA 4.10. CARGAS CRÍTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS: A) R1, R2 Y R4 Y B) R3 Y R5; EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL SISTEMA RECUBRIMIENTO/SUBSTRATO	161
FIGURA 4.11. CARGAS CRÍTICAS EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LOS RECUBRIMIENTOS DUROS Y DELGADOS	163
FIGURA 4.12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA PRUEBA DE RAYADO Y EL ENSAYO DE CINTA ADHESIVA	174
FIGURA A.1. VIGA SIMPLEMENTE APOYADA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.3. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL TRAMO A-C..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.4. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL TRAMO C-B..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.5. DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE (V) Y MOMENTO FLECTOR (M) DE LA VIGA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.6. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA PLANCHA INFERIOR A) DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE; B) DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.7. VISTA DE PLANTA DE LA PLANCHA SUPERIOR.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.8. CONDICIONES NECESARIAS PARA EL DISEÑO DE LA LEVA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA A.9. DISEÑO DE LA LEVA CON PERFIL DE VELOCIDAD CONSTANTE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

- FIGURA A.10. DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA NORMAL F **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.11. ESTUDIO DE LA FUERZA ACTUANTE EN EL EJE. . **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.12. RESISTENCIA POR DURABILIDAD (S_n). **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.13. FACTOR DE TAMAÑO (C_s) PARA DISEÑO DE EJES. ...**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.14. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS FUERZAS ACTUANTES EN EL PORTA-RESORTE **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.15. DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE (V) Y MOMENTO FLECTOR (M) DE LAS BARRAS GUÍAS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.16. COLUMNA UTILIZADA PARA LA SUJECIÓN Y ARTICULACIÓN DE LAS LÁMINAS SUPERIOR E INFERIOR DE LA MÁQUINA DE RAYADO;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.17. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA COLUMNA EN LA CONDICIÓN EMPOTRADA-EMPOTRADA. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.18. CONDICIONES DE OPERACIÓN (COMPRESIÓN) DE LOS RESORTES. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.19. ESFUERZOS CORTANTES DE DISEÑO PARA ALAMBRE ASTM A227 EN FUNCIÓN AL DIÁMETRO DEL ALAMBRE DEL RESORTE “B”;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA A.20. ESFUERZOS CORTANTES DE DISEÑO PARA ALAMBRE ASTM A227 EN FUNCIÓN AL DIÁMETRO DEL ALAMBRE DEL RESORTE “A”;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA B.1. DISTANCIAS CRÍTICAS (D_c) Y CARGAS CRÍTICAS (L_c) DE HUELLAS DE RAYADO DE LAS MUESTRAS TOMADAS CON MO (MAG. 100X) **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA B.2. DISTANCIAS CRÍTICAS (D_c), CARGAS CRÍTICAS (L_c) Y MODOS DE FALLAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS A VELOCIDAD CONSTANTE (MO) **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- FIGURA B.3. IMÁGENES TOMADAS PARA LA MEDICIÓN DIRECTA CON OCULAR GRADUADO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS RECUBRIMIENTOS (MAG. 400X) **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS	36
TABLA 2.2. APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS EN ALGUNOS SECTORES INDUSTRIALES Y/O PRODUCTIVOS.....	40
TABLA 2.3. CARACTERÍSTICAS Y ORIGEN DEL MODO DE FALLA FRÁGIL EN EL ENSAYO DE RAYADO.....	72
TABLA 2.4. CARACTERÍSTICAS Y ORIGEN DEL MODO DE FALLA DÚCTIL EN EL ENSAYO DE RAYADO.....	73
TABLA 3.1. VALORES ESTÁNDARES DE LAS VARIABLES Y PARÁMETROS A CONTROLAR EN ENSAYO DE RAYADO	78

TABLA 3.2. PARTES, EQUIPOS Y ELEMENTOS MECÁNICOS CONSTITUTIVOS DE LA MÁQUINA DE RAYADO	89
TABLA 3.3. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR, REDUCTOR, GUARDAMOTOR Y ACOPLER UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN LA MÁQUINA	90
TABLA 3.4. MATERIAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DEL BASTIDOR, COLUMNAS, ÁNGULOS DE SUJECIÓN, PORTA RESORTE Y SOPORTES EN GENERAL DE LA MÁQUINA DE RAYADO	112
TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS SELECCIONADAS PARA ENSAYO	125
TABLA 3.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS ENSAYADOS	130
TABLA 3.7. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL ENSAYO OBTENIDOS CON EL MECANISMO YUGO ESCOCÉS	134
TABLA 3.8. PATRÓN PARA CUANTIFICACIÓN DE RESULTADOS EN EL ENSAYO DE CINTA ADHESIVA	140
TABLA 4.1. VARIABLES QUE INCIDEN EN LA RESISTENCIA DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS.....	146
TABLA 4.2. CÁLCULOS DE DISEÑO Y DIMENSIONES UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE RAYADO	147
TABLA 4.3. CARGAS CRÍTICAS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PROMEDIO DE LOS RECUBRIMIENTOS ENSAYADOS A VELOCIDAD VARIABLE Y A VELOCIDAD CONSTANTE	149
TABLA 4.4. RESULTADOS DE HUELLAS DE RAYADO A VELOCIDAD VARIABLE REALIZADAS SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS GRUESOS Y BLANDOS (RANGO DE APLICACIÓN DE CARGA 0-10N)	165
TABLA 4.5. RESULTADOS DE HUELLAS DE RAYADO A VELOCIDAD VARIABLE REALIZADAS SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS DELGADOS Y DUROS (RANGO DE APLICACIÓN DE CARGA 0-100N).	166
TABLA 4.6. RESULTADOS DE HUELLAS DE RAYADO REALIZADAS A VELOCIDAD CONSTANTE SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS GRUESOS Y BLANDOS	167
TABLA 4.7. RESULTADOS DE HUELLAS DE RAYADO REALIZADAS A VELOCIDAD CONSTANTE SOBRE LOS RECUBRIMIENTOS DELGADOS Y DUROS.	170
TABLA 4.8. RESULTADOS OBTENIDOS EN PROBETAS ENSAYADAS CON EL MÉTODO DE CINTA ADHESIVA	172
TABLA A.1. VALORES DE RADIOS CALCULADOS EN EL DISEÑO DE LA LEVA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA A.2. FACTOR DE CONFIABILIDAD (C_R)..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA A.3. DEFLEXIONES TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES DEL RESORTE A ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA A.4. DEFLEXIONES TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES DEL RESORTE B ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA A.5. CONSTANTES ELÁSTICAS DE LOS RESORTES SELECCIONADOS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	

- TABLA C.1. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE RAYADO EN PROBETAS RECTANGULARES, CUADRADAS Y CIRCULARES. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA C.2. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LA MÁQUINA DE RAYADO “RAYANIEL” **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA C.3. DESCRIPCIÓN DE DISPOSITIVOS Y PARÁMETROS ESTÁNDARES INTERCAMBIABLES DE LA MÁQUINA DE RAYADO “RAYANIEL” **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA C.4. LIMITACIONES DE LA MÁQUINA DE RAYADO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA C.5. PROCEDIMIENTO DE ENSAMBLAJE DE LA MÁQUINA DE RAYADO “RAYANIEL” **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el empleo de recubrimientos tradicionales (gruesos de espesores mayores a 10 μm) así como los de última generación (delgados de espesores menores a 10 μm), han dado lugar a un aumento importante de su producción en la industria, debido a las propiedades químicas, térmicas y mecánicas que la mayoría de éstos pueden ofrecer bajo diferentes condiciones de operación, ya sea para la resistencia a la corrosión, a la humedad, a cargas térmicas y/o mecánicas.

La selección de los métodos y técnicas de deposición de recubrimientos más idóneos para la obtención de un espesor de película, puede incidir favorablemente en la reducción de costos de producción; es por esto que las industrias pioneras en el área de la preparación y deposición de recubrimientos consideran este aspecto como una de las principales variables a controlar en los procesos de deposición, ya que con ello, se puede disminuir el valor agregado del producto terminado y obtener piezas o estructuras que, recubiertas con un espesor de película determinado, aportan casi o las mismas propiedades que se obtendrían con un espesor de película mayor.

El comportamiento de un recubrimiento depositado sobre un sustrato, puede conocerse a través de diferentes métodos de evaluación de su adhesión con éste. Métodos de ensayo como el de cinta adhesiva, pega epóxica y rayado, son algunos de los más comunes para caracterizar un recubrimiento desde el punto de vista de la adhesión práctica. Por su sencillez y practicidad, el ensayo de rayado, es uno de los métodos más utilizados para la caracterización de un recubrimiento, porque permite conocer la fuerza normal a la cual cualquier recubrimiento comienza a despegarse de su sustrato, es decir, cuando ocurre una incipiente falla adhesiva.

En este trabajo, se presenta el diseño y la construcción de una máquina para la realización de ensayos de rayado, con el propósito fundamental que ésta, satisfaga una necesidad existente en la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, específicamente en el Departamento de Mecánica: como es evaluar la adhesión práctica de recubrimientos sobre substratos, con la finalidad de generar nuevos conocimientos en el campo de la investigación, específicamente en el área de la Ingeniería Superficial.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento Del Problema

La Ingeniería Superficial, es un complemento esencial de la Ingeniería Mecánica que tiene como finalidad la resolución de problemas de deterioro superficial como desgaste, corrosión, adhesión de recubrimientos, entre otros, para así obtener superficies modificadas con nuevas funcionalidades favorables a determinadas condiciones de operación. Esta rama de la ingeniería, a través de la evaluación de la adhesión en sistemas de recubrimientos/substratos, se ocupa de conocer el grado y los mecanismos en que un recubrimiento se adhiere a una superficie en general, hecho que representa un estudio de gran interés por parte de los investigadores, ya que a partir de allí, se pueden mejorar mediante nuevos métodos y técnicas de deposición, el tipo de enlace entre recubrimiento y sustrato. De esta manera, se logra obtener a su vez, mejores propiedades químicas, térmicas y mecánicas que maximicen la vida útil de una pieza que ha sido manufacturada con un recubrimiento.

Actualmente, en la Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui, específicamente en el Departamento de Mecánica, en la Sección de Materiales y Manufactura, no se han realizado estudios experimentales sobre esta rama de la Ingeniería Superficial. Debido a esto, no se conoce con exactitud cómo se comporta un recubrimiento que ha sido seleccionado para la manufactura de una pieza o elemento mecánico en general, ante condiciones específicas de operación. Es por ello, que realizando pruebas para la evaluación de la adhesión entre recubrimientos y substratos, se puede contribuir a generar un cúmulo de nuevos e importantes conocimientos científicos en este campo poco explorado dentro de la universidad.

Para hacer realidad lo anteriormente expuesto, se plantea como solución a dicha problemática, fabricar una máquina para la realización de ensayos de evaluación de la adhesión en materiales recubiertos, en vista que la universidad no cuenta con este tipo de equipos y, su adquisición implica hacer una inversión monetaria muy elevada. Por consiguiente, atender dicha necesidad, permitirá estudiar la adhesión existente en un sistema interfásial formado por recubrimientos de distintas naturalezas y substratos metálicos y/o cerámicos. En este sentido, el equipo a construir, además, brindará la posibilidad de caracterizar tribológicamente el comportamiento de recubrimientos ante una carga mecánica de operación específica, donde sea posible conocer la fuerza normal crítica (principal variable a estudiar) a la cual cualquier recubrimiento empieza a despegarse de su substrato.

La fabricación de la máquina en cuestión, tiene como principio fundamental realizar tales ensayos a través de un método muy empleado, como lo es la prueba de rayado o de rasguño, la cual consiste en introducir en la interfaz (entre recubrimiento y substrato) tensiones en la superficie con un penetrador a medida que el mismo se desplaza a lo largo de una línea recta, a velocidad constante y con incremento progresivo de fuerza. Con el aumento de dicha fuerza, se hace que el material se deforme de manera elasto-plástica, provocando que en cualquier lugar del recorrido, el recubrimiento comience a fallar, apareciendo astillamiento o formación de virutas en el mismo. En este momento, es cuando se manifiesta la carga normal crítica, es decir, la carga más pequeña para la cual un evento específico de falla adhesiva ocurre.

Con la realización de este proyecto, además, se pretende contribuir con la formación académica especializada de los estudiantes de Ingeniería Mecánica, empleando el equipo construido para la realización de prácticas de laboratorio y, por otra parte, se desea impulsar una serie de estudios dentro del campo de la investigación en la Universidad de Oriente, que contribuyan a evaluar los diferentes tipos de recubrimientos más utilizados en el área ingenieril así como los que han sido

obtenidos recientemente mediante nuevas tecnologías de elaboración y deposición de los mismos, tales como los de Deposición Física en Fase Vapor (PVD por sus siglas en inglés) y los de Deposición Química en Fase Vapor (CVD).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Fabricar una máquina para la evaluación de la adhesión de recubrimientos depositados sobre sustratos metálicos y cerámicos, tomando como referencia de diseño la prueba de rayado “Scratch Adhesion Test”.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar las variables que inciden en la resistencia de la adhesión de recubrimientos sobre sustratos metálicos y cerámicos.
2. Establecer los parámetros y la magnitud de las variables de la prueba de rayado, basándose en el criterio de ensayo recomendado por la norma ASTM C1624-05.
3. Diseñar la máquina según los parámetros y variables de ensayo preestablecidos en la norma, combinando en el diseño un correcto funcionamiento y facilidad de operación.
4. Construir la máquina diseñada utilizando equipos, materiales y herramientas disponibles, mediante técnicas sencillas de fabricación y ensamblaje, que impliquen un bajo costo de inversión.
5. Elaborar un manual de usuario de la máquina construida, que facilite su uso seguro y preciso.

6. Realizar pruebas de rayado en la máquina fabricada, en probetas metálicas o cerámicas con recubrimientos duros (metálicos y cerámicos), que fallen de modo frágil y/o dúctil.
7. Determinar las cargas normales críticas requeridas para la falla adhesiva de los recubrimientos en las probetas ensayadas.
8. Comparar los resultados obtenidos en la prueba de rayado, con el ensayo de cinta adhesiva, verificando la existencia de alguna relación entre los resultados de ambas pruebas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

No se encontraron antecedentes relacionados con el diseño y construcción de máquinas para la evaluación de la adhesión de recubrimientos en substratos metálicos o cerámicos. Sin embargo, dentro de los trabajos consultados sobre el análisis y evaluación de recubrimientos se tienen como referencia los siguientes:

➤ Brad L., y Oppeltz K, en 1997 hicieron un estudio de la influencia de la capa de enlace y la erodación de la superficie sobre la resistencia de la adhesión de un recubrimiento de acero inoxidable normalizado 420, depositado por dos procesos de inyección térmica, HVCW (proyección térmica de alta velocidad por combustión alimentada por alambre) y arco eléctrico. Estos ingenieros, utilizaron un total de 172 probetas según la norma ASTM C633-79, las cuales fueron sometidas a ensayo de tracción para poder obtener la fuerza de enlace de los recubrimientos. A partir de los resultados obtenidos y el análisis de la superficie por medio de un microscopio electrónico, se concluyó que el proceso de inyección térmica HVCW, presentó un incremento importante en los valores de la fuerza de enlace por la utilización de esta capa, lo cual ocurre, pero en menor proporción en los procesos de arco eléctrico. Por otra parte, afirmaron que el proceso de erodado de la superficie por medio de la granalla de acero es más beneficioso para los recubrimientos proyectados por HVCW, y el material erodante del óxido de aluminio no genera notables incrementos de fuerza resultante enlazante en cualquiera de los dos procesos [1].

➤ Castañeda G., en 1999 evaluó recubrimientos de TiN sobre un acero 316L, con diferentes condiciones de acabado superficial, depositados mediante dos técnicas de deposición física en fase de vapor: el bombardeo iónico y el arco catódico. Se

determinó el espesor de la película depositada, la rugosidad superficial del recubrimiento y la adhesión. Evaluando esta última propiedad mediante el empleo de un equipo de rayado (REVETEST, CSEM), el cual basa su operación en hacer pasar un indentador Rockwell C esférico de 200 μm de radio sobre la muestra recubierta ejerciendo una carga normal que se incrementa de 0 a 100 N, mientras que la probeta se desplaza por una distancia de 10 mm. Las muestras ensayadas se analizaron por microscopía óptica y por microscopía electrónica de barrido encontrándose un crecimiento de la película de forma columnar en ambos casos y un modo de falla dúctil, típica del sistema recubrimiento/substrato bajo estudio. Se demostró que las muestras recubiertas por el proceso de arco catódico poseen una mejor adhesión que los depositados por bombardeo iónico, debido a que los recubrimientos depositados por este último, presentan una mayor cantidad de defectos, posiblemente debido a la existencia de mayores esfuerzos residuales que son inherentes al proceso. También se confirmó el hecho de que la carga crítica aumenta con el espesor de la película depositada y disminuye con el aumento de la rugosidad superficial de la muestra, como era de esperarse [2].

➤ López, G., en 2003 caracterizó tribológicamente películas de nitruro de zirconio (ZrN) depositadas sobre un substrato de acero AISI 1045, utilizando una de las más innovadoras técnicas del proceso de Deposición Física en Fase Vapor (PVD). El recubrimiento obtenido fue caracterizado en su condición original de fabricación (a temperatura ambiente) y luego de ser expuesto a 400 y 700 °C. A estas temperaturas se realizaron evaluaciones de la adhesión y de otras características básicas del sistema o compuesto recubrimiento/substrato. La resistencia de la adhesión fue evaluada mediante la determinación de la carga crítica (L_c), necesaria para producir un agrietamiento primario en el surco de una huella de 5 mm de largo, producida bajo una carga que se incrementó desde 5 hasta 53 N, utilizando un equipo para la prueba de rayado (REVETEST, CSEM). Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de rayado realizadas en el compuesto indicaron que a 400 °C se obtuvieron mejoras de

la adhesión del recubrimiento sobre el sustrato, mientras que a 700 °C, ocurrieron cambios importantes en la expansividad, microestructura y reactividad química del sistema, especialmente en pequeñas zonas defectuosas del recubrimiento que dejaron descubiertos microzonas del sustrato; estos defectos habían sido previamente detectados mediante microscopía electrónica de barrido durante la evaluación superficial del recubrimiento. El recubrimiento falló mediante múltiples grietas y delaminaciones originadas alrededor de las zonas defectuosas en las que se observó una oxidación severa luego de la exposición a 700 °C. Se pudo concluir que el mejor desempeño del ZrN depositado sobre el sustrato de acero al carbono, utilizando la tecnología PVD, se consigue en la condición original de fabricación y a temperatura ambiente, ya que en esta condición se obtuvieron mayores valores de microdureza (HV y HK), moderada carga crítica (Lc) y los menores valores del coeficiente de fricción promedio (μ_p) y de las constantes de desgastes (Kb y Kd) [3].

2.2. Recubrimiento

2.2.1. Definición

Un recubrimiento es una capa superficial de material, que puede ser cerámica, metálica, polimérica o una combinación de estas clases de materiales; capaz de inhibir la interacción directa entre el sustrato y cargas o ambientes potencialmente dañinos. El éxito de un recubrimiento se mide por su propiedad de permanecer adherido a su sustrato, resistir oxidación y fractura, evitar la difusión de elementos hacia el sustrato y proteger contra el desgaste [4].

Los recubrimientos pueden mejorar los requerimientos mecánicos, físicos, químicos y térmicos de la superficie del material, tales como: reflectividad y color, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, barreras térmicas, reacciones catalíticas, biocompatibilidad, etc. Algunas propiedades mecánicas de una pieza

recubierta se pueden obtener independientemente de la superficie. Sin embargo, los recubrimientos pueden afectar las propiedades en cuanto a resistencia mecánica, fatiga o tenacidad de fractura y dureza [5].

Las características de los recubrimientos se pueden controlar por la composición química del mismo, tratamientos termomecánicos, mezclas mecánicas y capas superpuestas.

2.2.2. Clasificación

Los recubrimientos pueden clasificarse de la manera indicada en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1. Clasificación de los recubrimientos
(Fuente: elaboración propia)**

TIPO DE RECUBRIMIENTO	
Según su espesor:	- Capas delgadas. - Capas gruesas.
Según su naturaleza:	- Orgánicos. - Inorgánicos.
De acuerdo a su proceso de aplicación:	- Superficiales por inmersión. - Electrolíticos. - Por procesos de difusión. - Por plasma y rociado. - Por Deposición Física en Fase de Vapor (PVD).

2.2.2.1. Según su espesor

Capas delgadas: Poseen espesores menores a 10 micrones y generalmente son depositados por las técnicas de Deposición Física en Fase Vapor (PVD), Deposición Química en Fase Vapor (CVD), Sol-gel, entre otros.

Capas gruesas: Poseen espesores mayores a los 10 micrones y son aplicados principalmente por plasma y termorrociado.

2.2.2.2. Según su naturaleza

Recubrimientos orgánicos: Los recubrimientos orgánicos se fabrican en base a materiales poliméricos, derivados del petróleo (como resinas), plantas y sus aceites. También pueden contener inhibidores de corrosión y han dado muy buenos resultados ante este problema. Sus acabados proveen barreras finas tenaces y duraderas para proteger el sustrato metálico de medios corrosivos. Muchos de los materiales utilizados para la elaboración de éstos, producen recubrimientos transparentes y de diferentes colores. Algunos de los recubrimientos más conocidos de este tipo son el barniz y las lacas.

Recubrimientos inorgánicos: Los más usados están compuestos fundamentalmente de metales como: cromo, níquel, zinc y aluminio, así como también de vidrio y materiales cerámicos. Estos recubrimientos proporcionan acabados tersos y duraderos.

Los recubrimientos más comunes de naturaleza inorgánica son las pinturas, el fosfatado, recubrimientos cerámicos (óxidos, nitruros, boruros y carburos, utilizados en herramientas de corte), entre otros.

2.2.2.3. De acuerdo a su proceso de aplicación

Recubrimientos superficiales por inmersión: La inmersión en baño de metal fundido, es uno de los procesos más antiguos para otorgar a un metal un aumento considerable de su resistencia a la corrosión, especialmente al hierro y al acero [6]. Una vez aplicado el recubrimiento a la pieza de metal, éste se endurece a medida que

se va enfriando y forma una capa altamente resistente [7]. Algunos de los recubrimientos conseguidos por este tipo de procesos son el galvanizado, aluminizado, etc.

Recubrimientos electrolíticos: Los procesos de recubrimientos electrolíticos o químicos, consisten en depositar por vía electroquímica finas capas de metal sobre la superficie de una pieza sumergida en una solución de iones metálicos o electrolito. En este proceso se usan productos químicos relativamente puros, sales y metales, de forma que durante la operación se depositan completamente los metales empleados sobre las piezas [8].

Los depósitos electrolíticos se utilizan principalmente para obtener superficies con propiedades que difieren de aquellas del metal base sobre el que se aplican. Uno de los propósitos más importantes, es el de mejorar la apariencia y mantener particularmente durante un periodo de tiempo largo un aspecto agradable y deseable, libre de manchas.

La propiedad que determina el comportamiento del depósito electrolítico, es su susceptibilidad a la acción química, especialmente en la atmósfera, la cual contiene siempre agentes corrosivos como el oxígeno, la humedad, el bióxido de carbono y de gases sulfurosos cerca de zonas industriales, principalmente bióxido de azufre y ácido sulfhídrico; cerca de la costa, es el cloruro de sodio el principal agente de corrosión. Existen diferentes tipos de recubrimientos obtenidos por procesos electrolíticos y los más comunes son: niquelado, cromado, anodizado, dorado, entre otros.

Recubrimientos por difusión: Son recubrimientos formados por un material que se difunde hacia la superficie de un substrato, el más conocido de estos procesos es la cementación, pero hoy en día hay otros métodos modernos basados en este principio como es la deposición química en fase vapor (CVD). En este proceso la

pieza es calentada en una atmósfera inerte, el metal a difundir es un polvo metálico que reacciona y forma un vapor reaccionando éste con la superficie del componente, enriqueciéndolo del elemento metálico que llega a formar diferentes tipos de compuestos en la superficie.

Ejemplo de recubrimientos obtenidos por difusión son: Ni_3Al , NiAl , CoAl y FeAl_2 . La reacción es controlada por la concentración del elemento a difundir, la temperatura y el tiempo [4].

Recubrimientos por plasma y rociado: El más común de estos recubrimientos es el conocido como termorrociado. Los materiales utilizados para su fabricación pueden ser cualquier sustancia que pueda ser fundida incluyendo metales, compuestos metálicos, óxidos, vidrios y polímeros.

Recubrimientos por deposición física en fase vapor (PVD): Este proceso emergió en la década de los sesenta. El término se refiere a la deposición de metales y otras especies de naturaleza cerámica por medio del transporte de vapor hacia un substrato precalentado sobre el cual éste se condensa. El proceso se lleva a cabo en una cámara de vacío sin necesidad de reacción química. Hoy en día existen diversas técnicas para lograr la evaporación de las especies a depositar, entre las que se cuentan la evaporación por bombardeo iónico y la evaporación por arco catódico, entre otras [4].

2.2.3. Aplicaciones

En la Tabla 2.2, se pueden distinguir diferentes aplicaciones de los recubrimientos de acuerdo al sector donde son usados.

Tabla 2.2. Aplicaciones de los recubrimientos en algunos sectores industriales y/o productivos [9]

Sector	Aplicación
Automoción	-Metalización de los componentes. -Recubrimientos duros para piezas del motor y carrocería.
Mecánico	-Recubrimientos duros para herramientas de corte y moldes. -Recubrimientos tribológicos para piezas móviles.
Sanitarios y domésticos	-Recubrimientos de grifos, tuberías, pomos y tiradores de puertas.
Construcción	-Recubrimientos térmicos y ópticos para paneles de vidrio utilizados en la construcción de edificios acristalados.
Microelectrónica y óptica	-Capas de protección para componentes electrónicos y optoelectrónicos. -Dispositivos electrónicos. -Capas antirreflectantes, antihumedad para lentes, visores espejos.
Dispositivos magnéticos	-Discos duros, registros magnéticos, etiquetas magnéticas.
Juguetería y bisutería	-Recubrimientos protectores y decorativos.
Alimentación	-Capas protectoras y decorativas para empaquetamientos de alimentos y de botellas.
Otros	-Biomateriales e implantes. -Componentes cerámicos.

2.3. Adhesión

La vida de un recubrimiento es de importancia primordial en muchas aplicaciones, es muy dependiente de los esfuerzos y, por supuesto, de la adhesión entre recubrimiento y sustrato. Ésto es particularmente importante si el recubrimiento o sustrato ha de ser expuesto a ambientes agresivos como la corrosión, altas temperaturas, humedad y fuerzas elevadas. El requerimiento para que exista una buena adhesión es que la región interfásica entre recubrimiento y sustrato no falle bajo diferentes condiciones de ensayo. En general, una buena adhesión es normalmente promovida por una fuerte unión átomo-átomo dentro de la región interfásica, bajo niveles de esfuerzos locales,

la ausencia de modos fáciles de deformación y fractura, y la ausencia de modos de degradación dependientes del tiempo [9].

2.3.1. Definición

Técnicamente la adhesión puede ser definida como la capacidad de un recubrimiento para mantenerse unido a un sustrato, bien a través de fuerzas de enlace o bien mediante cualquier otro tipo de fuerzas de interconexión. En la mayoría de los procesos de deposición, tal característica está relacionada con la resistencia de los enlaces atómicos a través de la interfase recubrimiento/sustrato. Consecuentemente, el límite superior de la adhesión está relacionado a la resistencia de los enlaces atómicos. Desde el punto de vista práctico, la adhesión puede ser definida como la propiedad que tiene el recubrimiento para soportar cargas externas sin que se produzca agrietamiento interfásico [10].

Por otra parte, la American Society for Testing and Materials (ASTM), define la adhesión como “el estado en el cual dos superficies se mantienen unidas por fuerzas interfásicas que pueden consistir de fuerzas de valencia, fuerzas de anclaje o ambas”. La naturaleza de estas fuerzas, puede ser de Van Der Waals, electrostáticas y/o fuerzas de enlaces químicos que son activadas a través de la interfase recubrimiento/sustrato. Los intervalos aproximados de energías de enlace han sido considerados por un gran número de investigadores, entre los cuales S. J. Bull [11] es uno de los más importantes, estas energías se ilustran en la Figura 2.1, además de los tipos de enlace señalados en tal figura, es posible también activar la adhesión por anclaje mecánico del recubrimiento y sustrato, que produce fuerzas de enlace comparables a los enlaces metálicos o electrostáticos, pero no pueden ser estrictamente expresados en términos de energía por enlace.

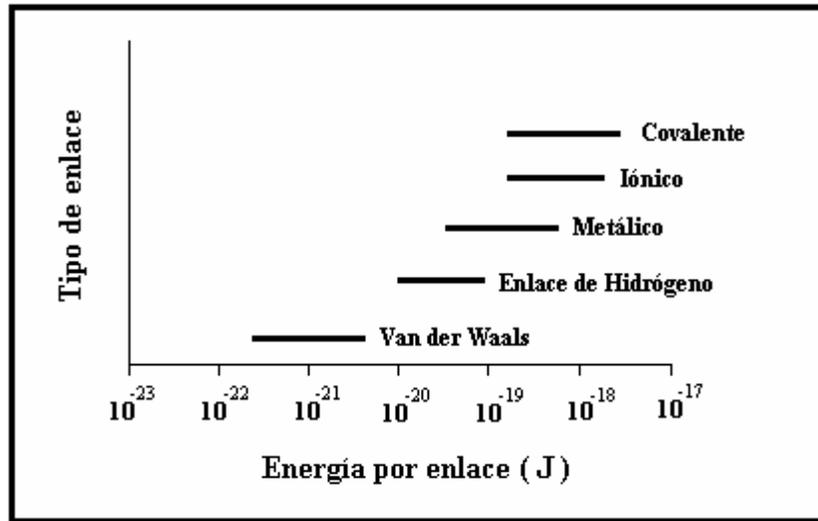


Figura 2.1. Tipos de enlaces más comunes entre recubrimiento y sustrato [2]

2.3.2. Tipos de interfases

El tipo de interfase formada durante la deposición depende de la morfología de la superficie del sustrato, contaminación, interacción química, la energía del flujo de partículas que llegan y el comportamiento de los átomos depositados.

Pulker (1984), clasificó las regiones interfasiales de acuerdo a sus características en: abrupta, compuesta (capa intermedia), difusional, pseudo-difusional (gradual), irregular y cualquier combinación de las anteriores [12]. Véase Figura 2.2.

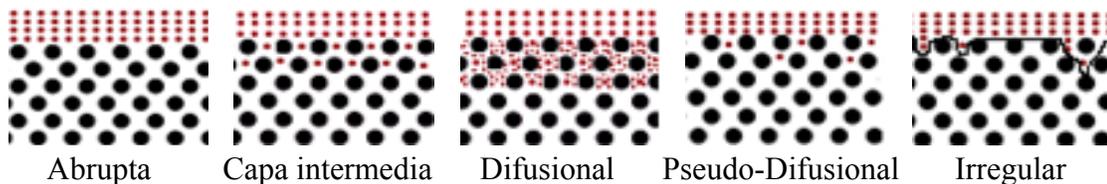


Figura 2.2. Representación esquemática de distintos tipos de interfases entre sustrato y recubrimiento [3]

Las interfases abruptas se forman cuando hay poca o ninguna reacción química entre recubrimiento y sustrato. Las regiones de interfases compuestas o de capas intermedias se forman cuando los materiales reaccionan y forman compuestos intermetálicos o químicos, y las interfases difusionales se forman cuando existe una solubilidad considerable entre los materiales del sustrato y recubrimiento. Las interfases pseudo-difusivas, se pueden formar por procesos de implantación de partículas altamente energizadas y se generan interfases graduales entre materiales que no se difunden mutuamente. Por último, se distinguen las interfases irregulares, las cuales se originan a partir de procesos de acabado en el sustrato (maquinado, lijado, etc.) y de su posterior oxidación.

Cuando los átomos chocan con la superficie, no llegan a depositarse inmediatamente. Éstos pierden energía en la superficie y se mueven sobre ésta hasta que son capturados en un lugar apropiado. En esta etapa, la película de adátomos crecidos puede condensar en núcleos estables, así, el espacio y tamaño de estos núcleos determinan la estructura en la interfase del recubrimiento.

Una muy buena interacción átomo sustrato/recubrimiento, resulta en baja movilidad adatómica y una alta densidad de núcleos, considerando que una interacción débil afecta en un mayor espacio entre núcleos. Estos átomos entonces pueden crecer para formar una película continua, durante el cual la velocidad a la que se extienden lateralmente los núcleos individuales puede determinar el área de contacto efectiva entre el recubrimiento y el sustrato que puede ser directamente relacionado con la adhesión.

El anclaje mecánico de la superficie puede ser producido por la rugosidad de la superficie del sustrato antes de recubrir. Esta técnica es frecuentemente usada para recubrimientos gruesos de rociado por plasma. Hay una tendencia a aumentar el área efectiva del contacto entre el recubrimiento y el sustrato que lleva a mejoras en la

adición de una forma similar al aumento de la densidad de nucleación descrito anteriormente. Este enlace entre el recubrimiento y el sustrato es raramente producido en algunas interfases y no se puede considerar como completamente mecánico. Ésto es promovido por el daño causado por el proceso de rugosidad y la mejora en la adhesión de recubrimiento de rociado por plasma se produce con una ráfaga con arena, que produce un mayor cambio en el área interfasial por este tratamiento.

Si hay adhesión entre el recubrimiento y el sustrato puede formarse una capa de compuesto interfasial que puede aparecer como una capa discreta. Tales capas pueden ser beneficiarias, pero si la capa producida es frágil, ésto puede afectar la adhesión. A menudo durante la formación de dichas capas de compuesto, hay segregaciones de impurezas en los límites de fases y se generan esfuerzos debido a un desorden en la red cristalina o diferencias en la expansión térmica. Debido a la deposición o aumento en la temperatura, aumenta el potencial para la formación de fase interfases.

La deposición o servicio a altas temperaturas no necesariamente lleva a la formación de compuestos, pero es posible que se active una difusión significativa entre el recubrimiento residual, y se generan esfuerzos a través de la región interfasial que usualmente lleva una muy buena adhesión. Si hay una diferencia marcada en los átomos de recubrimiento y sustrato, puede formarse una porosidad en la región interfasial que influye negativamente sobre la adhesión.

2.3.3. Evaluación de la adhesión

Los parámetros relacionados con la adhesión son tan complicados, que no existe en la actualidad una teoría general para predecir la adhesión práctica. El principal problema para comparar la adhesión de recubrimientos es que cualquier tipo de prueba de

adhesión crea un conjunto único de esfuerzos inducidos y consecuentemente el uso de datos de una prueba para predecir la adhesión del recubrimiento en cualquier otra situación es muy difícil.

En la actualidad, no hay un ensayo ingenieril tan favorable para medir la adhesión básica ni la fuerza de enlace interfásial. Sin embargo, un gran número de ensayos han sido propuestos para caracterizar la adhesión práctica de películas delgadas, los cuales se explican a continuación.

2.3.3.1. Ensayos mecánicos para la evaluación de la adhesión de películas delgadas

P. A. Steinmann y H. E. Hintermann [12] separaron los ensayos en dos grupos que se distinguen por el tipo de esfuerzos generados en la región de la interfase, llamados ensayos de tensión y ensayos de corte. Los ensayos de tensión, aceleración y ensayo de onda de choque pertenecen al grupo de ensayos tensiles, mientras que la cinta adhesiva, cizallante directo y el ensayo de rayado pertenecen al grupo de ensayos cizallantes.

La opción del ensayo para la medición práctica de la adhesión se basa en el tipo de esfuerzos que se encuentran en el espécimen a ensayar. Además, el ensayo ideal debe ser no destructivo, automatizado y fácil de ejecutar, fácil de interpretar, reproducible, y ser cuantitativo. En la siguiente sección se describen los principales ensayos para la medición de la adhesión práctica.

Ensayos de tensión:

Ensayo de tensión directa: Como se ilustra en la Figura 2.3, en estos ensayos una fuerza de tensión es aplicada al recubrimiento por medio de una pega. Las

principales dificultades se presentan en las películas porosas, en donde no se puede evitar la difusión del agente enlazante a través del recubrimiento, resultando en la modificación de las propiedades de la interfase, también en muchos casos, es difícil producir esfuerzos tensiles uniformes a lo largo del área a ensayar. Ésto es principalmente relacionado a la dificultad de ensayar el elemento perpendicular a la interfase sin desalinearla.

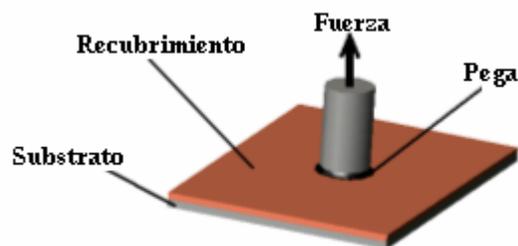


Figura 2.3. Ensayo de tensión directa [2]

Topple test: Este ensayo consiste en usar una geometría diferente para el elemento de la pega, igual al de la Figura 2.4, y aplicar la fuerza necesaria para desprender el recubrimiento paralelo a la superficie a ensayar. El valor de medición característico es el momento “ $F \times h$ ”, en donde h es la altura a la que la fuerza “ F ” es aplicada al elemento. De esta manera una región está en tensión pura mientras que la otra esta en compresión pura.

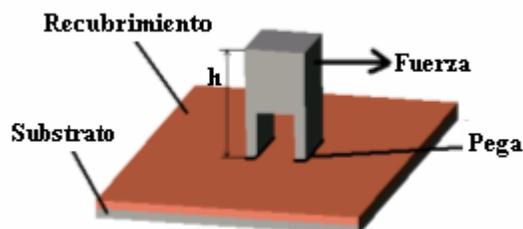


Figura 2.4. Ensayo Topple Test [2]

Esta técnica está todavía limitada por la resistencia mecánica de la pega, (aproximadamente 70 MPa.)

Ensayo de aceleración: Otra vía para generar esfuerzos tensiles en un recubrimiento con la ventaja de que no hay unión mecánica del objeto, consiste en generar una gran aceleración a la que está sujeta la fuerza de inercia. Los métodos más comunes son el método ultracentrífuga y el método ultrasónico.

Ensayo ultracentrífuga: En este ensayo, un recubrimiento cilíndrico es levantado electromagnéticamente y girado a una velocidad que incrementa hasta que el recubrimiento se separe del sustrato. Los esfuerzos tensiles creados en el recubrimiento se deben a las fuerzas centrífugas. La adhesión está dada por la relación:

$$Adhesión = \frac{F}{A} = 4\pi^2 * N^2 * r * \rho * d - \frac{N * d}{r} \quad (Ec. 1)$$

Donde “N” es la velocidad angular crítica, “r” es el radio cilíndrico, “ρ” y “d” la densidad y el espesor del recubrimiento, respectivamente. Las fuerzas de adhesión y cohesión tienen que ser especificadas con el fin de separar el recubrimiento. El término “σd/r”, donde σ es el esfuerzo de tensión del recubrimiento, es el término cohesivo y puede ser cancelado cuando el recubrimiento es naturalmente agrietado o cortado intencionalmente a lo largo del radio del cilindro. Véase Figura 2.5.

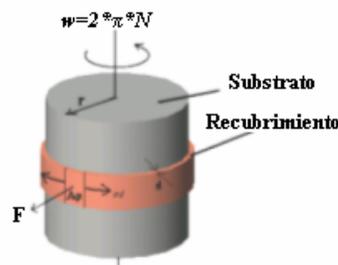


Figura 2.5. Ensayo ultracentrífuga [2]

Ensayo ultrasónico: El principio del segundo ensayo de aceleración es generar vibraciones ultrasónicas por medio de un transductor electromagnético o piezoeléctrico. La adhesión está dada por la relación:

$$Adhesión = \frac{F}{A} = \rho_C * d * a \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde “ ρ_C ” es la densidad del recubrimiento, “d” es el espesor del recubrimiento, y “a” la amplitud de la aceleración cuando el recubrimiento es separado del sustrato.

En ambos ensayos de aceleración, los esfuerzos tensiles, generados en el recubrimiento para separarlo del sustrato, son directamente dependientes de la masa del recubrimiento y, consecuentemente, del espesor. El ensayo de adhesión de películas de menos de 10 μm de espesor (películas delgadas) requiere extremadamente grandes aceleraciones que pueden ser sólo producidas por sofisticados y costosos instrumentos. Además, está estimado que los máximos valores que pueden ser medidos por este ensayo de aceleración son del orden de 10 MPa que son menores que la resistencia del adhesivo (pega).

Ensayo de onda de choque: El principio de este tipo de ensayo es el de crear una onda de choque compresivo en la muestra, la cual viaja desde el sustrato al recubrimiento perpendicular al exterior de la superficie. Esta onda tensil es entonces reflejada a la superficie como propagación de una onda de choque desde el recubrimiento hasta el sustrato, produciendo la separación del mismo si los valores de pico de esfuerzos exceden la adhesión del recubrimiento. El desprendimiento láser o la técnica de pulso láser es presentado como ejemplo.

Ensayo de impulso láser: Cuando la parte de atrás de la muestra a ser ensayada es expuesta a un impulso de energía láser, una onda de choque es generada en el recubrimiento en la muestra recubierta por la explosión de una capa absorbida térmicamente (véase Figura 2.6). La adhesión es caracterizada por la densidad de energía por unidad de área del impulso responsable de la separación del recubrimiento.

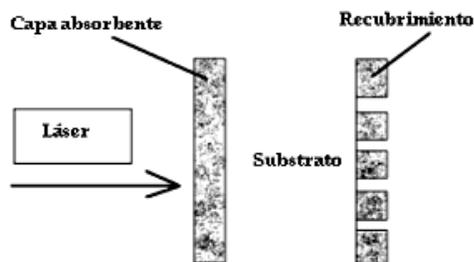


Figura 2.6. Ensayo de pulso láser [2]

Ensayos de cizalladura:

Ensayo de cinta adhesiva: Este ensayo es esencialmente de naturaleza cualitativa y es principalmente usado como control de calidad para recubrimientos débilmente adheridos (Figura 2.7). No obstante, se pueden obtener resultados semicuantitativos si se controlan las condiciones del ensayo tales como presión de pegado mientras se coloca la cinta sobre el recubrimiento, ángulo de retiro de la cinta y su velocidad de retiro. La adhesión es caracterizada por el área separada o por la energía de retiro de la cinta.

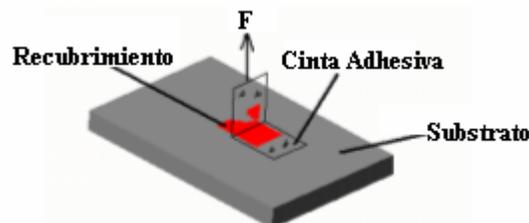


Figura 2.7. Ensayo de cinta adhesiva [2]

Ensayo cizallante directo: Este método es comparable al ensayo de tensión directa excepto que la fuerza aplicada en la pega o en el elemento soldado es ejercida paralela a la superficie del recubrimiento o por torsión del elemento. Este método sufre la misma limitante que el ensayo de tensión pura.

2.3.4. Ensayo de rayado (Scratch Adhesion Test)

A pesar de la diversidad de métodos de ensayos, la mayoría de los investigadores concuerdan en indicar que la prueba de rayado es en gran escala el método de prueba más práctico. Comparado con otros métodos, la prueba de rayado es confiable, simple de utilizar, no se requiere de preparación especial de muestra y es comúnmente utilizada para la evaluación cualitativa de la resistencia adhesiva o cohesiva de los recubrimientos delgados.

La prueba de rayado fue originalmente propuesta por Heavens (1950), quien utilizó una punta esférica de acero al cromo la cual fue desplazada sobre un recubrimiento [13].

Benjamin y Weaver (1950), dieron bases cuantitativas al método a fin de probar la adhesión de recubrimientos blandos [14]. Perry y Archer (1980), sugirieron unas pocas modificaciones para evaluar la adhesión de recubrimientos duros mediante la prueba de rayado e introdujeron esfuerzos en la interfase recubrimiento/substrato [15].

Los esfuerzos fueron introducidos mediante la deformación de la superficie del recubrimiento utilizando la indentación producida por el movimiento de una punta de diamante de 0,1-0,2 mm de radio y ángulo de cono de 120°. Sobre la punta se aplicó una carga, la cual debía ser incrementada durante el movimiento para que la

deformación ocasionara esfuerzos suficientemente elevados que originaran el fallo del recubrimiento.

Actualmente, el ensayo se realiza bajo el mismo principio, pero con otros accesorios que facilitan su ejecución (véase la Figura 2.8).

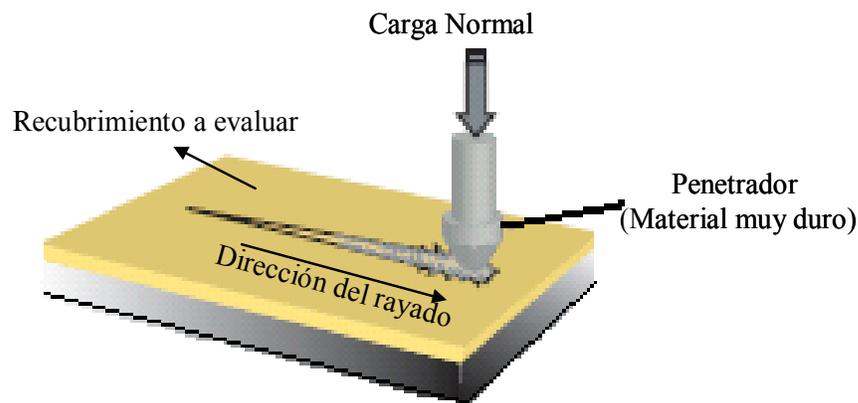


Figura 2.8. Esquema que ilustra el principio del ensayo de rayado [2]

En este ensayo una carga constante o progresiva es aplicada por un indentador esférico a través de la superficie de la muestra recubierta (Figura 2.8). La punta del indentador produce un incremento de la deformación elasto-plástico del sistema película/substrato hasta que el daño ocurre en la región de la superficie y puede ser de naturaleza adhesiva o cohesiva. La mínima carga a la que ocurre la falla es llamada carga crítica “ L_c ” y es representativa de la adhesión del recubrimiento.

La pérdida de cohesión en el recubrimiento y de la adhesión entre el recubrimiento/substrato son los mecanismos de falla dominantes. La Figura 2.9, muestra la relación entre el mecanismo y el resultado de daño macroscópico de grietas y delaminación. Es importante hacer notar, que cuando se analiza ópticamente (microscopio óptico de luz o microscopio electrónico de barrido: MEB) el daño observado y el estado de esfuerzos responsable no pueden ser correlacionados.

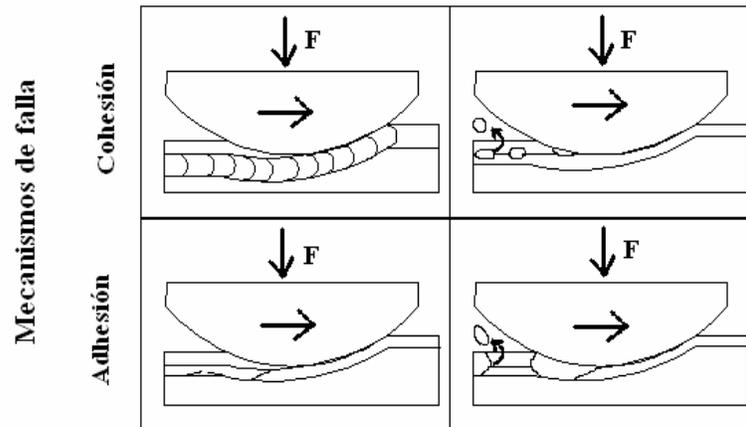


Figura 2.9. Principales mecanismos de falla y su relación con los tipos de daño observados en el ensayo de rayado [2]

Según Hinntermann y Steinmann [12], dependiendo del sistema recubrimiento/substrato a ser ensayado, la carga crítica puede ser determinada por la emisión acústica, por microscopía óptica o de barrido y por las variaciones de las fuerzas (normal, tangencial y lateral) aplicadas en el ensayo.

2.3.4.1. Determinación de la carga crítica

Observación microscópica: La observación del daño superficial por medio de un microscopio óptico, es el método más sencillo para determinar la carga crítica. Cuando se ensayan recubrimientos complejos o multicapas es requerido que el MEB tenga acoplado un EDX. Además, la observación microscópica proporciona información esencial acerca del modo de falla del recubrimiento, agrietamiento, astillado (chipping), desprendimiento (spalling o flaking). Ejemplos muy claros de modos de falla para agrietamiento y falla de tipo adhesivo se presentan más adelante.

Análisis por emisión acústica: Durante el ensayo de rayado, una vez que la carga crítica haya sido alcanzada, la emisión acústica (EA) se genera por la relación

que la energía interna guarda con la fuerza del recubrimiento. Una serie de golpes de ondas de choque son emitidos en la cual la amplitud corresponde a un daño producido en la región de la interfase.

Fuerzas tridimensionales: Potencialmente, el grabar las tres fuerzas “Fn” (fuerza normal), “Ft” (fuerza tangencial) y la “Fl” (fuerza lateral), puede ser útil para determinar la carga crítica. La fuerza normal aumenta proporcional a la carga aplicada en el punto de rayado. La fuerza tangencial es la de fricción o fuerza de rayado (en la dirección de rayado) y la fuerza lateral es la carga aplicada lateralmente por la muestra en el punto de rayado.

Los resultados obtenidos, principalmente con recubrimiento de –TiN- y –TiC- sobre aceros y carburos cementados [11], han indicado que la influencia del daño en las fuerzas normal y lateral es muy pequeña para ser usadas para la determinación de la carga crítica. El uso de la fuerza tangencial, puede proveer información complementaria al detector de emisión acústica y/o observación microscópica. Sin embargo, rara vez se determina la carga crítica en forma precisa. Ésto se debe principalmente a dos razones: la primera es que la señal de la fuerza de fricción no contiene información exclusiva de la pérdida de adhesión, y de la resistencia a la fricción (arrastre del sistema recubrimiento/substrato); la segunda razón es que la relación de la señal es baja y la carga crítica es siempre menor. En el caso de recubrimientos duros, esta relación es mucho menor que la correspondiente relación de la señal reemisión acústica.

2.3.4.2. Parámetros y factores que afecta la carga crítica en la prueba de rayado

La principal dificultad con la técnica del ensayo de rayado es la interpretación de los valores de carga crítica en términos de adhesión. El objeto principal de esta sección es

discutir sobre esta materia basándose en resultados experimentales obtenidos por algunos investigadores.

Además de la adhesión, la carga crítica depende de varios parámetros relacionados con las condiciones de ensayo y a la combinación recubrimiento/substrato a ensayar. Tanto los parámetros intrínsecos (velocidad de rayado, velocidad de aplicación de carga, radio del indentador y desgaste de la punta de diamante) como los parámetros extrínsecos (dureza del recubrimiento y substrato, coeficiente de fricción y fuerza de fricción, entre otros) han sido considerados en el orden de mejorar la interpretación de la carga crítica.

Parámetros intrínsecos:

Velocidad de aplicación de la carga y velocidad de rayado: En relación a la velocidad de aplicación de carga (dL/dt) y al recorrido (dx), muchas investigaciones han revelado que si la relación de variación de carga con la distancia (dL/dx) permanece constante, entonces la carga crítica es independiente de la velocidad de rayado (dL/dr). Véase Figura 2.10.

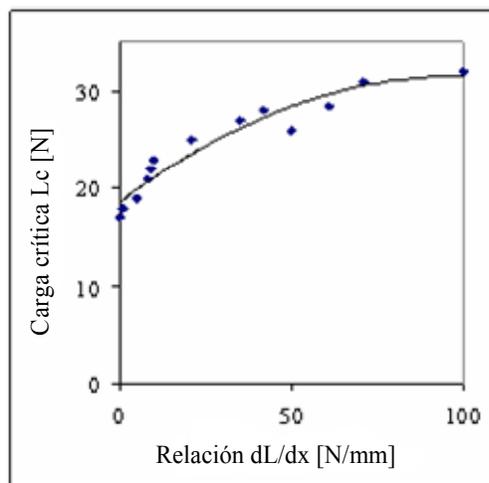


Figura 2.10. Influencia de la velocidad de rayado/velocidad de carga (dL/dx) con la carga crítica [2]

Radio de la punta del indentador: Investigaciones llevadas a cabo con radio de penetrador diferentes para simular distintas condiciones de contacto penetrador/material, han indicado que la carga crítica para inicio de deformación se incrementa con el radio “ r ” del penetrador y el esfuerzo de fluencia del material.

Desgaste de la punta de diamante: Generalmente las puntas que se usan para rayar son cristales de diamante natural orientado con una abscisa perpendicular a la superficie. El desgaste de estos diamantes es por supuesto una función de la dureza de los materiales sometidos a ensayos de rayado, y aumenta con el incremento tanto del substrato como del recubrimiento. Afortunadamente, se ha determinado que la carga crítica varía de un diamante a otro, pero que para un sólo diamante, la carga crítica no varía mucho con el número de rayas realizadas. Esto ha sido confirmado en un estudio tipo “round robin” realizado por Perry donde recubrimientos CVD-TiC y PVD/CVD-TiN se midieron mediante tres rayas diferentes [12].

Parámetros extrínsecos:

Dureza del substrato: Cuando se raya, la extensión de la deformación del sistema recubrimiento/substrato es principalmente definido por la deformación del substrato. En consecuencia, cuando la dureza del substrato aumenta, es necesaria una mayor carga para obtener la misma deformación plástica. Asumiendo que la carga crítica es determinada por el grado de deformación, entonces la carga crítica debe aumentar con la dureza del substrato.

Dureza del recubrimiento: Se ha encontrado que en los recubrimientos depositados mediante plasma, el aumento del voltaje aplicado al substrato mientras se deposita la película resulta en un aumento de los esfuerzos internos y la dureza del recubrimiento, lo cual corresponde a una disminución de la carga crítica.

Espesor del recubrimiento: Similarmente cuando aumenta el espesor del recubrimiento se requiere de una mayor carga para obtener el mismo grado de deformación y, por eso, la carga crítica aumenta con el espesor del recubrimiento.

Rugosidad del sustrato y recubrimiento: Ensayos de rayado realizados por J. Takadom et., al [16] y colaboradores indican que la adhesión del sistema recubrimiento/sustrato disminuye con el aumento de la rugosidad del sustrato. En el caso de la rugosidad superficial del sistema, o rugosidad del recubrimiento, P. A. Stainmann et al [17] y colaboradores observaron que para rugosidades mayores de 0,3 μm la carga crítica no puede ser representativa de la adhesión; porque el daño está principalmente localizado dentro del recubrimiento mismo, así que una falla como resultado de la adhesión es muy difícil de observar porque la rugosidad del recubrimiento dificulta la observación microscópica.

Tensiones residuales: Si el recubrimiento contiene esfuerzos residuales (caso normal en los recubrimientos delgados), una superposición de ellos con los esfuerzos ocasionados por las cargas externas aparece con consecuencias tales que las condiciones críticas para fractura cambiarán. Para demostrar esto, se han realizado muchos experimentos y determinaciones empíricas.

De muchos estudios experimentales se ha conocido que la carga crítica para ocasionar el levantamiento del recubrimiento disminuye en la medida en que los esfuerzos residuales en el recubrimiento aumentan. Para muchos de estos casos, los esfuerzos residuales fueron incrementados mediante el aumento de la energía o flujo de iones bombardeados durante la deposición [18].

Otros estudios han demostrado que debido al nivel de tensiones residuales, el esfuerzo tensil crítico para grietas cohesivas es inferior que el esfuerzo de fluencia estimado y además se ha llegado a comprobar que los esfuerzos residuales

compresivos permiten gran deformación sin fractura de la muestra recubierta. Se ha llegado a concluir que los altos niveles de tensiones residuales compresivos evitan el agrietamiento si la carga externa actuante genera regiones extendidas con esfuerzos tensiles. Es decir, los esfuerzos residuales son opuestos por las fallas cohesivas y adhesivas.

Coefficiente de fricción o rozamiento: En el transcurso de la prueba, la fuerza de fricción se incrementa a medida que el penetrador se hunde en el recubrimiento, el coeficiente de fricción aumenta rápidamente dependiendo de la energía absorbida por el recubrimiento en su deformación y aún más cuando el sustrato se deforma y el recubrimiento fractura al frente del penetrador. A mayor deformación, mayor será la fricción (el área de contacto geométrico se incrementa), la mayor fuerza de fricción y la disminución de la carga crítica.

Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad de los recubrimientos delgados tiene una gran influencia en el campo de las tensiones por contacto, la delaminación y despegue, la fractura del recubrimiento, el estado de tensiones residuales dentro del recubrimiento, etc. La mayoría de los recubrimientos delgados tienen un Módulo de Young que excede el del sustrato, y también un coeficiente de expansión térmica más bajo. Por otra parte, el hecho de que el sustrato y el recubrimiento tengan diferentes módulos de elasticidad, contribuye a una desviación favorable de la grieta que se forma en el recubrimiento, lo cual es beneficioso. Una grieta que se propaga en dirección a la interfase tiende a desviarse en una dirección paralela a la interfase. En servicio, la carga crítica para esta ocurrencia marcaría la diferencia entre una falla parcial (sólo delaminación o despegue del recubrimiento) y una falla total (fractura por una grieta que se propaga en el sustrato).

Adhesión entre el recubrimiento y el indentador: La adhesión entre el indentador y el recubrimiento también tiene una gran influencia sobre la carga crítica.

Ésto se explica a partir de dos experimentos. En el primero, sistemas similares de recubrimiento/substrato han sido rayados por indentadores hechos de diferentes materiales, diamante y nitruro de boro cúbico (CBN). Para recubrimientos de TiN el coeficiente de fricción del CBN es mayor que el coeficiente de fricción en diamante. La carga crítica ha sido medida con ambos indentadores y se han encontrado más bajos usando CBN que usando diamante. Se concluye que mientras mayor adhesión existe entre el indentador y el recubrimiento la carga crítica disminuye. En el segundo experimento, el recubrimiento de TiN se cubrió con una capa delgada de otro metal con la idea de cambiar la adhesión entre el recubrimiento y el indentador. Se encontró que la capa superior metálica puede repercutir en la carga crítica si la fricción entre el indentador y el recubrimiento aumenta.

2.3.4.3. Teoría y modelado de la prueba de rayado

La prueba de rayado implica deformación del material en forma elástica y plástica hasta que la película es separada del substrato. El uso de la carga normal crítica como una medida semicuantitativa de la adhesión, es sólo apropiado para comparación entre sistemas de recubrimiento donde los materiales de los sistemas son muy parecidos. Bajo estas circunstancias, la prueba de rayado es ampliamente utilizada para el monitoreo rutinario de la adhesión en los procesos de recubrimiento. Sin embargo, cuando los materiales del recubrimiento y del substrato en diferentes sistemas son diferentes, la comparación de la adhesión entre recubrimiento y substrato para estos sistemas no pueden obtenerse por simple comparación de las cargas críticas normales ya que los resultados van a depender de factores tales como el coeficiente de fricción entre la punta de diamante y el recubrimiento, las propiedades mecánicas del recubrimiento y substrato, así como del espesor del recubrimiento. Estos parámetros generan estados de esfuerzos particulares en el recubrimiento de cada sistema.

Muchos intentos han sido realizados para modelar la resistencia de la adhesión, el trabajo de adhesión y los esfuerzos inducidos por el penetrador en la prueba de rayado [19]. En cuanto a los esfuerzos inducidos por el penetrador, la mayoría de los modelos sólo consideran la presión media ejercida por el penetrador en el sistema recubrimiento/substrato en vez de los esfuerzos en el recubrimiento. En la actualidad, no son posibles los cálculos precisos para evaluar los esfuerzos introducidos en el recubrimiento por el penetrador en la prueba de rayado. Sin embargo, se han logrado muy buenas estimaciones al asumir que los esfuerzos totales inducidos por un penetrador en movimiento, son la superposición de las tensiones inducidas por indentaciones cuasiestáticas, los esfuerzos residuales derivados del procesamiento y por la tracción tangencial del penetrador en movimiento.

El modelo desarrollado por Bull y Rickerby [18] ha sido ampliamente utilizado para estimar el trabajo de adhesión. Este modelo fue basado en la suposición de que el recubrimiento se despega desde el substrato para minimizar su energía elástica almacenada. Se supone que la energía elástica almacenada en un recubrimiento puede liberarse mediante la formación de grietas, astillas o deformación plástica. La aproximación del balance energético de Griffith ha sido utilizado para relacionar la disipación de energía de deformación con la energía superficial requerida para formación de grietas en la interfase recubrimiento substrato, y el esfuerzo “ σ ” responsable de la falla en la interfase es relacionada al trabajo de adhesión “ W ” mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{1}{2} t \frac{\sigma^2}{E_c} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde “ t ” es el espesor y “ E_c ” es el Módulo de Young del recubrimiento.

Burnett y Rickerby [20] identificaron tres componentes en el esfuerzo responsable de la falla en el recubrimiento. Dichas componentes son el resultado de la contribución compleja de las cargas aplicadas y del deslizamiento del indentador de diamante. La Figura 2.11 muestra los esfuerzos aplicados e inducidos durante la prueba de rayado.

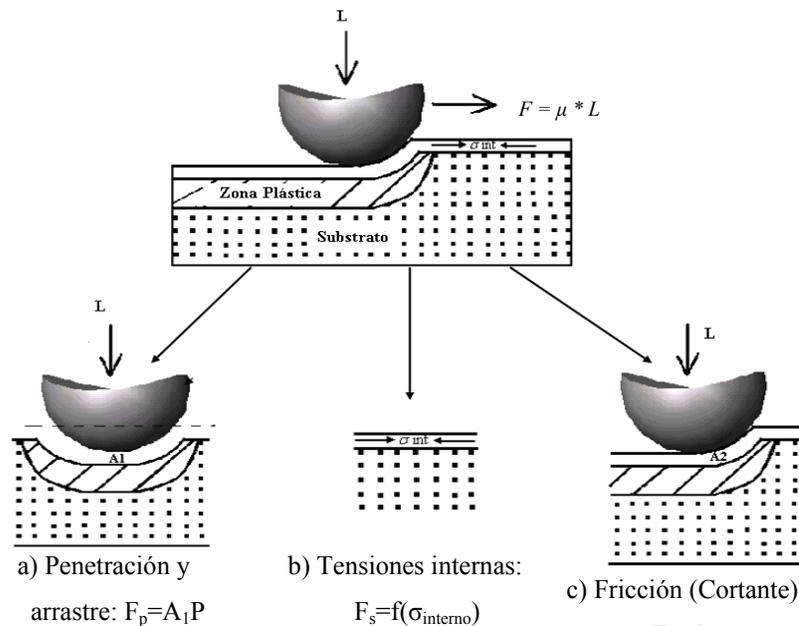


Figura 2.11. Contribuciones al despegue de la capa de recubrimiento en la prueba de rayado (según modelo de Burnett y Rickerby) (Fuente: Burnett, S.J., and Rickerby, D.S.) [3]

El esfuerzo total responsable de las fallas en los recubrimientos consiste de los esfuerzos residuales que permanecen en el recubrimiento, y de los esfuerzos inducidos por el penetrador o punta. Los esfuerzos residuales pueden ser evaluados por ciertas técnicas tales como difracción de rayos X. La contribución de cada uno de estos esfuerzos son expresados en términos de sus efectos sobre la fuerza total de fricción “F”, tal como se indica en la representación esquemática de la Figura 2.11.

$$F = F_p + F_s + F_a \quad (\text{Ec. 4})$$

Al ignorar las tensiones internas, se obtiene:

$$F = A_1\sigma_p + A_2\tau \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde “A₁” y “A₂” son respectivamente las áreas de sección transversal de la huella y de contacto. El área de contacto A₂ se asume que es muchísimo mayor que A₁, de manera que este modelo predice que el esfuerzo cortante es pequeño en comparación con el esfuerzo de indentación, y en concordancia con esto, el esfuerzo de indentación contribuye en mayor proporción en la remoción del recubrimiento:

$$F = F_p = A_1\sigma_p \quad (\text{Ec. 6})$$

Al asumir que para el penetrador en movimiento, la carga es soportada sobre sólo la mitad del frente del área de contacto, se tiene:

$$\sigma_p = \frac{2F}{A_1} \quad (\text{Ec. 7})$$

Igualando las ecuaciones (7) y (3) y suponiendo “F=L_c” (fuerza fricción igual a la carga normal crítica), se obtiene la expresión final de este modelo:

$$L_c = \frac{\pi d_c^2}{8} \left[\frac{2EW}{t} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde “d_c” es el ancho de huella y diámetro del área de contacto, “t” es el espesor del recubrimiento y “E” es el Módulo de Young del recubrimiento.

Bull et al. [21] consideraron un análisis similar al realizado en el modelo anterior, donde la fuerza de fricción “F” es la suma lineal de todas las componentes debido a las fuerzas inducidas por el penetrador “F_p”, la interna o residual “F_s”, y la fuerza de adhesión “F_a”, Introdujeron los términos de la razón de Poisson “ν” y el coeficiente de fricción “μ_c” en la Ec. 9 de Burnett y Rickerby y obtuvieron una nueva ecuación:

$$L_c = \frac{A_1}{\nu\mu_c} \left[\frac{2EW}{t} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 9})$$

Se argumenta con este nuevo modelo que el despegue o delaminación del recubrimiento desde el substrato ocurre cuando los esfuerzos compresivos en la interfase introducen esfuerzos tensiles normales a la interfase debido al efecto Poisson. “A₁” es la sección de área transversal y se ha sugerido que la misma puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$A_1 = R^2 \text{sen}^{-1} \left(\frac{d}{2R} \right) - \frac{d}{2} \left\{ R^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde “R” es el radio del indentador o punta y “d” es el ancho de la huella.

En este modelo se asume que los esfuerzos cortantes no tienen un efecto significativo sobre el despegue. Es sólo el esfuerzo compresivo en la interfase o el esfuerzo tensil normal a la interfase lo que ocasiona el despegue.

Para calcular el esfuerzo compresivo en un recubrimiento, se deben conocer sus propiedades mecánicas que determinan su deformación por contacto, es decir: Módulo de Young, razón de Poisson y esfuerzo de fluencia, pero estas propiedades

mecánicas de los recubrimientos delgados no podían ser evaluadas cuando el modelo de Bull y Rickerby fue desarrollado.

Recientemente, F. Attar y T. Johannesson [19] sugirieron una extensión (al modelo de Burnett y Rickerby) para el caso donde exista delante del indentador una combinación de esfuerzo cortante y tensil en la interfase recubrimiento/substrato, y también para cuando pueda ocurrir deformación plástica en el recubrimiento de la misma manera que ocurre en el substrato. Véase Figura 2.12.

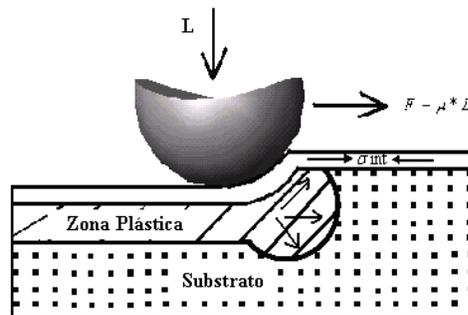


Figura 2.12. Falla interfasial por rompimiento del recubrimiento al frente del penetrador (según modelo sugerido por F. Attar y T. Johannesson) [3]

A partir de este modelo se estima que el mecanismo de falla es diferente del esperado en el modelo de Burnett y Rickerby. Para el caso señalado en la Figura 2.12 (modelo de Burnett y Rickerby) la falla ocurre delante del penetrador pero el recubrimiento es comprimido durante el desplazamiento y no se rompe ni se astilla. En este nuevo modelo, la falla interfasial que ocurre al frente del penetrador se presenta por despegue y astillamiento simultáneo. El modelo considera que para la formación de grieta en el recubrimiento que se encuentra al frente del indentador cuando ocurre la carga crítica, el área sobre la cual actúa la fuerza de fricción es la sección transversal del recubrimiento:

$$A_1 = td \quad (\text{Ec. 11})$$

El esfuerzo responsable de la remoción del recubrimiento cuando se obtiene la carga crítica, es el esfuerzo tensil normal a la interfase y viene dado por:

$$\sigma = \frac{\nu F}{A_1} = \frac{\nu \mu L}{dt} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde “F” es la fuerza de fricción tal como se indica en la Figura 2.12.

Si se igualan las ecuaciones (12) y (3) se tiene:

$$L_c = \frac{d_c}{\nu \mu_c} (2tEW)^{1/2} \quad (\text{Ec. 13})$$

Esta expresión muestra una proporcionalidad directa entre la carga normal crítica y el espesor del recubrimiento, lo cual ha sido observado experimentalmente y también muestra la importancia del coeficiente de fricción entre el indentador y el recubrimiento, así como la razón de Poisson.

2.3.4.4. Modos de falla en la prueba de rayado

Las diferentes técnicas de pruebas, determinan el tipo de carga a aplicarse en un determinado ensayo, mientras que la dureza, el espesor, los esfuerzos residuales así como la adhesión interfásica determinan las propiedades elásticas y plásticas del recubrimiento. La apariencia de los diferentes patrones de deformación y grietas en la superficie del recubrimiento es el resultado de la interacción del procedimiento de ensayo y de la deformación elasto-plástica en el sistema recubrimiento/substrato.

La técnica de rayado sólo puede proveer valores experimentales de las cargas actuantes en la prueba. La extensión y forma de las zonas de deformación plástica (en el recubrimiento y sustrato) que contribuye a la separación de los materiales no es evaluada mediante la técnica del rayado. Sin embargo, el estudio post-facto de la apariencia de la superficie rayada ha servido para identificar los posibles mecanismos de deformación y fractura que se pudieran presentar en alguna aplicación de un recubrimiento dado. En una observación primaria de las características de la huella de rayado se puede establecer que por debajo de la carga crítica la superficie de la raya se presenta lisa y sin interrupciones y por encima de ésta se pueden encontrar diferentes patrones de deformación elasto-plástica y de grietas que definen un rango de diferentes modos de fallas activos [10]. Véase Figura 2.13.

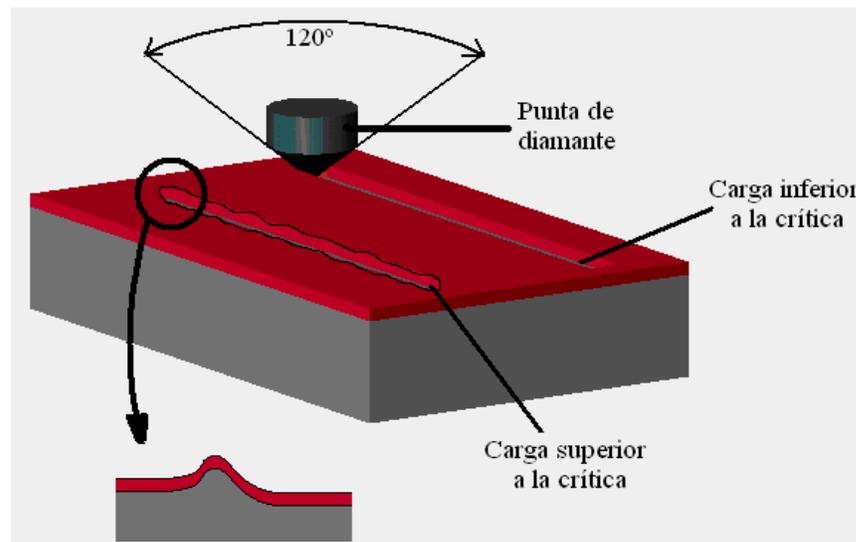


Figura 2.13. Representación esquemática de la punta de diamante y de la apariencia general de la raya obtenida por debajo y por encima de la carga crítica durante la prueba de rayado [3]

Dependiendo de las propiedades frágil-dúctil del recubrimiento y del sustrato, numerosas fallas pueden ocurrir en alguna aplicación. El principal modo de falla se muestra esquemáticamente en la Figura 2.14.

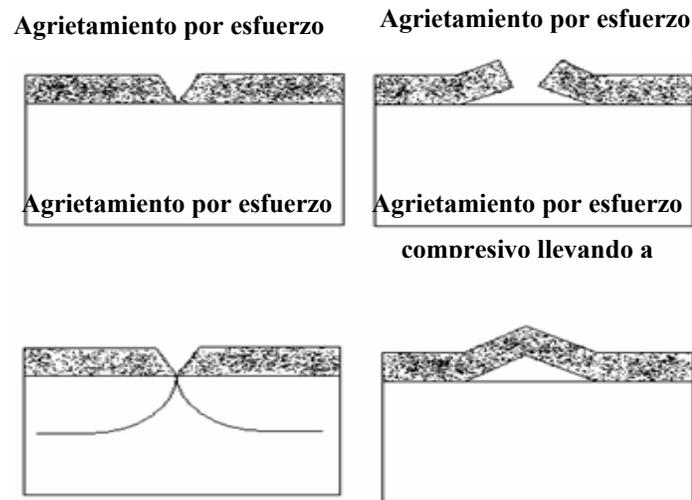


Figura 2.14. Representación esquemática de la superficie de la grieta que puede llevar a la separación del recubrimiento bajo esfuerzo compresivo o de tensión [3]

Aunque la falla puede comenzar en la interfase ésta puede propagarse hasta el sustrato. Sucesivamente, el agrietamiento a través del espesor puede llevar a fallar la interfase recubrimiento/sustrato. La aplicación de esfuerzos de tensión y compresión pueden generar fallas y la localización de estas fallas dependen de la fragilidad del sustrato y del recubrimiento. En el caso más simple, cada aplicación de esfuerzos puede ser interna al recubrimiento e introducirlos durante la deposición, o los esfuerzos por el desajuste en la expansión térmica que se generan en frío. Estos esfuerzos generalmente limitan el espesor máximo del recubrimiento que puede ser depositado antes de que ocurra el desprendimiento espontáneo.

Las fallas interfasiales que llevan a la pérdida del recubrimiento son dependientes de la fractura. Para la mayoría de los sistemas dos propiedades de fractura son importantes, definidas como el esfuerzo requerido para iniciar la fractura y el esfuerzo requerido para la propagación. El esfuerzo de iniciación es una función de la distribución de la grieta en la región de la interfase que debe depender de la contaminación de la superficie y proceso de deposición, tal como en el caso del

substrato y el recubrimiento. El esfuerzo de propagación de la grieta está influenciado en un mayor grado por la estructura interfásial y la composición. En un material dúctil los esfuerzos en la punta de la grieta son relajados por la deformación plástica del material alrededor y así una mayor cantidad de energía es necesaria para propagar la grieta que para un material frágil donde esto no ocurre. Por esta razón, el área de la grieta interfásial es mucho menor para un material dúctil que para un material frágil bajo condiciones similares de carga y la adhesión de recubrimiento sobre substratos donde las fallas ocurren en un modo dúctil es aparentemente mucho mejor que para substratos frágiles. El control de la iniciación de la falla puede con frecuencia ser realizado mejorando la limpieza del sistema de recubrimiento donde el control de la conducta de propagación de la grieta requiere un mayor entendimiento detallado de la composición interfásial. Por ello, es importante caracterizar los modos de falla asociados con una aplicación y el diseño de la región interfásial para que ocurran fallas dúctiles en una región de alta energía.

S.J. Bull [22] afirma que para recubrimientos duros sobre un substrato suave los modos de falla por desprendimiento o pandeo producen separación, pero se puede observar un intervalo de otra grieta y la región de deformación. Para recubrimientos duros sobre substratos duros se observa que el astillado en el ensayo de rayado es casi idéntico a la fractura lateral observada en los ensayos de rayado de cerámicos. Los modos de falla en el ensayo de rayado de recubrimientos duros pueden ampliamente ser introducidos dentro de tres categorías:

1. Grietas a través del espesor: Incluyen grietas tensiles comenzando detrás del indentador, grietas conformales (como cuando el recubrimiento es doblado dentro de la huella) y grietas Hertzianas.
2. Desprendimiento: Incluye desprendimiento compresivo delante del indentador, desprendimiento por pandeo delante del indentador y recuperación elástica inducida por desprendimiento detrás del indentador

3. Astillado en el recubrimiento: Semejante a las grietas laterales en las cerámicas.

El tipo de falla que es observado para un sistema dado de recubrimiento/substrato depende de la carga del ensayo, espesor del recubrimiento, los esfuerzos residuales en el recubrimiento y las propiedades en el substrato. Generalmente la carga crítica a la que un primer modo de falla ocurre a lo largo de la raya es usada como un método de evaluación de la adhesión.

Bull definió que para recubrimientos duros sobre substratos suaves hay tres principales tipos de fallas relacionadas con la adhesión:

1. Pandeo: Este modo de falla es el más común para recubrimientos delgados. La falla ocurre en respuesta a los esfuerzos compresivos generados delante del indentador en movimiento (Figura 2.15e-h). La región localizada contiene defectos interfaciales permitiendo al recubrimiento formar un bucle en respuesta a los esfuerzos. Bucles individuales pueden entonces expandirse lateralmente por la propagación de una grieta interfacial. Los resultados del desprendimiento cuando la grieta atraviesa el espesor forma una región de altos esfuerzos tensiles dentro del recubrimiento (Figura 2.15g). La presencia de material acumulado delante del indentador puede reforzar este modo de falla. Una vez que el pandeo ha ocurrido el indentador pasa por encima de la región de la falla aplastando el recubrimiento dentro de la superficie de la huella de rayado formada en el substrato. En ese momento, puede ser reforzada la remoción del recubrimiento o la falla puede desaparecer completamente dependiendo del tipo y la tenacidad del recubrimiento. Las fallas por pandeo aparecen como grietas curvas extendiéndose al eje o más allá del canal de rayado. La región de desprendimiento asociadas con fallas de pandeo tiene ejes perpendiculares a la interfase recubrimiento/substrato.

2. Desprendimiento de cuña: Una vez que el espesor crítico del recubrimiento es activado, el recubrimiento se vuelve demasiado duro para formar un bucle y reducir los esfuerzos delante del indentador. Se forman grietas por esfuerzos compresivos a través del espesor del recubrimiento antes de que la falla interfasial sea observada (Figura 2.15a-d). Estas grietas tienen lados inclinados (Figura 2.15b) y el continuo movimiento delante del indentador estampa el recubrimiento inmediato, bajo el segmento limitado por la grieta de corte que causa la decohesión de la interfase.

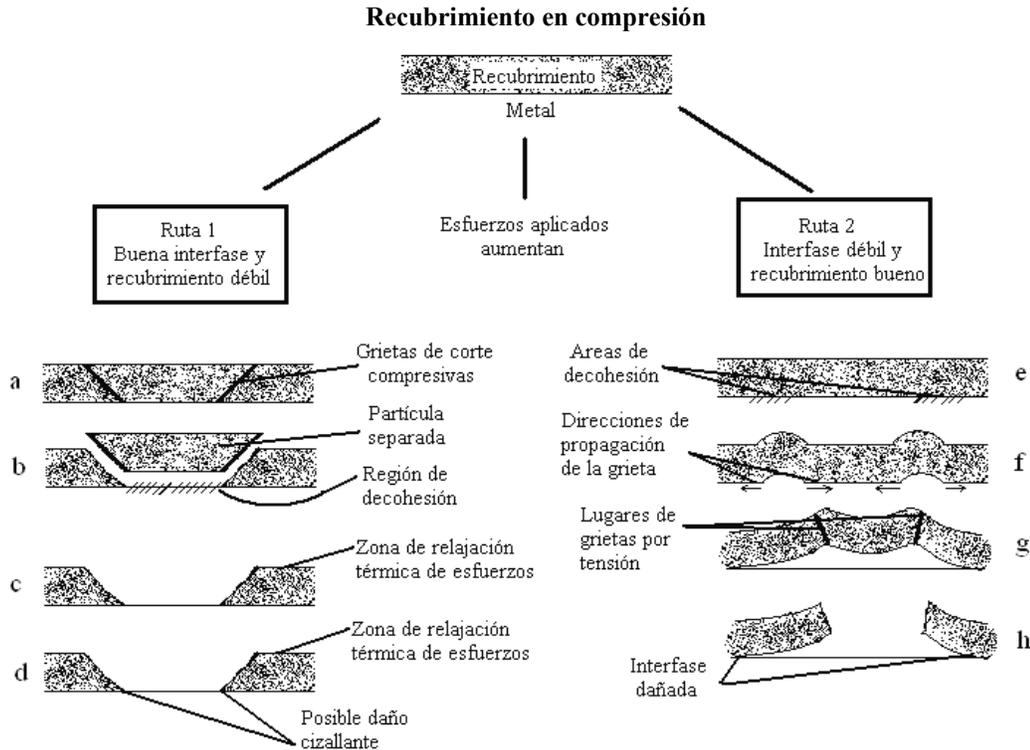


Figura 2.15. Agrietamiento y desprendimiento causado por esfuerzos compresivos en el recubrimiento: (a) desarrollo de grietas de corte; (b) grietas en forma de cuña; (c) relajación de esfuerzo local atérmico; (d) relajación de esfuerzos térmicos; (e,f) recohesión localizada conduce a pandeo; (f) bucles propagándose lateralmente para unirse; (g,h) desarrollo de grietas tensiles en la región de esfuerzos de tensión y llevan luego al desprendimiento [2]

Desprendimiento con recuperación: Este modo de falla está asociado con la recuperación que ocurre detrás del indentador cuando avanza sobre la superficie recubierta y depende de la deformación plástica en el sustrato y de la grieta a través del espesor del recubrimiento. Después de que el indentador pasa y la región que se ha rayado es descargada, la deformación elástica en el sistema recubrimiento/sustrato es relajada. Sin embargo, debido a la deformación plástica en el sustrato, que resulta en la deformación de la huella de rayado, no es posible relajar completamente la deformación elástica ni los esfuerzos residuales remanentes. Si la grieta ocurre a través del espesor del recubrimiento cualquier esfuerzo residual puede ser relajado completamente y cerca de estas grietas los esfuerzos de recuperación tensiles en el recubrimiento son convertidos en esfuerzos de corte en la interfase. La propagación de grietas de corte interfaciales debido a estos esfuerzos pueden llevar al desprendimiento en cualquier lado de la huella de la raya. Este modo de falla no es generalmente observado para recubrimientos duros sobre sustratos suaves donde la adhesión es buena.

S. J. Bull logró identificar un intervalo de posibles modos de falla que pueden ocurrir durante el ensayo de rayado y sólo algunos de éstos son dependientes de la adhesión; otros modos de falla que dependen de la deformación plástica y la fractura del recubrimiento, más que una falla adhesiva en la interfase recubrimiento/sustrato, quizás sean útiles sólo para el control de calidad en aplicaciones tribológicas.

La falla debe ocurrir como el resultado de la separación de la interfase recubrimiento/sustrato la cual no es siempre muy fácil de identificar. Así un evento reconocible a lo largo de la huella es generalmente usado, tal como el completo desgarre (stripping) del recubrimiento al no cubrir el sustrato o la aparición de astillas (chipping) regulares a lo largo de la huella, lo cual está relacionado a la adhesión recubrimiento/sustrato pero no de una forma simple.

2.3.4.5. Clasificación de los modos de falla de los recubrimientos

Dependiendo de la relación que exista entre la carga crítica y la dureza del sustrato, la falla de un recubrimiento puede ser dúctil o frágil. En general, para una falla dúctil, el área del sustrato sin recubrir es pequeña y confinada al interior de la huella, mientras que la falla frágil es más extensiva y a menudo sobrepasa los límites de la raya. La fractura dúctil es generalmente observada para materiales de sustrato dúctil, mientras que la falla frágil está asociada con materiales de sustratos cerámicos duros. Sin embargo, algunos materiales tales como el acero inoxidable pueden mostrar ambos comportamientos, dependiendo de la preparación de la muestra. Las cargas críticas para falla dúctil son mucho más altas que las observadas para materiales frágiles, aún en aquellos de dureza comparable.

Los modos de falla para recubrimientos y sustratos dúctiles y frágiles, han sido analizados teóricamente para geometrías de cargas muy simples. Para sustratos dúctiles, la falla interfásial puede ocurrir tanto para esfuerzos de tensión como de compresión si la adhesión interfásial es pobre, pero la falla tiende a ocurrir dentro del recubrimiento si la adhesión es buena. Para sustratos frágiles, la decohesión es observada nuevamente para esfuerzos tensiles y compresivos si la adhesión es pobre, pero existe también una probabilidad razonable para el agrietamiento interfásial por esfuerzos tensiles aún si la adhesión es buena. Además, si la falla ocurre dentro del sustrato (como en el caso de una película frágil sobre un sustrato frágil con buena adhesión bajo esfuerzos compresivos) esto puede llevar a un astillamiento y pérdida del recubrimiento. Debido a que el campo de esfuerzos generados en el sistema recubrimiento/sustrato es muy complejo, facilita la activación de todos los posibles modos de falla antes mencionados. En las Tablas 2.3 y 2.4 se resumen los modos de falla más comunes de los sistemas recubrimientos/sustratos según la norma ASTM C1624-05.

Tabla 2.3. Características y origen del modo de falla frágil en el ensayo de rayado [23] (Fuente: ASTM Designation: C-1624)

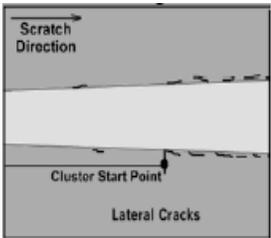
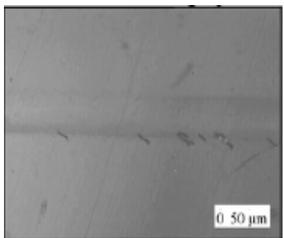
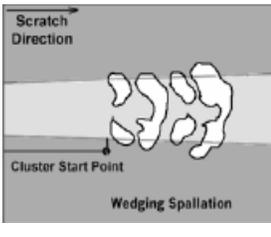
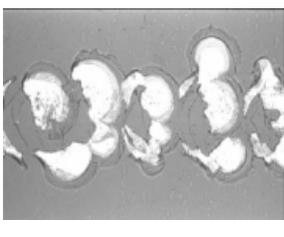
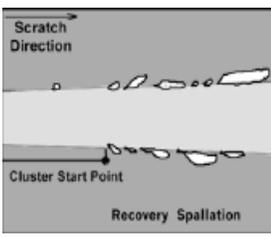
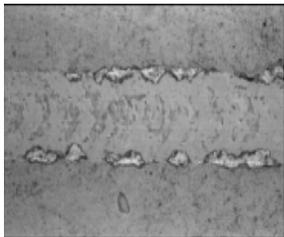
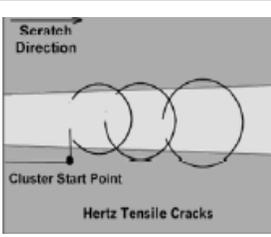
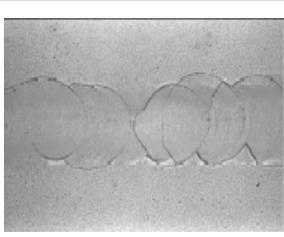
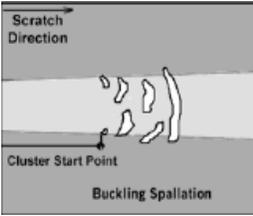
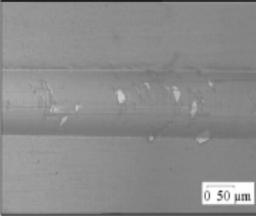
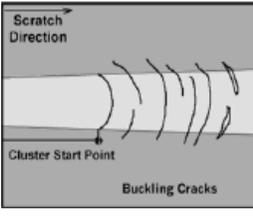
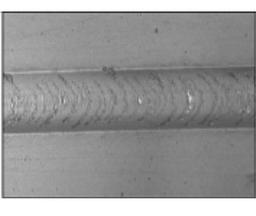
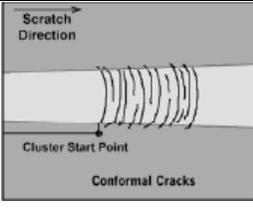
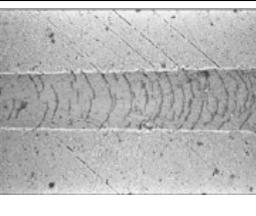
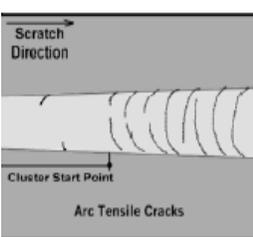
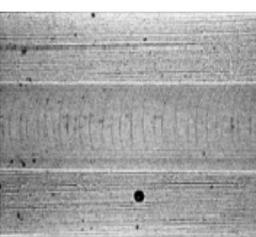
Condiciones del Sistema	Características de la falla	Origen o causa de la falla	Apariencia	Micrografía Mag. 100X
- Alto nivel de esfuerzos residuales. - Adhesión pobre y menor ocurrencia cuando la adhesión es buena. -Recubrimiento frágil/ substrato frágil. Recubrimiento frágil/ substrato dúctil. -Recubrimiento grueso y en menor proporción en recubrimientos delgados.	a) Grieta interfásial con propagación lateral fuera del trazo de la huella.	Liberación de energía elástica almacenada.		
	b) Grietas semicirculares con propagación y astillamiento lateral.	Desprendimiento compresivo delante del penetrador.		
	c) Grietas y astillamiento lateral a través del espesor del recubrimiento.	Recuperación elástica del recubrimiento y substrato.		
	d) Anillos Hertzianos.	Esfuerzos tensiles radiales.		

Tabla 2.4. Características y origen del modo de falla dúctil en el ensayo de rayado [23] (Fuente: ASTM Designation: C-1624)

Condiciones del Sistema	Características de la falla	Origen o causa de la falla	Apariencia	Micrografía Mag. 100X
-Bajo nivel de tensiones residuales. -Adhesión buena o pobre.	a) Grieta interfásial confinada en el interior de la huella	Desprendimiento compresivo al frente del penetrador por adhesión pobre		
	b) Propagación de bucles al frente del penetrador	Deformación plástica y levantamiento interfásial (buckling)		
-Recubrimiento frágil/substrato dúctil	c) Agrietamiento conformal	Doblado y agrietamiento al frente del penetrador		
-Recubrimiento frágil delgados	d) Arcos de grietas con curvatura contraria a la dirección del penetrador	Agrietamiento tensil		

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Procedimiento Metodológico

La realización de este trabajo de investigación fue concebida para llevarse a cabo mediante cinco etapas basadas fundamentalmente en los objetivos planteados al inicio del mismo. Estas etapas se planificaron para ser concretadas de manera secuencial, jerarquizada, sistemática y metódica a lo largo de lapsos de tiempo establecidos. Las cinco fases empleadas para la ejecución de este proyecto, se ilustran una a una a través de mapas o esquemas conceptuales que representan las actividades más resaltantes realizadas en cada una de ellas. Las fases o etapas seguidas se indican a continuación:

- Primera etapa: Revisión bibliográfica.
- Segunda etapa: Diseño de la máquina de rayado.
- Tercera etapa: Construcción de la máquina de rayado y elaboración del manual de uso de la misma.
- Cuarta etapa: Caracterización de probetas y realización de pruebas para la evaluación de la adhesión de recubrimientos sobre substratos.
- Quinta etapa: Análisis de los resultados.

3.1.1. Primera etapa. Revisión bibliográfica: Determinación de las variables que inciden en la adhesión de recubrimientos sobre substratos metálicos y cerámicos

La primera etapa se representa en la Figura 3.1.

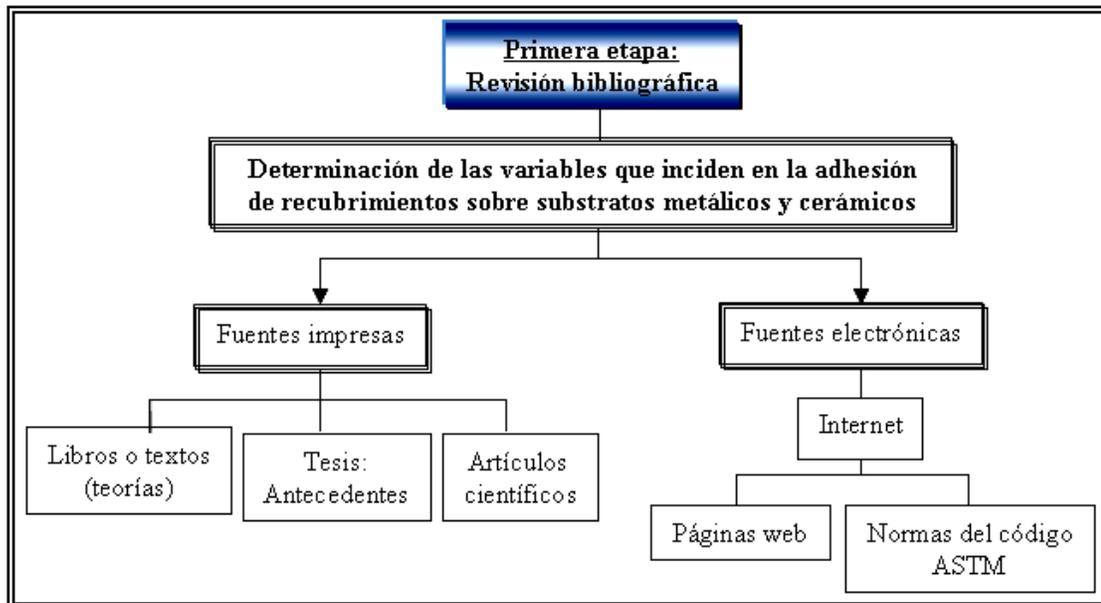


Figura 3.1. Etapa inicial cumplida para la realización de este trabajo

Como se observa en la Figura 3.1, a través de la revisión bibliográfica se pudo determinar las variables más importantes (según diferentes autores e investigaciones) que inciden en la resistencia de la adhesión de recubrimientos sobre sustratos metálicos y cerámicos; ésto se hizo posible consultando fundamentalmente dos tipos de fuentes: las impresas y las electrónicas.

En otro plano, con las primeras fuentes, se adquirió información sobre parte de las bases teóricas del tema, como lo son: recubrimiento, adhesión, modelos y posibles mecanismos o modos de falla de los recubrimientos. Asimismo, se encontraron algunos trabajos relacionados con éste, consultados en las instalaciones de las Bibliotecas de la Universidad de Oriente (UDO), Universidad Central de Venezuela (UCV) y Universidad Simón Bolívar (USB). Los artículos científicos sirvieron para conocer el modelaje de la prueba de rayado realizado por algunos investigadores, información ésta muy importante y poco encontrada en textos sobre el área. Con el uso de las fuentes electrónicas, principalmente Internet, se consultaron páginas Web referentes al tema de recubrimientos (tradicionales y de última generación,

información técnica de recubrimientos, procesos de deposición, etc.), máquinas existente en el mercado que realizan pruebas de rayado (costo, dimensiones y funcionamiento). Por otra parte, gracias al servicio de Biblioteca que ofrece la USB, se pudo obtener mediante su licencia del código ASTM (en la Web) de manera gratuita, las normas que se requerían para llevar a cabo este proyecto, las cuales estandarizan los métodos para la evaluación de adhesión de recubrimientos sobre sustratos.

3.1.2. Segunda etapa: Diseño de la máquina de rayado

La segunda etapa se sustentó en el diseño de la máquina, en la cual se realizaron diversas actividades para su desarrollo; la misma se ilustra en la Figura 3.2.

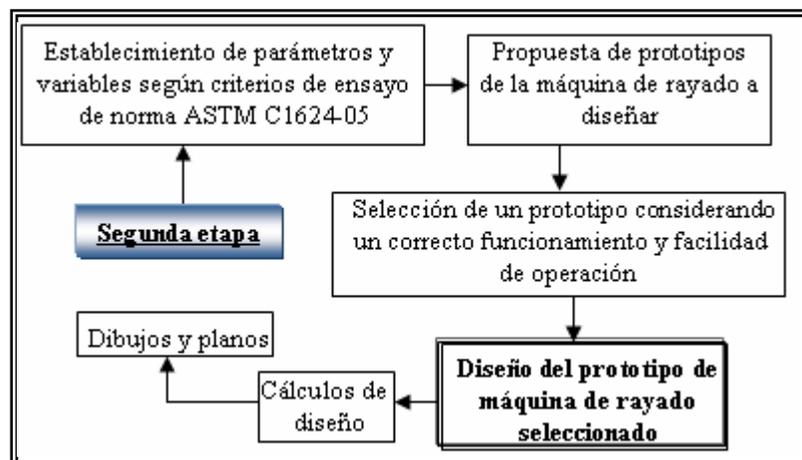


Figura 3.2. Secuencia de las actividades realizadas en la segunda etapa

En esta etapa, se fijaron los parámetros y las magnitudes de las variables a controlar durante el ensayo de rayado de acuerdo a los valores estándares recomendados por la norma ASTM C1624-05. Estos parámetros son: rango de carga, longitud de rayado, velocidad de aplicación de carga, tipo de penetrador y espaciado entre rayado. Una vez definidos estos valores, se procedió a presentar tres prototipos (diseños conceptuales) de la máquina a construir, basándose en las

condiciones de ensayo preestablecidas. Con estos prototipos de máquinas, luego se seleccionó cuál era la propuesta más factible para ser diseñada y por consiguiente fabricarla según las condiciones de ensayo ya mencionadas en combinación con los otros requisitos exigidos para el diseño, los cuales fueron el correcto funcionamiento para lograr resultados exitosos en las pruebas, así como facilidad de operación, construcción, ensamblaje y un bajo costo de inversión. En este sentido, se realizaron cálculos de diseño y planos, considerándose las condiciones de ensayo para la realización de la prueba de rayado expuestas en la norma ASTM C1624-05. Los tres prototipos fueron sometidos a una evaluación general, de acuerdo a sus ventajas y desventajas, con el fin de seleccionar el diseño que cumplía con los requisitos exigidos.

3.1.2.1. Establecimiento de los parámetros y de la magnitud de las variables de la prueba de rayado según el criterio de ensayo de la norma ASTM C1624-05

La prueba de rayado, está normalizada por varios códigos de normas, dentro de los cuales se encuentra la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM). La designación C1624-05 es el documento que explica y establece las condiciones de ensayo de esta prueba. En ella, se recomienda la velocidad de rayado, la velocidad de aplicación de carga y la longitud de rayado, las cuales son las variables fundamentales a controlar en el ensayo de rayado. Asimismo, se especifica el tipo de penetrador (geometría y material) a usar durante el rayado.

De acuerdo a tales especificaciones, a continuación, en la Tabla 3.1 se establecen la magnitud de las variables (recomendadas por la norma) a tomar en consideración en el diseño de la máquina. Ésto garantizará que los ensayos realizados con el equipo construido tengan reproducibilidad.

Tabla 3.1. Valores estándares de las variables y parámetros a controlar en ensayo de rayado (Fuente: ASTM Designation: C-1624)

Parámetro de Ensayo	Valores estándares	
	Para una carga máxima ($L_{\text{máx}} < 20 \text{ N}$)	Para una carga máxima ($L_{\text{máx}} > 20 \text{ N}$)
Tasa de aplicación de carga (carga progresiva) [N/min]	10	100
Velocidad de rayado [mm/min]	10	10
Longitud de rayado [mm]	10	10
Espaciamiento entre rayado [mm]	≥ 1	≥ 1

Como se puede observar en la Tabla 3.1, la norma, establece para el ensayo de rayado con incremento de carga, dos criterios que dependen del tipo de recubrimiento a evaluar (microdureza y espesor); por ello, debe seleccionarse la tasa de aplicación de carga y rango de carga adecuado ya que el éxito del ensayo dependerá básicamente de estas dos variables. Fijando convenientemente estas variables, se puede producir en el recubrimiento niveles de esfuerzos adecuados que permitan dilucidar de manera microscópica el punto donde éste comienza a despegarse del substrato. En el caso de emplear durante el ensayo una carga muy grande (inapropiada para ensayar la probeta recubierta), el indentador penetrará rápidamente al substrato y por consiguiente no se podrá evaluar la adhesión práctica existente entre recubrimiento/substrato y en caso contrario (de utilizar una carga pequeña), podría no generarse una carga crítica en el recubrimiento.

Las primeras tres variables señaladas en la Tabla 3.1 (tasa de aplicación de carga, velocidad de rayado y longitud de rayado), son las que fundamentalmente se controlarán en el ensayo de rayado, mientras que el espaciamiento entre rayado se podrá fijar con el movimiento de la probeta mediante el uso del porta-probeta.

Por otra parte, la norma en cuestión establece que el indentador a utilizar en el método de rayado sea un penetrador Rockwell C (punta de diamante), cuya forma se esquematiza en la Figura 3.3.

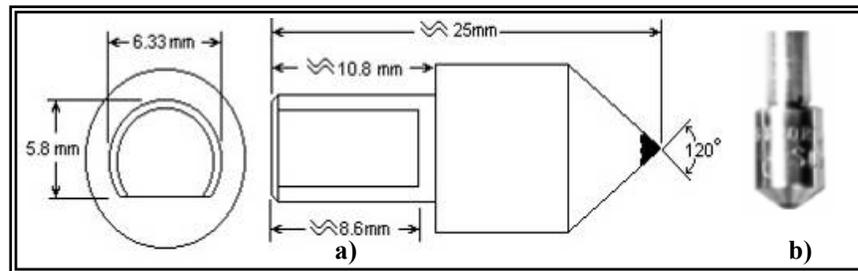


Figura 3.3. Penetrador Rockwell C recomendado para el ensayo de rayado.
a) Dimensiones, b) Aspecto físico [24]
 (Fuente: <http://www.westportcorp.com/hardness/rockwell/Indenters.asp>)

3.1.2.2. Propuestas de diseños conceptuales de la máquina de rayado a diseñar

Como se mencionó anteriormente, para la selección del prototipo final de la máquina de rayado a diseñar, fue necesario presentar al menos tres diseños conceptuales (bocetos) con el fin de estudiar cuál de éstos era el más idóneo para fabricarse. Una vez que se establecieron la magnitud de las variables y los parámetros a controlar en la prueba de rayado, se consultaron algunos mecanismos que, al momento de operar, reprodujeran las condiciones de ensayo ya preestablecidas.

Después de consultar diferentes referencias bibliográficas, se adoptó como la forma más sencilla y conveniente para generar el aumento de fuerza en el ensayo de rayado la configuración mecánica mostrada en la Figura 3.4. Para ello, se seleccionó un resorte por su facilidad de diseño y accesibilidad de adquisición.

Los tres prototipos que se sugieren a continuación, se basan en el principio de operación observado en la Figura 3.4. El brazo en donde se encuentra ubicado el penetrador, se mueve de izquierda a derecha, produciendo que el resorte (localizado

dentro de éste) se comprima progresivamente a medida que el mismo se desplaza, generándose una fuerza que va en crecimiento para que así, el indentador vaya penetrando poco a poco a la muestra recubierta, hasta llegar a la longitud máxima de rayado. El movimiento del penetrador (dispuesto en el brazo), es desplazado a través de un mecanismo, el cual a su vez es accionado por un motor eléctrico que proporciona la potencia eléctrica necesaria para mover dicho mecanismo.

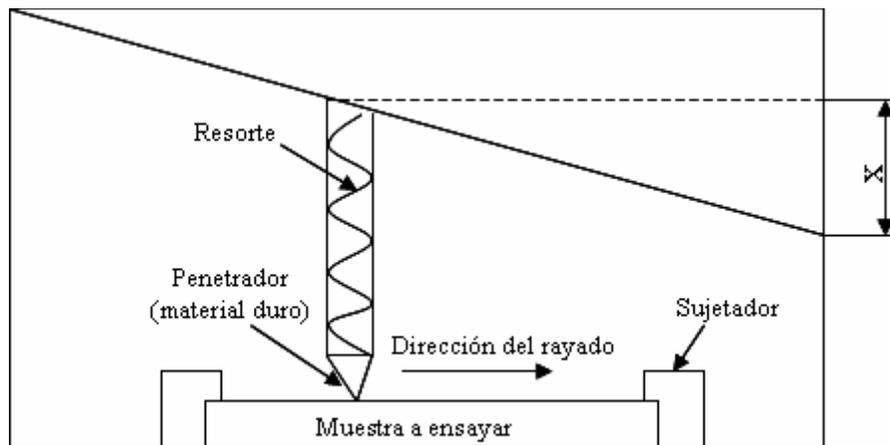


Figura 3.4. Esquema del principio de operación considerado para el diseño de la máquina de rayado (Fuente: Elaboración propia)

La fuerza a la cual el recubrimiento comienza a despegarse del sustrato, se calcula con la ecuación que involucra la Ley de Hooke:

$$F_R = KX \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

F_R : Es la fuerza normal resultante que el resorte le imprime a la muestra [N o lb].

K = Es la constante de rigidez del resorte [N/m o lb/pie].

X = Es el desplazamiento del resorte desde el punto de su posición inicial (no deformada) hasta la posición final (deformada) [m o pulg].

Con técnicas microscópicas, se puede observar y detectar el lugar en el cual el recubrimiento comienza a fallar, a partir de allí se puede conocer cuánto se desplazó el penetrador desde la posición inicial hasta dicha distancia y cuáles son las coordenadas de posición del resorte tanto al inicio como en el punto crítico de adhesión; por consiguiente es posible establecer cuánto fue lo que se deformó el mismo, y, con el valor de la constante del resorte conocida se puede determinar esta fuerza normal crítica a la cual el recubrimiento comienza a ceder.

Cabe destacar que aunque todos los bocetos que se presentarán a continuación constan de este principio de operación para realizar el rayado; el tipo de mecanismo empleado para la transmisión de movimiento rectilíneo al penetrador es distinto. El primer boceto se ilustra en la Figura 3.5, en donde se observan en perspectiva, tres vistas distintas.

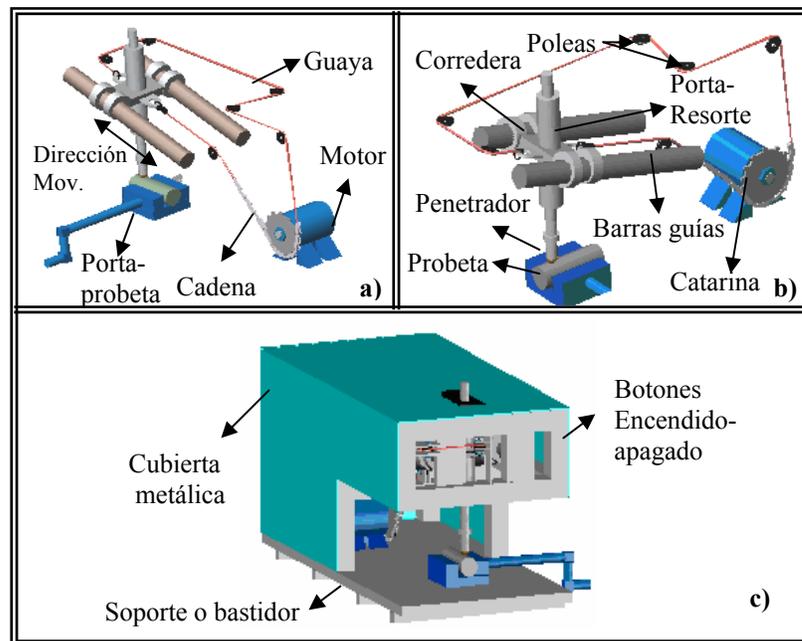


Figura 3.5. Prototipo de máquina considerando el mecanismo de cadena-guaya. a) y b) En diferentes perspectivas; c) Conjunto completo (Fuente: Elaboración propia)

El principio de funcionamiento de la máquina mostrada en la Figura 3.5. es el siguiente: al encenderse el motor, se hace girar la catarina (acoplada al eje de éste), sobre la cual se encuentra una cadena, a su vez unida por ambos extremos a una guaya de acero mediante unos sujetadores, que pueden resistir fácilmente la tensión generada; esta guaya que se desliza por una serie de pequeñas poleas, está sujeta directamente al mecanismo compuesto por la corredera y las barras guías (inclinadas), haciendo que el brazo donde está situado el penetrador se desplace de izquierda a derecha (tal como se muestra en la Figura 3.4), realizándose de esta manera el rayado requerido. La longitud de rayado se controla apagando el equipo, una vez que se haya conseguido una raya de 10 mm.

Las ventajas y desventajas consideradas con respecto al funcionamiento, construcción e inversión económica de este diseño, se explican a continuación.

Ventajas:

- Por su simplicidad, este diseño es uno de los más fáciles de fabricar y sus componentes constitutivos (piezas y elementos mecánicos) son de fácil adquisición. Por su parte, el uso de cadenas y guayas no implica un gasto muy alto.
- Fácil mantenimiento (lubricación) para el caso de la cadena, ya que el método de lubricación para la interacción cadena-dientes de la catarina puede hacerse manual o por goteo.
- La aplicación de fuerza se produce de forma sencilla, gracias a la compresión del resorte cuando el penetrador realiza el rayado.

Desventajas:

- La razón de aplicación de carga y la velocidad de rayado (constante) debe controlarse con las revoluciones del motor, las cuales deben ser muy bajas y constantes para poder satisfacer las condiciones de ensayo. Como no se

consideró una reducción, se necesitaría de un reóstato, que le permita al motor disminuir su velocidad angular (hasta lograr la velocidad requerida).

- No posee un mecanismo de retorno. Para la realización de otro ensayo se requiere que todo el conjunto móvil donde se encuentra el penetrador vuelva a su estado inicial, lo cual conllevaría a usar un convertidor de polaridad para el motor.

Un segundo prototipo es mostrado en la Figura 3.6. Para este caso se tomó como referencia el mecanismo piñón-cremallera.

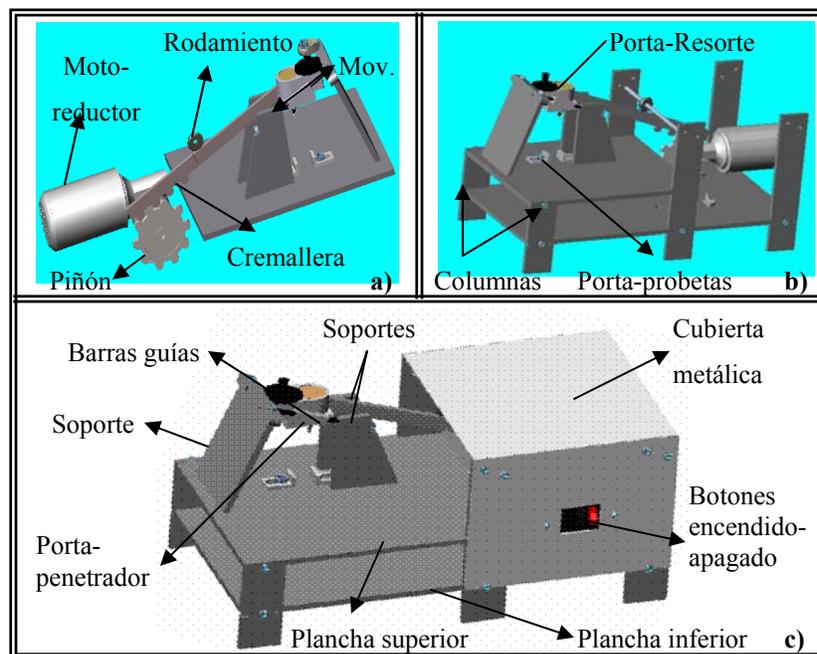


Figura 3.6. Boceto de máquina tomando como base de diseño el mecanismo piñón-cremallera. a) y b) En distintas perspectivas; c) Conjunto completo (Fuente: Elaboración propia)

El funcionamiento de esta máquina empieza al momento de encenderse el moto-reductor, el cual hace girar con una velocidad angular muy lenta al piñón, al mismo tiempo que la cremallera transforma este tipo de movimiento en uno lineal. Este último elemento mecánico, está unido al dispositivo móvil donde se encuentra el

resorte y el penetrador, haciendo que este conjunto se deslice de izquierda a derecha a través de dos barras cilíndricas guías (que están inclinadas) para que así el indentador comience a hacer su recorrido (rayado) y el resorte pueda comprimirse a fin de aumentar la fuerza vertical exigida para este ensayo. Para limitar la raya a 10 mm, se debe apagar la máquina una vez que se haya alcanzado esa longitud.

Las ventajas de este diseño son las siguientes:

- La fabricación del mecanismo piñón-cremallera es relativamente fácil. Los procesos de fabricación de estos elementos mecánicos implican la utilización de máquinas-herramientas tradicionales como el torno, fresadora, entre otros.
- La razón de aplicación de carga y la velocidad de rayado (constante), puede obtenerse con el diseño del mecanismo en cuestión, es decir, diseñar el conjunto para que se realice una raya de 10 mm en un minuto, según la salida (velocidad angular) que tenga el moto-reductor.
- Al igual que el diseño anterior, la aplicación de carga se realiza de manera sencilla, a través de la compresión del resorte.
- Debido a la baja velocidad lineal que se desea lograr en el penetrador, las fuerzas que se originan en la interacción dientes de la cremallera con dientes del piñón, son muy bajas, razón por la cual pueden utilizarse materiales de bajo costo para su fabricación.
- Su mantenimiento es muy sencillo. No se requiere de gran esfuerzo humano ni gastos económicos extras para su mantenimiento. Es de fácil operación.

Las desventajas de este diseño son las siguientes:

- La utilización de un moto-reductor implica un gasto económico considerable.
- Se requiere de un inversor de polaridad para el motor, en vista que para poder realizar otro rayado, el mecanismo piñón-cremallera debe estar situado en su posición inicial.

El tercer y último prototipo se presenta en la Figura 3.7, en donde se seleccionó el mecanismo leva-seguidor para transmitir el movimiento lineal al penetrador.

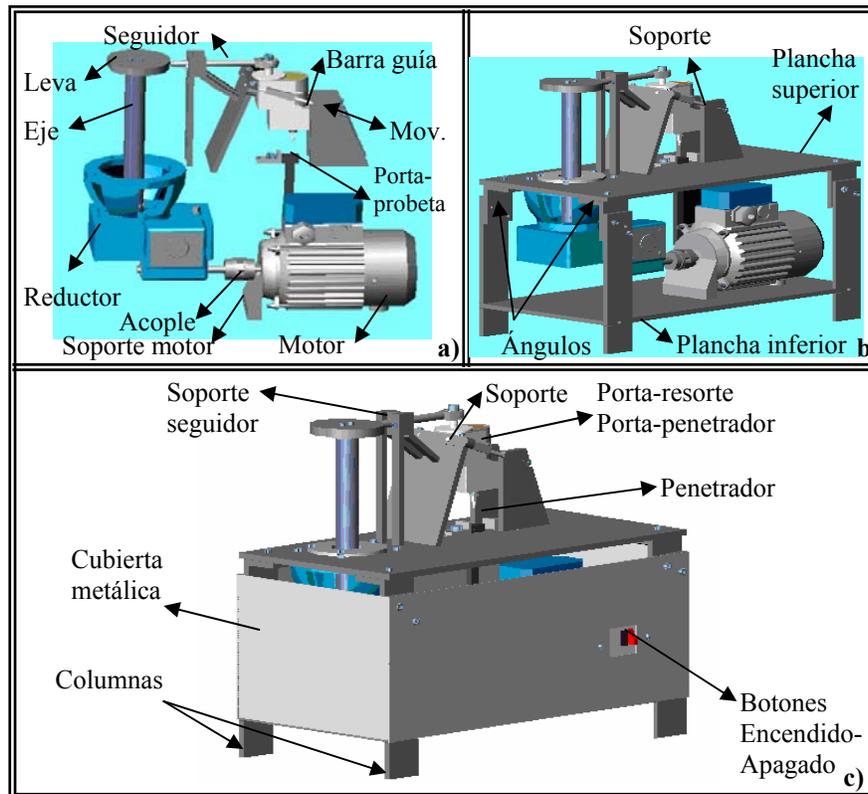


Figura 3.7. Diseño conceptual considerando el mecanismo leva-seguidor a) y b) En distintas perspectivas; c) Conjunto completo

(Fuente: Elaboración propia)

Este diseño, tiene como principio de operación el siguiente: una vez que se enciende el motor, se transmite la potencia mediante un acople al reductor, encargado de disminuir la velocidad angular de éste. A la salida de dicho reductor, está acoplado un eje, que, en su extremo libre se encuentra articulada una leva con perfil de velocidad constante. Al girar el eje, la leva también gira a la misma velocidad de la flecha, permitiendo que el seguidor ruede sobre el perfil de la leva y de esta forma, empuje al dispositivo móvil compuesto del porta-resorte y penetrador, el cual se

desliza por dos barras cilíndricas inclinadas, con la finalidad de que el indentador se mueva de izquierda a derecha y así, el resorte se comprima progresivamente para que genere la fuerza normal necesaria para realizar el ensayo de rayado. La longitud de rayado, al igual que los dos prototipos presentados anteriormente, se controla apagando la máquina una vez que se haya alcanzado la longitud estándar de la raya.

Las ventajas de este diseño se explican a continuación:

- El mecanismo leva-seguidor seleccionado, permite que el ensayo se realice con una velocidad y tasa de aplicación de carga constante. Con ésto, la prueba de rayado puede ejecutarse de forma más precisa según los requerimientos de ensayo, comparado con los dos mecanismos usados en los bocetos anteriores.
- Por la versatilidad del mecanismo escogido, se puede lograr que el dispositivo móvil (penetrador) vuelva a su posición inicial de ensayo sin necesidad de usar un inversor de polaridad para el motor.
- En virtud a la baja velocidad angular que debe girar la leva para que el seguidor empuje al penetrador también con una velocidad lineal baja, la tasa de desgaste del par mecánico leva-punta del seguidor no sería tan considerable, siempre y cuando se usen materiales de iguales o parecidas propiedades químicas y/o termo-físicas. Tales materiales pueden ser adquiridos con una inversión económica relativamente baja.
- Fácil lubricación para el contacto entre leva-punta de seguidor. Ésta puede hacerse de forma manual.
- La fabricación del eje a utilizar y de las demás partes, se puede conseguir mecanizándolo por procesos de manufactura tradicionales mediante el uso de tornos, fresadoras y/o sierra eléctrica, entre otros.

Sus desventajas son las siguientes:

- El uso de un motor y un reductor implica un gasto económico muy alto.

- Por la forma asimétrica característica de la leva a fabricar, se requiere de un proceso de manufactura preciso para lograr el perfil de velocidad deseado (constante). Para ello, sería conveniente fabricarse en un torno de control numérico (CNC), ya que es la máquina-herramienta que mejor genera con mayor precisión el perfil diseñado. Por consiguiente, su fabricación implicaría un gasto económico elevado.

Los tres diseños conceptuales que se expusieron de manera detallada, permiten hacer una evaluación económica y operacional de las máquinas propuestas. El aspecto económico juega un papel importante en cualquier diseño, sin embargo, tampoco debe descuidarse la función que la máquina debe realizar.

Según las consideraciones derivadas de cada diseño (ventajas y desventajas), se seleccionó el tercer boceto (véase Figura 3.7.) como el prototipo más idóneo para fabricarse. Esta decisión se basó principalmente en la versatilidad y facilidad operación del mecanismo leva-seguidor para convertir un movimiento circular en uno lineal de velocidad constante, lo cual contribuye a que la prueba de rayado pueda ejecutarse correspondiendo estrictamente a las condiciones de ensayo requeridas por la norma ASTM C-1624-05 y, por la gran ventaja (comparada con los otros dos bocetos) de poder situar el porta-penetrador una vez que se termine de realizar el rayado, a la posición inicial del ensayo sin necesidad de recurrir a un inversor de polaridad.

Por otra parte, exceptuando la fabricación de la leva, las demás partes constitutivas de este diseño se pueden realizar utilizando técnicas sencillas de fabricación mediante procesos de manufactura ejecutados en máquinas herramientas tradicionales de fácil acceso y disponibilidad tanto dentro de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, como en diferentes talleres mecánicos ubicados en la zona oriental.

La fabricación de la leva, al igual que la adquisición del motor y el reductor, conllevan a un gasto económico significativo, sin embargo, comparado con los otros dos prototipos resulta más viable esta opción, debido que para estos dos diseños (el del mecanismo cadena-guaya y piñón cremallera) además de necesitarse un motor o motor-reductor, también se requeriría de un inversor de polaridad, aspecto muy negativo (poco práctico) para la facilidad de operación que se busca en el prototipo final.

De igual manera, con estos dos mecanismos, no se obtendrían las mejores condiciones de ensayo establecidas por la norma, ya que en el caso del mecanismo piñón-cremallera no se conseguiría propiamente dicha una velocidad constante para el penetrador (debido al paso entre dientes piñón-cremallera), y para el caso del mecanismo cadena-guaya, tendría que emplearse un reóstato para disminuir las revoluciones de salida del motor.

3.1.2.3. Diseño del prototipo final de la máquina de rayado seleccionada

De acuerdo a la selección del prototipo (diseño conceptual) final de la máquina de rayado escogida según requisitos de economía, facilidad de operación y cumplimiento de criterios de ensayo exigidos por la norma ASTM C-1624-05, se precedió a diseñar la máquina tomando en consideración básicamente la disponibilidad de materiales, equipos y maquinarias para su construcción, así como también mano de obra para su fabricación, tamaño, peso, facilidad para su transportación, buena sujeción o articulaciones apernadas para ensamblarla y desarmarla (para cuando se necesite hacerle mantenimiento y realizar algún reemplazo de alguna pieza o equipo) y suficiente robustez para minimizar en todo lo posible cualquier efecto de vibración.

Las partes, elementos mecánicos y equipos (a diseñar y a seleccionar) de los cuales consta la máquina de rayado se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Partes, equipos y elementos mecánicos constitutivos de la máquina de rayado

Parte y/o dispositivo	Criterio		Parte y/o dispositivo	Criterio	
	Diseño	Selección		Diseño	Selección
Guarda-motor		X	Resortes		X
Motor		X	Barras guías	X	
Reductor		X	Soportes barras guías	X	
Acople		X	Porta-probeta	X	
Eje	X		Penetrador		X
Leva-seguidor	X		Columnas	X	
Soporte seguidor	X		Tornillos	X	
Porta-resorte		X	Ángulos sujeción	X	

Selección del motor, reductor, acople y guarda-motor: Para el diseño y construcción de la máquina, se seleccionó un motor eléctrico y un reductor para la transmisión de potencia al mecanismo final que realizará la prueba de rayado. Estos dos equipos se pueden observar en la Figura 3.8a y 3.8b.

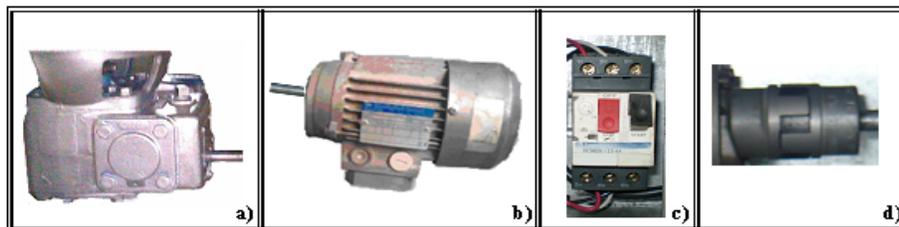


Figura 3.8. Equipos utilizados para la transmisión de potencia en la máquina de rayado.

a) Reductor; b) Motor eléctrico; c) Guarda-motor; d) Acople

De acuerdo al prototipo seleccionado para el diseño (véase Figura 3.8), este conjunto acople motor-reductor (Figura 3.8d) es el que propicia una velocidad angular baja muy conveniente para que en la realidad, el rayado se pueda realizar con una velocidad lineal muy lenta.

Es importante señalar que, el criterio de selección del motor, principalmente se basó en conocer si para el caso crítico de ensayo (cuando el penetrador generase una fuerza normal máxima de aproximadamente 100 N a través del empuje que le imprime el resorte y por consiguiente a la muestra a ensayar), su potencia eléctrica era la suficiente. Cumplido tal requisito, este componente eléctrico también fue seleccionado en función de la disponibilidad de equipos. Por su parte, la conexión del motor a la corriente eléctrica se hizo mediante el uso de un equipo eléctrico denominado guarda-motor, el cual posee los botones de encendido y apagado del mismo; sirviendo además para proteger el buen funcionamiento de este equipo ante cualquier problema de entrada de la corriente eléctrica (véase Figura 3.8c).

Para el caso del reductor, (Figura 3.8a) se buscó el equipo que mejores condiciones de velocidad pudiera favorecer en la transformación del movimiento angular al lineal, es decir, aquel que a más bajas revoluciones pudiera operar. Asimismo, su selección se hizo, al igual que para el motor eléctrico, de acuerdo a la disponibilidad de equipos.

Las características de funcionamiento de estos cuatro equipos (motor, reductor, guarda-motor y acople) se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características de operación del motor, reductor, guarda-motor y acople utilizados para la generación y transmisión de potencia en la máquina

Equipo	Características	
Motor eléctrico trifásico	Marca:	Bonfiglioli Group
	Serial:	830430556-M996343
	Potencia:	0,14 kW 0,187 HP
	Velocidad Angular:	1020 rev/min
	Voltaje:	(230-400) V
	Amperaje:	(0,65-0,66) A

Tabla 3.3. Características de operación del motor, reductor, guarda-motor y acople utilizados para la generación y transmisión de potencia en la máquina (Continuación)

Equipo	Características	
Reductor corona-tornillo sin fin-corona	Marca:	Morse
	Serial:	77MD0180
	Potencia:	0,0269 kW 0,036 Hp
	Relación de reducción:	Cuando el motor da 2160 vueltas éste da una vuelta (2160:1).
Guarda-motor	Marca:	Telemecanique
	Serial:	GVME08
	Amperaje:	Puede operar para tres valores de amperaje: a) 2,50 A. b) 3,00 A c) 4,00 A
Acople tipo quijada con inserto de sintético	Marca:	Serbing Elgin
	Código:	PAT-2616273
	Diámetro:	5/8"

Diseño del eje: El diseño de este elemento se hizo fijando su longitud, la cual es de aproximadamente 0,20 m. En este sentido, se calculó la fuerza “ F_x ” que el seguidor le transmite a la leva por efecto de la carga normal y las fuerzas “ F_{XR} ” (iguales en magnitud y dirección) que los resortes le aplican al porta-penetrador/porta-resorte, para la condición crítica de ensayo (para una carga de 100N). Véase Figura 3.9. Con dichas fuerzas, se pudo calcular el momento flector y el torque que sufre el eje.

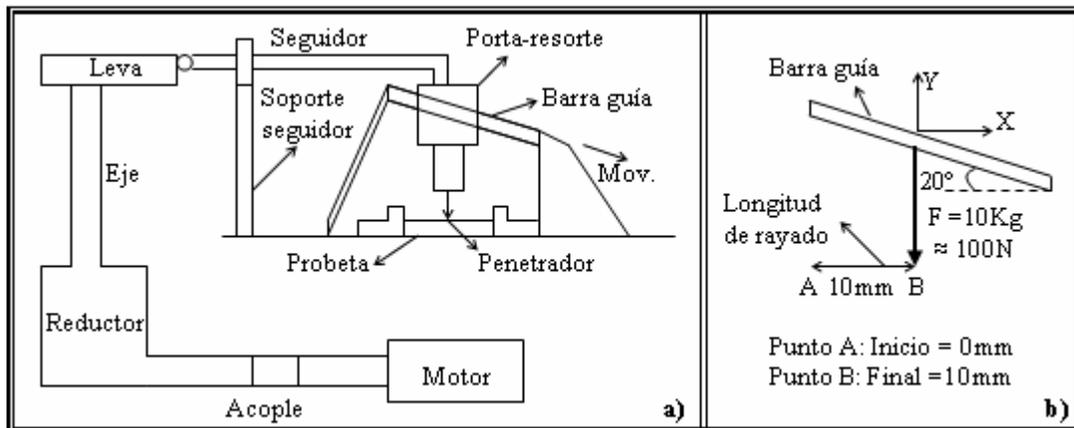


Figura 3.9. Boceto general de la vista de frente de la máquina de rayado.
a) Todo el conjunto; b) Condición crítica de ensayo.

Estudiando detenidamente la condición de ensayo mostrada en la Figura 3.9b, la fuerza normal “F”, actuante en el punto máximo de rayado, se descompuso en el eje de las barras guías “X”, se sumó a las fuerzas “ F_{XR} ” y la resultante de esta fuerza “ F_x ” se descompuso en el eje principal de las abscisas “X”, obteniéndose la fuerza “ F_x ” requerida, tal como se muestra en la Figura 3.10.

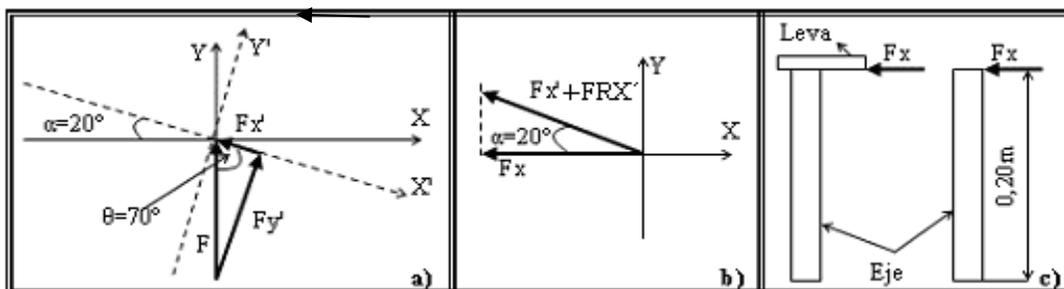


Figura 3.10. Descomposición de la fuerza normal.
a) En el sistema de referencia auxiliar (Plano X'-Y');
b) En el sistema de referencia principal (Plano X-Y)

Aplicando los conceptos básicos de trigonometría (véase Ec. 15, 16, 17 y 18), se obtuvo el valor de la fuerza “ F_x ”, es decir, la carga que el seguidor le transmite a la leva.

$$F_x' = F \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$F_{RX}' = 2 * F_{XR}' \quad (\text{Ec. 16})$$

$$F_x'' = F_x' + F_{RX}' \quad (\text{Ec. 17})$$

$$F_x = F_x'' \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{Ec. 18})$$

Con este valor de “Fx”, se encontraron las magnitudes máximas de la fuerza cortante, el momento flector y el torque, por medio de sus respectivos diagramas. Además, conocidas las propiedades mecánicas (esfuerzo de fluencia y resistencia a la fatiga) del material a usar para su fabricación (acero AISI 1020) y los diferentes factores propios del diseño, se calculó el diámetro mínimo permisible del eje empleando la Ec. 19 [25].

$$D = \left\{ \frac{32 * N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{K_t * M}{S_m} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2} \right\}^{1/3} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

D = Es el diámetro del eje [m o pulg].

N = Es el factor de seguridad o de diseño.

Kt = Factor de concentrador de esfuerzos.

M = Momento flector máximo [N.mm o Lb.pulg].

S_m = S_n * C_R * C_S = Resistencia a la fatiga estimada real o por durabilidad [Pa o Psi]

C_R = Factor de confiabilidad.

C_S = Factor de tamaño.

T = Torque máximo [N.mm o Lb.pulg].

S_y = Esfuerzo de fluencia del material [Pa o Psi].

Los ejemplos de cálculo de esta sección se encuentran reportados en el Apéndice A.

Diseño del mecanismo leva-seguidor: El diseño de este mecanismo fue muy importante en virtud a la función que realizaría: transformar un movimiento circular en uno lineal, el cual permitió realizar el ensayo de rayado.

Diseño de la leva: De acuerdo al prototipo de máquina de la Figura 3.7, la leva a diseñar debe tener un perfil de velocidad constante para cumplir con los requisitos de ensayo exigidos por la norma ASTM C1625-05. Específicamente, este documento establece que el penetrador debe recorrer 10mm en 1 min, en otras palabras, éste debe moverse a una velocidad constante de 10 mm/min (0,17 mm/s aproximadamente).

Sin embargo, tomando una precaución, la leva se diseñó para que el seguidor se moviera 13 mm, considerando un recorrido adicional de 3 mm para evitar que en cualquier situación no deseada, el penetrador (empujado por el seguidor) llegue al punto máximo de rayado (10 mm) y se devuelva realizando otra huella sobre la anteriormente hecha.

Tomando en cuenta la velocidad angular real que se obtiene a la salida del reductor (0,55 rev/min) y estableciendo para cuántos grados la leva tendría que girar a fin de que el seguidor se moviera 13 mm, con la ayuda de los conocimientos de cinemática se llegó al perfil deseado (véase Figura 3.11), el cual cumple con las condiciones de operación que muestra en la Figura 3.12.

En la muestra de cálculo del Apéndice A, se detallan los cálculos de esta sección.

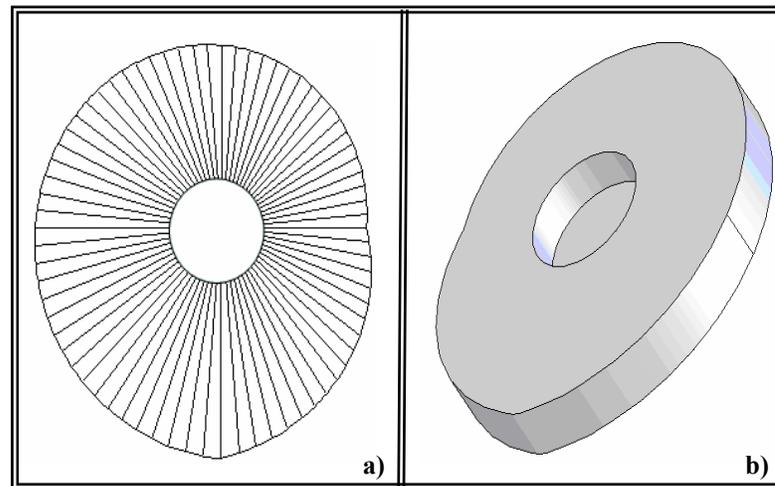


Figura 3.11. Leva con perfil de velocidad constante diseñada.
a) Vista en el plano; b) Vista tridimensional en perspectiva

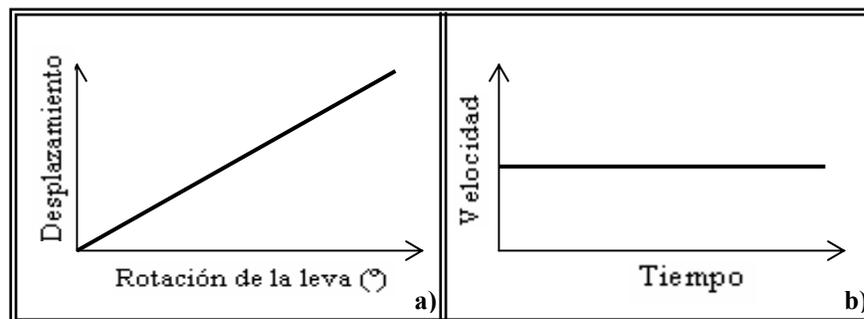


Figura 3.12. Condiciones necesarias para el diseño de la leva.
a) Diagrama de desplazamiento; b) Curva de velocidad constante

Diseño del seguidor y de su soporte base: En este diseño se tuvo que considerar el hecho de que este elemento se dispondría de forma horizontal debido a la configuración de la máquina. Entonces, en el par mecánico formado por leva-rodamiento del seguidor, se tomó en cuenta un alargamiento de material en el extremo del seguidor (donde se encuentra la articulación del rodamiento) con el fin de que éste encaje perfectamente con la sección transversal-periferia de la leva. De esta forma se le restringe al seguidor el movimiento en sentido vertical. Véase Figura 3.13.

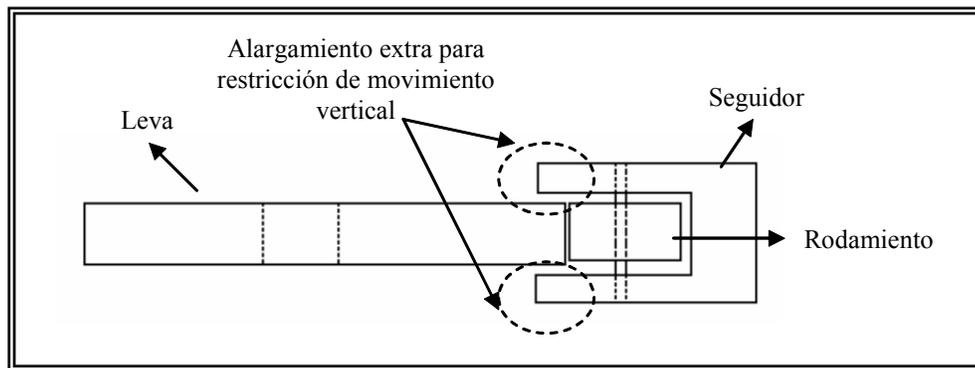


Figura 3.13. Conjunto leva-seguidor considerado para el diseño

Para evitar el posible movimiento horizontal del seguidor en el sentido de giro de la leva, se diseñó un soporte muy sencillo, el cual sirve como base del seguidor. Este montaje permite además, que el mismo se mueva sólo en sentido radial de la leva, generándose el movimiento lineal deseado. También para mantener unido el par leva- seguidor, en cada barra guía (por donde se desplaza el porta-penetrador), se insertó un resorte; así cuando la leva girara y le proporcionara movimiento al seguidor y éste al porta-penetrador, los resortes hicieran el efecto de empuje en dirección contraria al movimiento, manteniendo en contacto la punta del seguidor con el perfil de la leva.

Un boceto del seguidor y del soporte base a fabricar se presentan en la Figura 3.14.

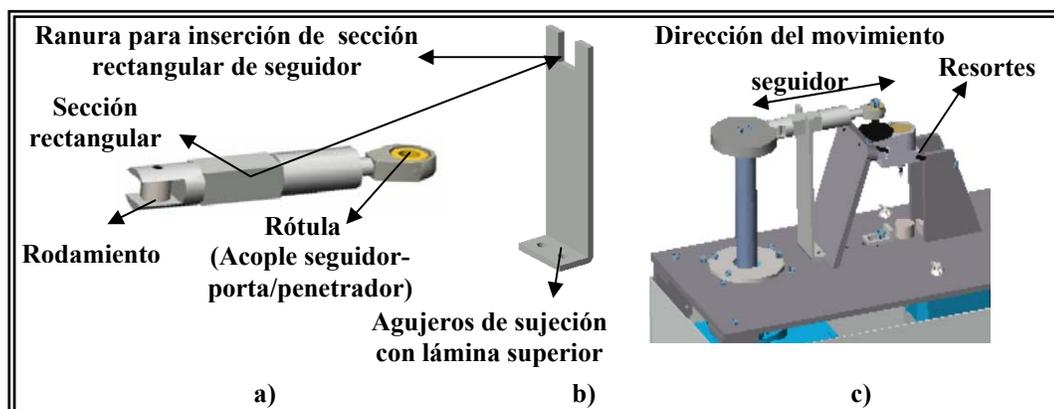


Figura 3.14. a) Seguidor; b) Soporte base seguidor; c) Acople leva-seguidor/soporte base

Diseño de los soportes de las barras o ejes guías: Las barras guías son los elementos responsables para que el porta-resorte/porta-penetrador se desplace por éstas. Las mismas tuvieron que ser sujetadas a unos soportes que les dieran cierto ángulo de inclinación para que así el penetrador una vez que recorriera la distancia establecida para cada rayado comprimiera el resorte y generara una fuerza normal.

Las dimensiones de estos elementos (especialmente su altura) se establecieron partiendo de la fijación de un espacio libre considerable entre el penetrador y la lámina superior, a fin de poder ensayar probetas de diferentes espesores. La Figura 3.15, muestra tales elementos de sujeción.

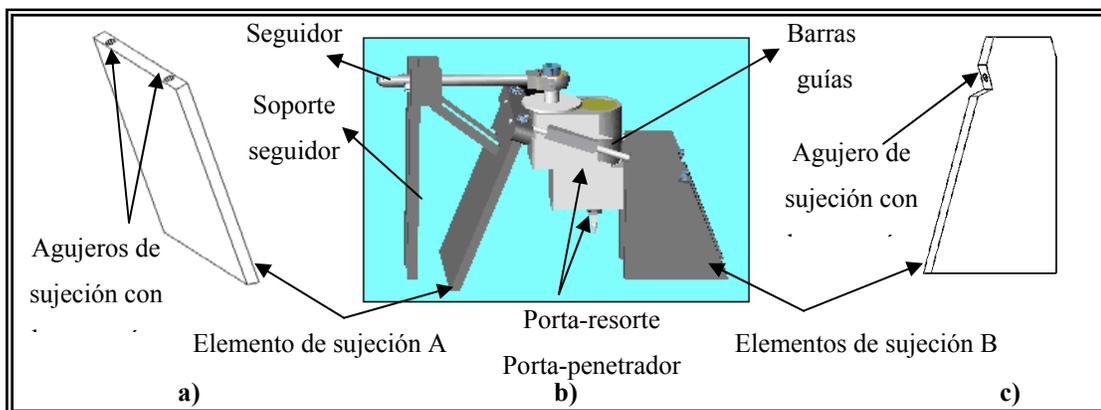


Figura 3.15. Elementos de sujeción de las barras guías.

a) Elemento de sujeción A; b) Conjunto completo; c) Elemento de sujeción B

Las dimensiones de estos elementos de sujeción pueden verse con más detalles en los planos de la máquina que se encuentran en el Apéndice E.

Diseño del sistema de porta-probetas: El diseño de los dispositivos que conforman el sistema de porta-probetas se hizo tomando en consideración que los mismos permitieran primeramente ubicar a la probeta muy cerca del penetrador (en el punto de inicio del ensayo), es decir, que le ofreciera movimiento vertical, ya que para probetas de espesores menores a 15 mm, no se podrían ubicar en el punto de

ensayo sin la ayuda de algún mecanismo que subiera a las muestras hasta la punta del penetrador.

En este sentido, lo más conveniente fue adoptar un montaje de una placa metálica rectangular con una pequeña barra de diámetro mayor a 10mm (longitud máxima de rayado) atornillada a la misma, que se dispusiera en el punto de ensayo. A esta placa rectangular estarían soldados dos tornillos en sus extremos a fin de insertarlos en sus respectivos agujeros de la plancha metálica superior y con la ayuda de tuercas tipo mariposas se consiguiera el avance vertical de la barra metálica por medio de un agujero en la plancha metálica superior hasta el punto de ensayo. Véase Figura 3.16.

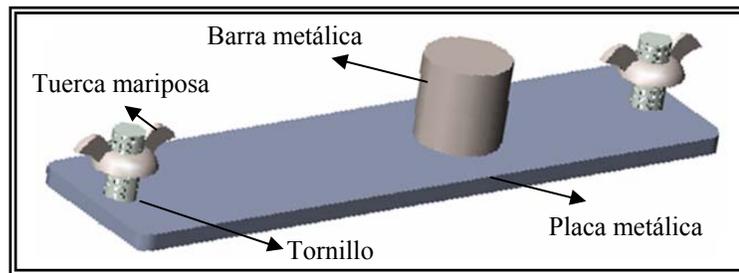


Figura 3.16. Dispositivo de movimiento vertical para probetas

En segundo término, se ideó que la sujeción horizontal de las probetas se hiciera con mordazas, las cuales funcionarían como prensas (tipo L), que no le darían movilidad horizontal en la dirección de rayado.

Estas prensas se fijarían con tornillos dispuestos en la lámina metálica superior y se adaptarían a las dimensiones de las probetas mediante unas canales guías hechas en su sección horizontal. Véase Figura 3.17.

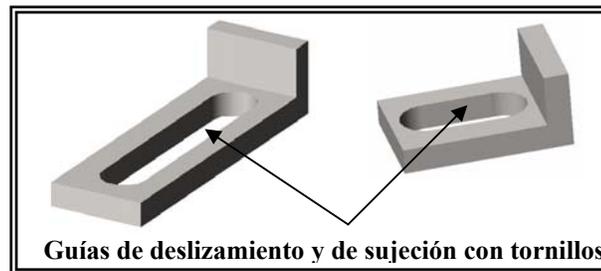


Figura 3.17. Diseño conceptual de las prensas de sujeción de probetas.

De manera general, en la Figura 3.18, se observa el sistema de porta-probetas diseñado. En el mismo se muestran las prensas horizontales y la disposición del dispositivo para movimiento vertical de la probeta (o sistema de elevación), el cual está ubicado por debajo de la plancha metálica superior.

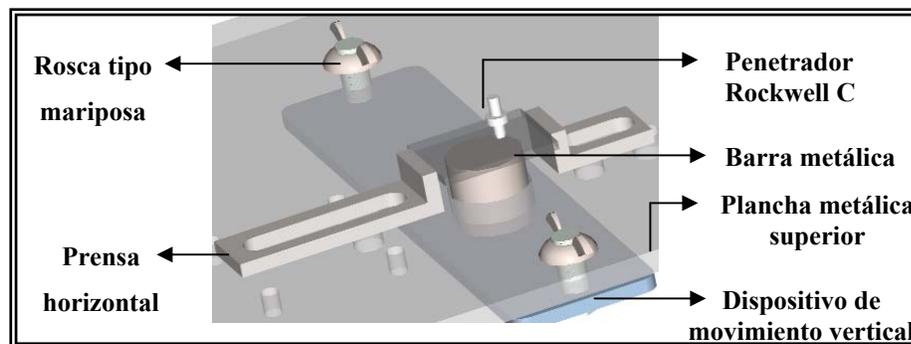


Figura 3.18. Sistema de porta-probetas diseñado

Selección del porta-resorte: El porta-resorte es el dispositivo móvil que contendrá el resorte (responsable de aplicar la fuerza normal durante el rayado) por medio del penetrador, el cual está roscado en la parte inferior de este conjunto. La selección de esta parte móvil se hizo de forma conveniente, es decir, que en el mismo existiera un espacio cilíndrico capaz de disponer en su interior, el resorte a utilizar (según la carga seleccionada para la realización del ensayo). En la Figura 3.19, se puede observar dicho dispositivo, apreciándose que en sus laterales se encuentran dos camisas (externamente de sección rectangular e internamente de sección circular, utilizadas para que el porta-resorte se desplace a través de las barras guías); el ángulo

de inclinación de estas camisas fue fijado a 20° con respecto al eje horizontal, a fin de que cuando el conjunto iniciara su recorrido, se desplazara a lo largo de una pendiente negativa y propiciara la compresión del resorte.

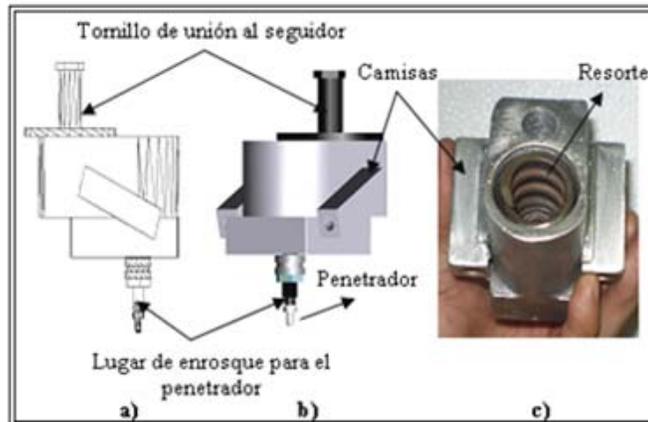


Figura 3.19. Dispositivo móvil porta-resorte.

a) Vista lateral; b) Vista tridimensional; c) Fotografía real del dispositivo

Por otro lado, en la Figura 3.20, se observan las fuerzas actuantes en cada camisa, según la condición crítica de ensayo (100N), en las cuales se comprobó si la magnitud de los esfuerzos cortantes no sobrepasaban el punto de cedencia del material (aluminio aleado).

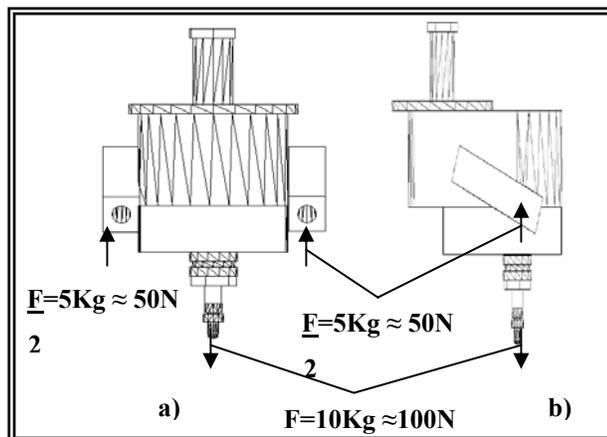


Figura 3.20. Representación gráfica de las fuerzas actuantes en el porta-resorte.

a) Vista de frente (diagrama de equilibrio); b) Vista lateral.

Diseño de las láminas inferior y superior según solicitación de carga: Una vez fijadas las dimensiones de la lámina inferior y superior (largo y ancho), se procedió a determinar el espesor mínimo para el cual pudiera ocurrir una falla.

La determinación del espesor “*e*” específicamente de la lámina inferior, se hizo considerando a ésta como una viga simplemente apoyada, empleando los conocimientos sobre estática. Como esta plancha se dispuso para soportar básicamente el peso del motor (4,6Kg), se determinó el momento flector máximo, idealizando el peso del motor como una carga uniformemente distribuida actuando sobre dicha plancha. En la Figura 3.21, se puede observar la carga distribuida y las reacciones actuantes en la plancha.

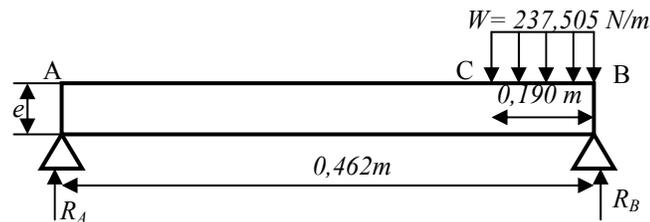


Figura 3.21. Viga simplemente apoyada representativa de la sección transversal de la plancha inferior a diseñar

Calculando las reacciones actuantes en la estructura (R_A y R_B) y estudiando tramo por tramo la viga, se pudo construir los diagramas de esfuerzo cortante y momento flexionante con el fin de determinar el momento flector máximo permitido (el punto máximo del diagrama flexionante) para el material seleccionado.

Conocida la magnitud del esfuerzo de fluencia del material empleado para la construcción de la máquina (aluminio aleado) y utilizando la Ec. 20, correspondiente al esfuerzo de flexión, se obtuvo el espesor de la lámina inferior.

$$\sigma_y = \frac{M.C}{I} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde: $C = \frac{e}{2}$, $I = \frac{1}{12}be^3$ y σ_y el esfuerzo de fluencia del material.

La metodología de cálculo para la lámina superior se llevó a cabo de la misma forma a la de la lámina inferior. Los ejemplos de cálculo correspondientes a esta sección pueden revisarse en el Apéndice A.

Determinación de la carga permisible en columnas: A partir del análisis estático de la plancha metálica superior de la máquina, se procedió a determinar la carga crítica “ P_{cr} ” y carga admisible “ P_a ” en las columnas; sabiendo de antemano que el material de estas columnas es aluminio aleado con un esfuerzo de fluencia $\sigma_y = 278,5$ MPa y módulo de elasticidad $E = 69000$ MPa. Partiendo del hecho que las columnas están sometidas a cargas compresivas, su estudio pudo hacerse con las fórmulas utilizadas en diseño de columnas (ecuaciones de Euler y Johnson).

Conocida la mayor reacción resultante del análisis estático de la plancha metálica, el cálculo se hizo en base a este valor, asumiendo que todas las columnas se encuentran dispuestas como una viga empotrada-empotrada, con un valor de constante de extremo libre de $K = 0,5$ tal como se indica en la Figura 3.22.

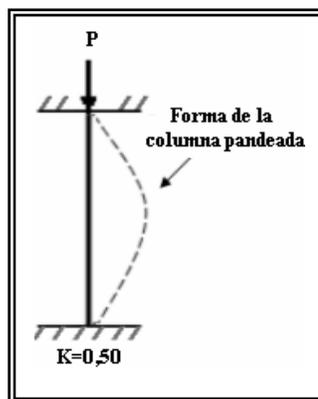


Figura 3.22. Diagrama de cuerpo libre de la columna en la condición empotrada-empotrada [35]

Conocida la longitud de la columna $L=192\text{mm}$ y $K=0,5$; se calculó la relación de esbeltez, sabiendo con anterioridad el radio de giro r , según la Ec. 21.

$$r = \frac{B}{\sqrt{12}} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

r = Radio de giro [mm o pulg].

B = Es la menor longitud de la sección transversal de la columna [mm o pulg].

Luego, la relación de esbeltez fue calculada con la Ec. 22.

$$\frac{KL}{r} \quad (\text{Ec. 22})$$

Seguidamente, fue necesario calcular la relación de transición de esbeltez C_c , con las propiedades mecánicas del material usado (aluminio aleado).

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (\text{Ec. 23})$$

El resultado de C_c se comparó con el valor de KL/r y se observó si:
 a) $KL/r > C_c$ y b) $KL/r < C_c$. Si tal comparación satisfacía la condición “a”, el análisis de este elemento debe hacerse como una columna larga (Ecuación de Euler) y en caso contrario, debe considerarse como una columna corta (Ecuación de Johnson). Estas ecuaciones se describen a continuación:

Fórmula de Euler para carga crítica:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (\text{Ec. 24})$$

Fórmula de Jonson para carga crítica:

$$P_{cr} = A \cdot \sigma_y \left[1 - \frac{\sigma_y \left(\frac{KL}{r}\right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

P_{cr} = Es la carga crítica [N o Lb].

E = Módulo de elasticidad del material [Pa o Psi]

KL/r = Relación de esbeltez [m o pulg].

A = Área de la sección transversal [m² o pulg²]

σ_y = Esfuerzo de fluencia [N/m² o Lb/pulg²]

El análisis terminó aplicándole a la fórmula de “ P_{cr} ” un factor de seguridad, para así obtener a “ P_a ” y verificar si el valor máximo de la reacción obtenida en el análisis estático de la plancha superior de la máquina estaba por debajo de esta carga admisible “ P_a ”, conllevando a garantizar que las columnas no presentaran fractura alguna para esta sollicitación de carga.

Diseño de los ángulos de sujeción: Los ángulos de sujeción fueron diseñados para sostener las cuatro columnas con la lámina metálica superior. Se ideó que la sujeción entre estas dos partes se hiciera mediante tornillos, tal como se muestra en la Figura 3.23.

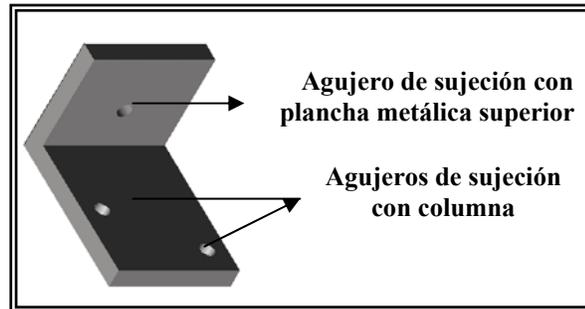


Figura 3.23. Ángulo de sujeción o dispositivo de unión utilizado para la unión de las columnas con la plancha metálica superior

Determinación de diámetro mínimo de los tornillos de sujeción: Para el cálculo del diámetro de los tornillos de sujeción de la lámina inferior y de la lámina superior con las columnas, se tomaron las mayores magnitudes de las reacciones obtenidas en el análisis estático de estas placas, ya que estos valores representan las cargas críticas de diseño. El material utilizado para estos elementos de sujeción fue Acero Inoxidable 304. Utilizando la Ec. 26, se pudo conocer el valor de estos diámetros.

$$\tau_y = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

τ_y = Esfuerzo cortante a la fluencia [Pa o Psi].

F = Fuerza paralela al área [N o Lb].

A = Área mínima [m² o pulg²].

Los detalles de los cálculos de esta sección, pueden revisarse el Apéndice A.

Selección del penetrador: Tal como lo establece la norma ASTM C1624-05, el indentador a utilizar durante el ensayo de rayado debe ser estrictamente el

correspondiente a la escala Rockwell C. Por su excelente propiedad mecánica (alta dureza y resistencia al desgaste) es utilizado para este ensayo. Su geometría y aspecto físico en general fue presentado en la Sección 3.1.2.1, en la Figura 3.3.

Selección de resortes: La selección de los resortes utilizados para producir la fuerza normal durante el ensayo de rayado, se hizo tomando como punto de partida los valores de carga establecidos por la norma ASTM C16245-05. Esta norma estandariza dos condiciones de aplicación de fuerza máxima: una para 100N ($\approx 10\text{Kg}$) y otra para 10N ($\approx 1\text{Kg}$), ambas cargas para ser aplicadas a una longitud máxima de rayado de 10mm (1cm). Posteriormente, se buscaron en el mercado diferentes resortes que pudieran cumplir con estas condiciones y se realizaron pruebas experimentales con varios pesos muertos para conocer cuál de ellos correspondían a dichas condiciones y además a la inclinación dada a las barras guías (20°) con el objeto de que estos elementos flexibles (al momento de realizar el rayado) pudieran comprimirse. También tuvo que considerarse que el diámetro y longitud de los resortes no sobrepasaran las dimensiones máximas del porta-resorte. El principio para la obtención de las deflexiones experimentales y montaje real utilizado para ello, se ilustra en la Figura 3.24.

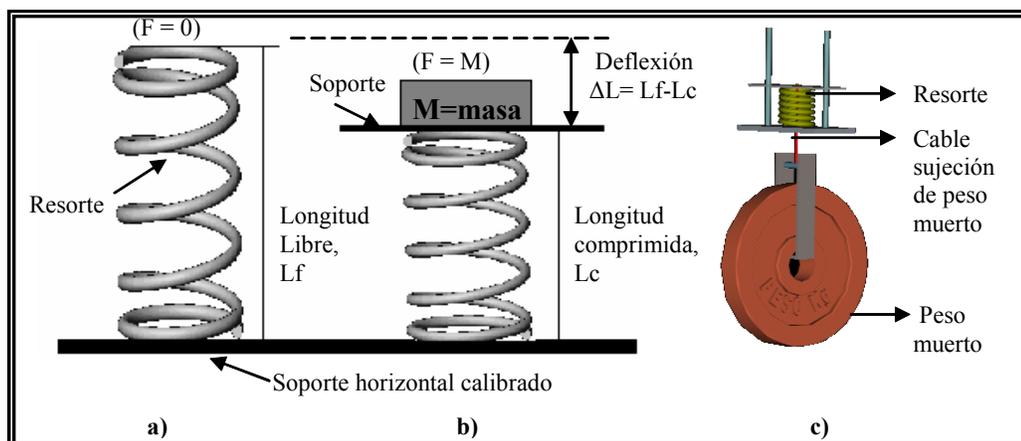


Figura 3.24. Arreglo experimental para la medición de las deflexiones en los resortes. a) Resorte sin aplicación de carga, b) Resorte comprimido (con aplicación de carga); c) Representación esquemática del montaje real utilizado.

En la Figura 3.24, se aprecia la forma como fueron registradas dichas deflexiones. La medición de las longitudes libres “Lf” y longitudes comprimidas para cada aplicación de carga distinta “Lc”, se hizo con la utilización de un vernier con una apreciación de 0,01mm. Para el resorte más rígido (resorte A), se usaron pesos muertos de 1,25; 2,25; 3,75; 5,00; 6,25; 7,50; 8,75 y 10,00Kg; y para el resorte menos rígido (resorte B): 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 y 1,25Kg.

Con las deflexiones asociadas a cada resorte, se calculó el valor de la constante de rigidez experimental a partir del promedio de la constante individual de cada par ordenado (carga, deflexión), según la Ec. 27.

$$K_i = \frac{F_i}{\Delta x_i} \quad (\text{Ec.27})$$

Donde: $i=0,1,2,3\dots n$ y representa el número de mediciones. De esta forma, empleando la Ec. 28, se obtuvo el promedio (el valor más representativo) de las constantes de rigidez de los resortes.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde $n=$ Es el número de observaciones. Conocidas las constantes elásticas teóricas a través del cálculo de las deflexiones teóricas que producirían cada uno de los pesos muertos a los resortes, se compararon las constantes elásticas experimentales de cada resorte calculadas por medio de las deflexiones registradas con las pruebas experimentales. De esta forma, se escogieron los dos resortes con constantes de elasticidad que menor porcentaje de error tuviera respecto a la esperada teóricamente.

Para finalizar, se construyeron las curvas de carga-deflexión y distancia crítica-carga crítica con los resultados experimentales obtenidos. Estas gráficas se presentan en las Figuras 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28.

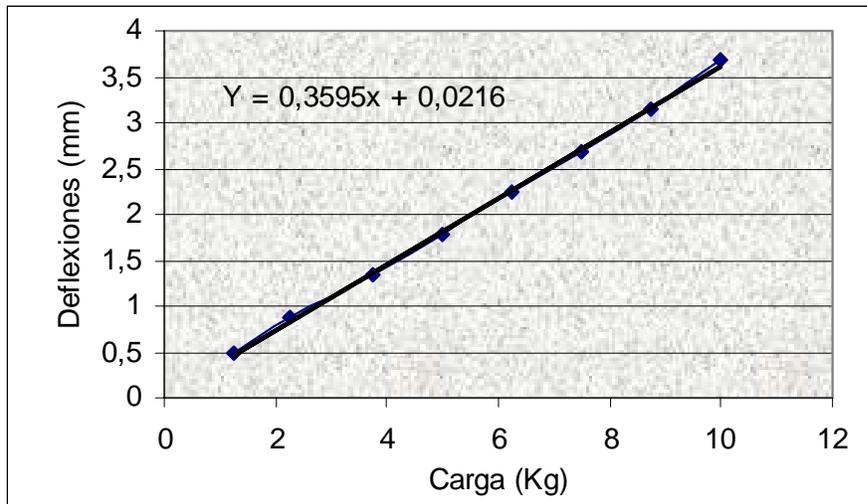


Figura 3.25. Curva carga-deflexión para el resorte A

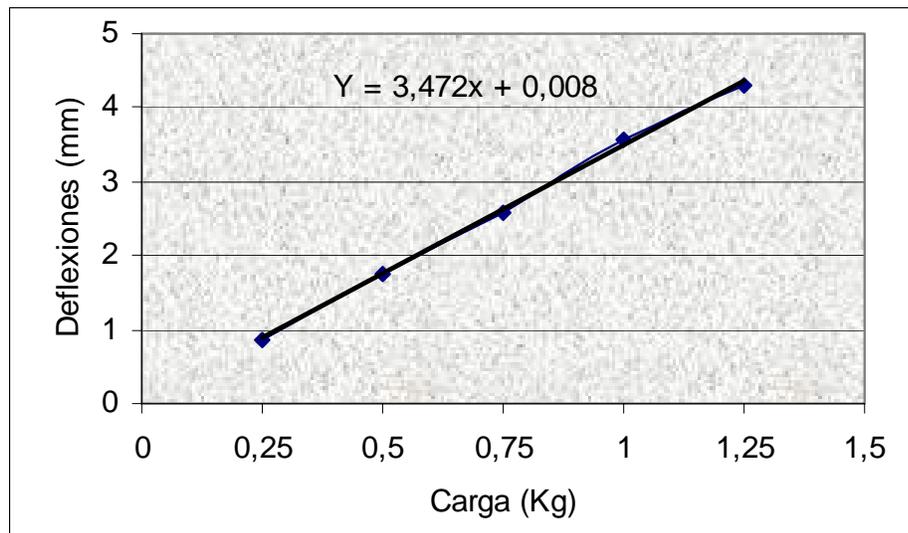


Figura 3.26. Curva carga-deflexión para el resorte B

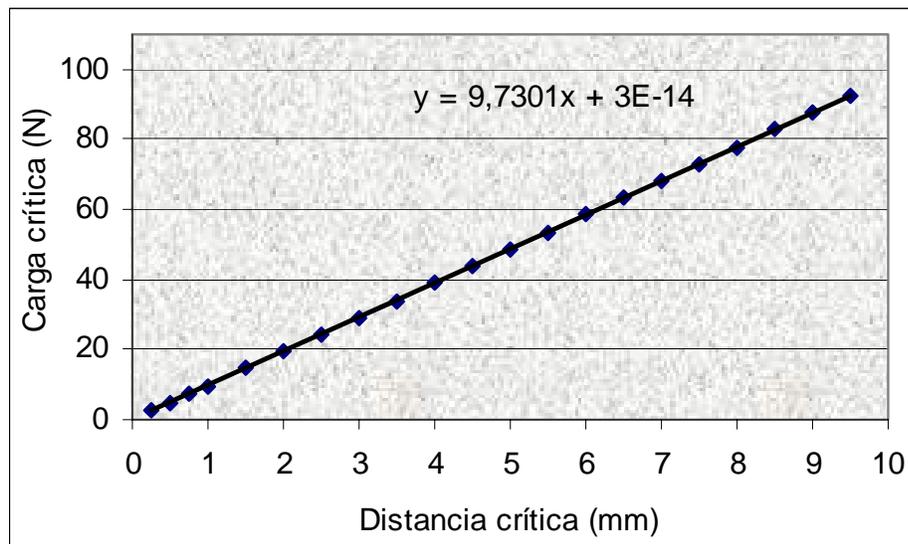


Figura 3.27. Curva distancia crítica-carga crítica para el resorte A

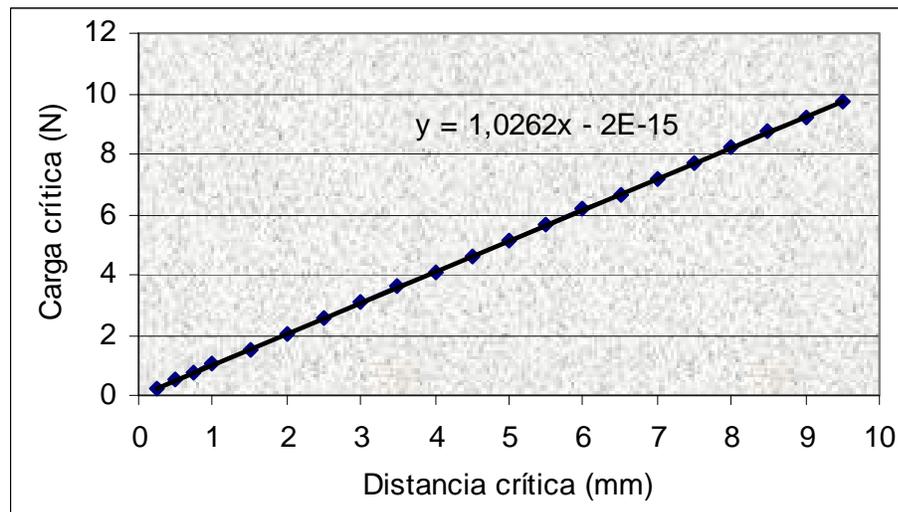


Figura 3.28. Curva distancia crítica-carga crítica para el resorte B

La razón principal por la cual se construyeron estas gráficas fue para facilitar el trabajo de encontrar los valores de cargas críticas una vez determinada la distancia crítica de un recubrimiento ensayado con la prueba de rayado.

Cumpliendo con los requisitos de diseño, ya seleccionados los dos resortes necesarios para la realización de las pruebas de rayado, se midieron sus propiedades físicas tales como: diámetro exterior e interior, diámetro del alambre, número total de espiras y también se conoció el material de los cuales están hechos (tabulados en textos). Luego, se pudo verificar a través del cálculo si los niveles de esfuerzos inducidos por las dos cargas máximas de operación de cada resorte 100N y 10N respectivamente, no sobrepasan los valores nominales del esfuerzo del material. Véase Apéndice A.

3.1.3. Tercera etapa: Construcción de la máquina de rayado

La tercera etapa se fundamentó en la construcción de la máquina de rayado y en la elaboración de un manual para su uso. Las actividades llevadas a cabo se indican en la Figura 3.29.

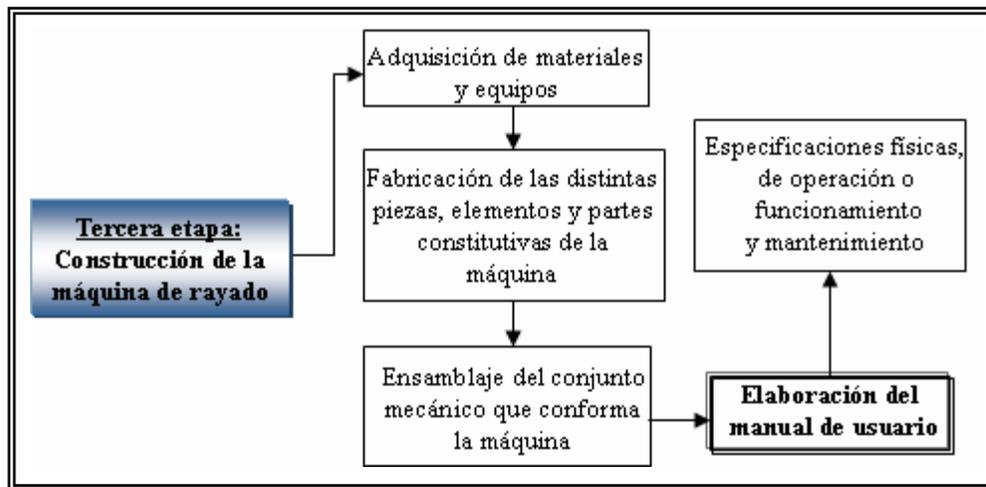


Figura 3.29. Esquema conceptual de las actividades realizadas en la tercera etapa

Durante la tercera etapa, se estudiaron todas las alternativas posibles para la selección, fabricación y adquisición de los materiales, penetradores y equipos

necesarios para llevar a cabo la construcción de la máquina. Asimismo, se hizo inversión económica por parte de los autores de este proyecto para la adquisición de los materiales no disponibles en los Laboratorios del Departamento de Mecánica. Una vez adquiridos los materiales y ubicados los equipos necesarios para la manufactura de las partes, se procedió a la fabricación de las mismas mediante los distintos procesos de manufactura y maquinarias disponibles en los Laboratorios de Procesos de Manufactura y en el Laboratorio de Metalurgia del Departamento de Mecánica, de la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, así como también en un taller privado, externo a la Universidad de Oriente, el cual fue puesto a la orden de los tesisistas para llevar a cabo la fabricación de piezas. Posteriormente, se procedió a realizar el ensamblaje de todo el conjunto mecánico que conforma la máquina.

Una vez construida la máquina y comprobada la correcta operatividad de ésta, se elaboró un manual para que facilitara su utilización en los ensayos de rayado, en donde se describen básicamente los procedimientos a seguir para su uso (especificaciones de operación) y también las políticas para su mantenimiento.

Para la construcción de la máquina de rayado, se tuvieron que cumplir varias subfases para así concretar ordenada y lógicamente su fase final de construcción y ensamblaje. Una vez construido el equipo, el mismo fue bautizado con el nombre de “RAYANIEL”, debido a la fusión o combinación de dos palabras: de lo que la máquina realizará (rayar) y en honor al segundo nombre de los autores de este trabajo (Daniel).

3.1.3.1. Adquisición de materiales y equipos

A fin de obtener los materiales y equipos para la fabricación de la máquina de rayado “RAYANIEL”, se estudiaron todas las posibilidades de adquisición. Estos materiales y equipos, según el prototipo diseñado son: motor eléctrico; reductor; material para

láminas metálicas, columnas, leva, seguidor y porta-probeta; tornillos, resortes, acople y guardamotor (para el sistema de encendido-apagado del equipo). Debido al alto costo de los principales equipos necesarios para la construcción de la máquina, la mayoría de estos materiales y equipos fueron donados por una organización o empresa externa a la Universidad de Oriente (motor eléctrico, reductor, acople, guardamotor y material metálico). El penetrador estaba disponible en el Laboratorio de Metalurgia del Departamento de Mecánica y el resto del material fue adquirido mediante la inversión económica por parte de los autores del proyecto.

Es importante resaltar, que estos materiales y equipos se ajustan a las condiciones y parámetros de diseño de la máquina de rayado “RAYANIEL”, por lo tanto, su empleo para la fabricación de las partes de la máquina satisface no sólo la resistencia calculada para que la misma resista las cargas de operación normal, sino al criterio de disponibilidad de material y economía. En la Tabla 3.4, se muestran las propiedades mecánicas y composición química del material utilizado para la fabricación de la mayor parte de los elementos constitutivos de la máquina (aluminio aleado). Este material presenta excelentes propiedades como bajo peso, buena resistencia a la corrosión, facilidad relativa de formado y maquinado, apariencia agradable, entre otras.

Tabla 3.4. Material utilizado para la fabricación del bastidor, columnas, ángulos de sujeción, porta resorte y soportes en general de la máquina de rayado

Material			
Aluminio Aleado			
Propiedades mecánicas		Composición química (%)	
Resistencia a la cadencia (σ_y)	278,5 MPa/40,4 Ksi	Silicio (Si)	0,72
		Hierro (Fe)	0,51
Resistencia última (σ_u)	313,5 MPa/45,45 Ksi	Cobre (Cu)	0,26
		Zirconio (Zn)	0,11
Porcentaje de elongación (E)	(16,5-16,7) %	Cromo (Cr)	0,18

3.1.3.2. Fabricación y ensamblaje de las distintas piezas, elementos y partes constitutivas de la máquina de rayado “RAYANIEL”

Láminas metálicas (inferior y superior), soportes verticales (columnas) y ángulos de sujeción de la lámina superior: Los distintos cortes de estas partes, se hicieron con el empleo de una tronzadora tradicional; éstas fueron conformadas según las dimensiones de mayor importancia arrojadas en los cálculos de diseño.

Correspondiendo a las especificaciones de diseño, el espesor de las láminas superior e inferior (iguales en dimensiones) supera al espesor mínimo admisible y al igual que las dimensiones de las columnas, por tanto tales dimensiones del material empleado (aleación de aluminio) satisfacen a los requerimientos de diseño. Cabe resaltar que el ancho y el largo de estas láminas así como la altura de las columnas fueron adoptadas en función al espacio requerido para disponer en la lámina inferior al motor eléctrico y al reductor. Las columnas, también se mecanizaron en función a los cálculos de diseño y los ángulos de sujeción de acuerdo al ancho de las columnas. En la Figura 3.30, se observa una de las cuatro columnas y la plancha metálica con sus respectivas dimensiones y, en la Figura 3.31 el bastidor de la máquina.

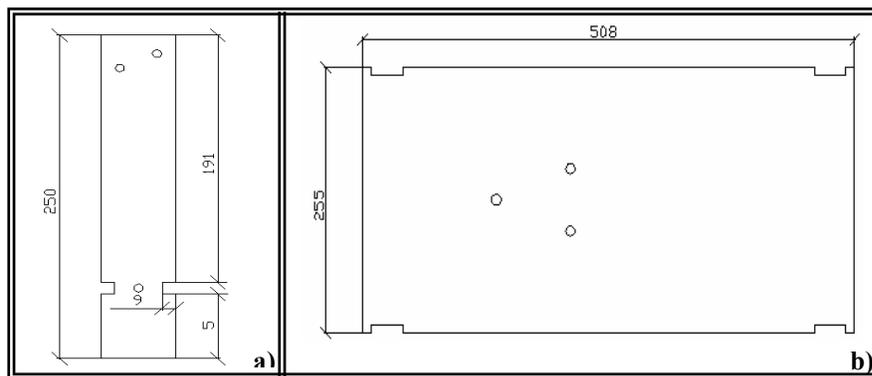


Figura 3.30. Dimensiones de la columna, de la lámina inferior y superior
a) Vista de frente de la columna; b) Vista de planta de las láminas
(las dimensiones están en mm)

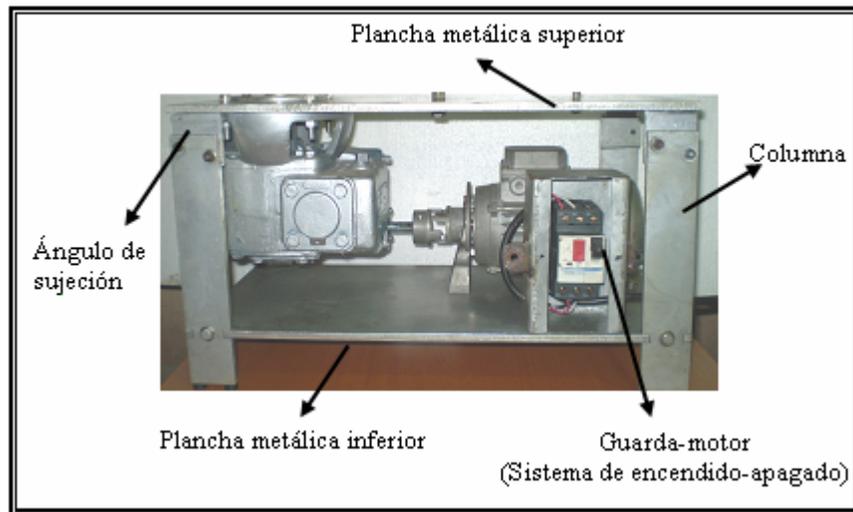


Figura 3.31. Bastidor de la máquina de rayado

Mecanizado y conformado de las cubiertas metálicas verticales de la parte inferior de la máquina: Estas cubiertas se cortaron con una tronzadora y sus partes extremas fueron dobladas con una prensa a fin de permitir su sujeción con las columnas. Las dimensiones de corte se tomaron cerciorándose que las mismas cubrieran toda la parte inferior del montaje de la máquina y considerando además, un espacio vertical para la ventilación de esta parte. El material utilizado fue aluminio comercial de bajo espesor. La Figura 3.32, muestra las fotografías de estas láminas una vez instaladas en la máquina.

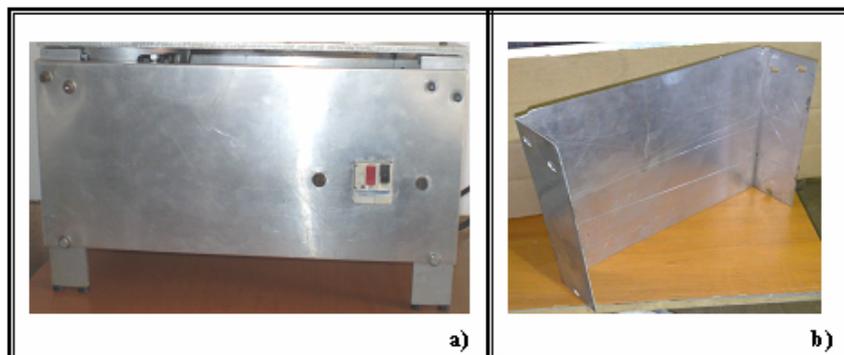


Figura 3.32. Láminas metálicas verticales utilizadas para cubrir la parte inferior de la máquina. a) Cubierta frontal; b) Cubierta lateral.

Fabricación del eje: La fabricación de este elemento se hizo en función de la disponibilidad de material y de la facilidad de acople al reductor. Para ello se utilizó una barra de acero AISI 1020 en estado de recocido de 32mm de diámetro. La longitud del mismo (200mm) se fijó a una altura conveniente con la finalidad que al acoplarle en su extremo la leva, ésta pudiera realizar su función empujando al seguidor y éste último al dispositivo móvil donde se encuentra roscado el penetrador.

Se utilizó una sierra alternativa para cortar al eje en su dimensión establecida y el torno para realizarle un refrentado en ambas caras. El eje fabricado, se muestra en la Figura 3.33.



Figura 3.33. Eje mecanizado

Fabricación de la leva: Este elemento de máquina se fabricó de acuerdo a las especificaciones de diseño ya explicadas en la Sección 3.1.2.3. Se emplearon los programas AUTOCAD y SOLIDWORK para la transcripción de los valores de diseño, ya que esta pieza tuvo que ser fabricada con un proceso de fabricación distinto a los realizados en las máquinas-herramientas tradicionales.

Para el mecanizado y conformado de las dimensiones requeridas para la leva, se usó un centro de mecanizado numérico (CNC), el cual se programó transfiriéndole la información de diseño tabulada en los programas ya mencionados. Posteriormente, la pieza de trabajo (acero AISI 1020) fue colocada en el equipo para su debido mecanizado automático.

En la Figura 3.34, se muestran unas fotografías que captan el proceso de fabricación así como el aspecto final de la pieza.

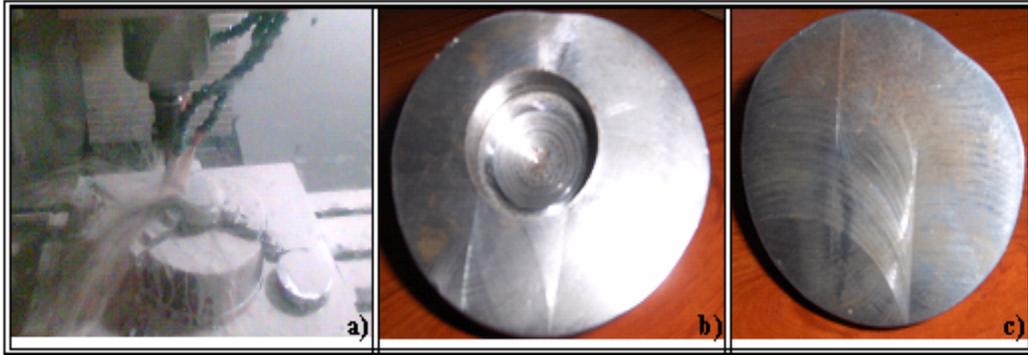


Figura 3.34. Leva con perfil de velocidad constante fabricada con CNC.
a) Proceso de fabricación; b) Vista inferior; c) Vista superior o de planta.

Fabricación del seguidor: Siguiendo las consideraciones de diseño del mecanismo leva-seguidor, este elemento fue fabricado tomando una barra cilíndrica de acero inoxidable, y utilizando la fresadora se llevó a cabo un proceso de planeado en uno de sus extremos, obteniéndose una superficie de sección rectangular. En ese punto se soldó el dispositivo de articulación del rodamiento. En el otro extremo, con el uso del torno se mecanizó hasta obtener un diámetro deseado para realizar un roscado que sirviera de acople entre la rótula y el seguidor.

Con el fin de limitar el funcionamiento del seguidor en la misma dirección de rayado, se fabricó una base de sujeción del seguidor empleando una platina de acero inoxidable, a la cual se le hizo un corte rectangular en uno de sus extremos para que calzara a la medida de la superficie rectangular del seguidor y en su otro extremo se procedió a realizar un proceso de doblado a 90° que sirviera como base de sujeción a la placa superior.

En la Figura 3.35, se muestra el seguidor ya fabricado y su soporte guía.

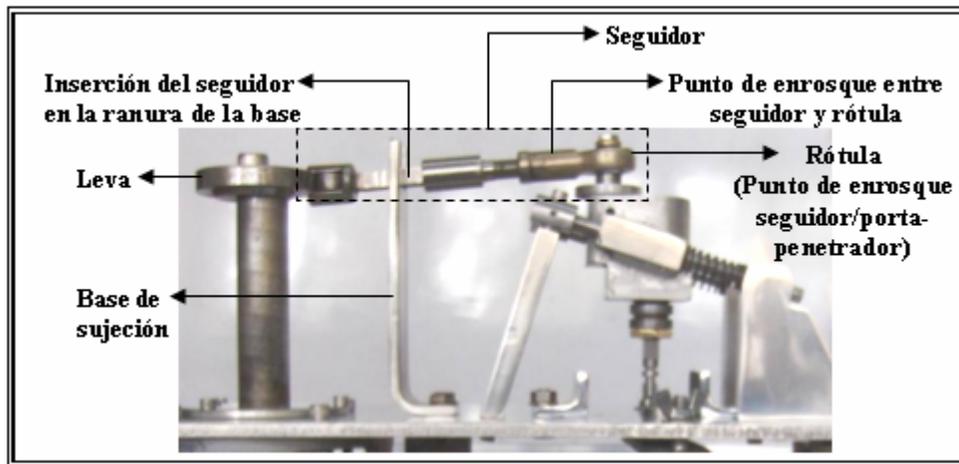
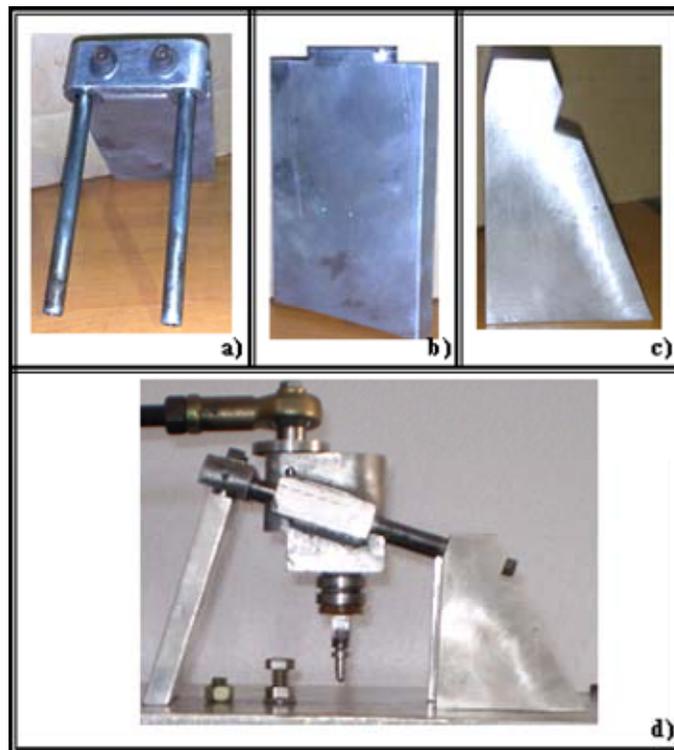


Figura 3.35. Aspecto final del seguidor y de su soporte una vez fabricados

Fabricación de los elementos de sujeción de las barras o ejes guías: Las barras guías utilizadas se seleccionaron de acuerdo al acople que éstas debían tener con el porta-resorte/porta-penetrador con el objeto de que su desplazamiento se llevara a cabo sin ninguna restricción. La superficie de estas barras se rectificó haciendo un leve desbaste mecánico con lija de tamaño de grano fino hasta lograr una superficie más lisa con poca fricción.

Los soportes de estos ejes guías se obtuvieron primeramente utilizando una tronadora para cortar el material en bruto (aluminio aleado) en secciones convenientes para su posterior conformado. Después, con el empleo de la fresadora se le dio forma al material hasta conseguir dimensiones prefijadas (véase el Apéndice E: planos de la máquina). Por otra parte, se utilizó un taladro de mano para realizar agujeros en estos elementos, tanto en su parte superior (para articular las barras guías) como en su parte inferior (para articularlos con la plancha superior). En la Figura 3.36, se puede observar de manera individual el aspecto final de estos elementos de sujeción así como todo el conjunto ya ensamblado.



**Figura 3.36. Dispositivos de sujeción de las barras guías.
a) Barras o ejes guías; b) Soporte A; c) Soporte B; d) Todo el conjunto.**

Unión de caminas al porta-resorte/porta-penetrador y roscado del penetrador: El elemento escogido para colocar los resortes y para que simultáneamente sirviera como acople del penetrador, es un dispositivo empleado para cortar vidrio. No obstante, por sus ventajas de operación, el mismo fue usado para construir la máquina de rayado. Inicialmente las camisas de estos dispositivos estaban dispuestas horizontalmente, de esta forma fueron cortadas con una sierra alternativa para luego ser soldadas a éste con el ángulo de inclinación fijado (20°).

Esta unión permanente se llevó a cabo con un equipo de soldadura de alta frecuencia, recordándose que el material con que está hecha esta parte es aluminio y los procesos tradicionales de unión por soldadura no son los indicados para realizar un proceso de esta naturaleza.

Aprovechando que el dispositivo móvil tiene una barra vertical que hace la función parecida a la de un pistón, se le hizo un roscado a la parte superior del penetrador con un torno tradicional para poder roscarlo en el extremo libre inferior de dicha barra (roscada también internamente). Una vez colocado el resorte en el espacio cilíndrico y colocándole una chapa asegurada con un anillo de retención, se garantiza que el rayado pueda realizarse tal como se espera, es decir, la barra vertical donde se encuentra roscado el penetrador presione o comprime poco a poco al resorte (restringido por la chapa) a medida que el seguidor empuja el dispositivo y el mismo se mueve linealmente. La Figura 3.37, muestra este dispositivo y los detalles de ensamblaje.

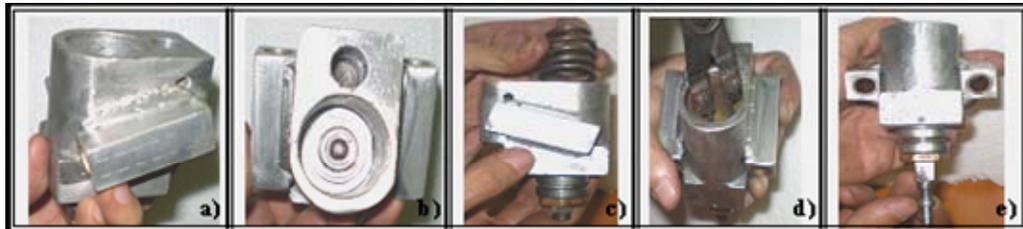


Figura 3.37. Dispositivo móvil usado como porta-resorte/porta-penetrador
a) Unión de la camisa por soldadura; b) Vista de planta; c) Introducción del resorte; d) Colocación de chapa aseguradora; e) Roscado del penetrador.

Fabricación del porta-probetas: Se utilizó una sección rectangular de acero de espesor determinado, cortada con una tronadora. El material fue preparado superficialmente y recubierto con pintura anticorrosiva y decorativa. En sus dos extremos, se les hizo dos agujeros con un taladro de mano; allí se introdujeron los dos tornillos para unirse con soldadura de arco eléctrico: el fin fue obtener un conjunto rígido que al ser roscado con unas tuercas tipo mariposa, éste pudiera subir y bajar hasta llegar a la posición de ensayo (cuando la probeta se encontrase muy cerca del penetrador). Para realizar esta función, se usó una barra de sección circular de acero inoxidable, cuyo corte se llevó a cabo con una sierra alternativa. Esta barra sirve de soporte y a su vez con su movimiento vertical posicionaría a la probeta en el punto de ensayo. Su unión a la barra de sección rectangular se logró con un taladro de

sobremesa, haciendo un agujero en una de sus caras, con el fin de atornillarla a la placa (con agujero también previamente hecho) en un punto muy cercano a su centro. Para eliminarle las rebabas resultantes del proceso de mecanizado y lograr una superficie totalmente horizontal, a esta barra se le hizo un refrentado en el torno.

Es importante resaltar que una vez fabricadas las partes constitutivas del soporte vertical del porta-probetas, fue necesario hacerle dos agujeros a la lámina metálica superior de la máquina, procurando que la barra cilíndrica del soporte de elevación coincidiera con el agujero realizado en lámina metálica superior (previamente obtenido con un el uso de diferentes brocas de un taladro de mano) en el punto de inicio del rayado, ya que así la raya se realizaría en la parte sólida de este soporte cilíndrico. Realizado este procedimiento, se insertó esta pieza desde la cara inferior de la plancha metálica superior en los agujeros previamente hechos en ésta, para así poder roscar los tornillos con unas roscas tipo mariposa, con el fin de que todo este conjunto se desplace hacia arriba y hacia abajo, adaptando a la probeta a la mejor condición de ensayo. En la Figura 3.38, se observa este dispositivo de movimiento vertical.

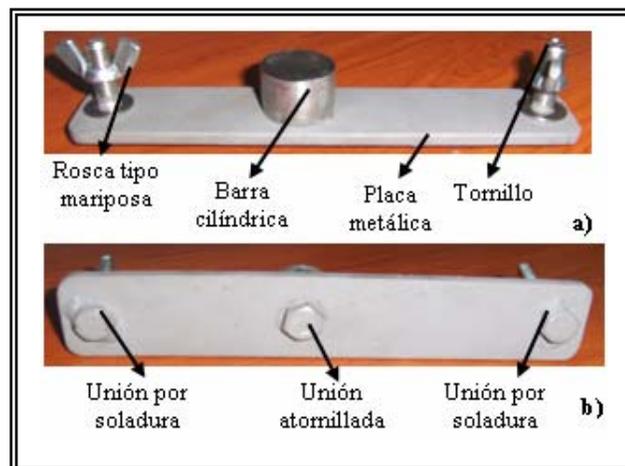


Figura 3.38. Dispositivo vertical del porta-probetas
a) Vista frontal; b) Vista inferior.

Las prensas horizontales de sujeción para la probeta se hicieron de acero, también preparadas superficialmente y cromadas. Se utilizaron dos ángulos que servirían para tal fin, cortados con una tronzadora; se les realizó una ranura o canal a cada una empleando un equipo de oxiacetileno, a fin de poder deslizarlas horizontalmente en unos tornillos ya dispuestos en la lámina metálica superior de la máquina. Con ello se logró la sujeción con tuercas de estas mordazas y por ende adaptándose a las dimensiones horizontales de la probeta y a su vez limitándola a moverse. En la Figura 3.39, se muestran estas prensas (mordazas) y en la Figura 3.40, se presenta el sistema completo del porta-probetas, una vez instalado el dispositivo de movimiento vertical y las prensas horizontales de sujeción.



Figura 3.39. Mordazas para sujeción de probetas.

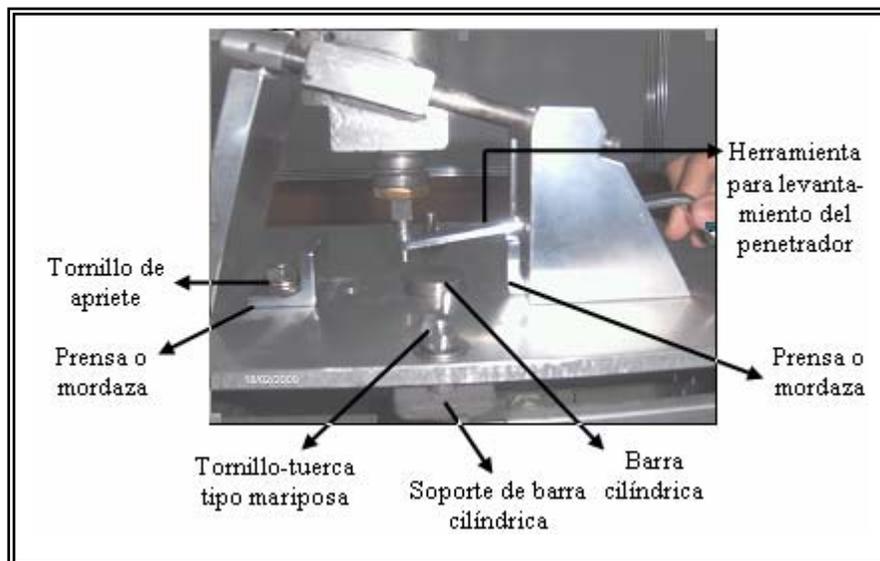


Figura 3.40. Sistema de porta-probetas

3.1.3.3. Elaboración del manual de usuario de la máquina de rayado “RAYANIEL”

Con el propósito de documentar la forma de utilización de la máquina y las condiciones óptimas de ensayo, se elaboró un manual donde se ofrece toda la información pertinente acerca del funcionamiento, mantenimiento, especificaciones físicas y ensamblaje del equipo. Este material se puede consultar en el Apéndice C.

3.1.4. Cuarta etapa: Caracterización de probetas y ensayos de rayado

La cuarta etapa, constó de dos subfases: 1) caracterización de las probetas por medio de una serie de ensayos programados y 2) realización de pruebas de rayado en las probetas utilizando la máquina construida, así como la aplicación del método de cinta adhesiva a los mismos recubrimientos evaluados. La Figura 3.41, muestra la forma como fueron realizados estos ensayos.

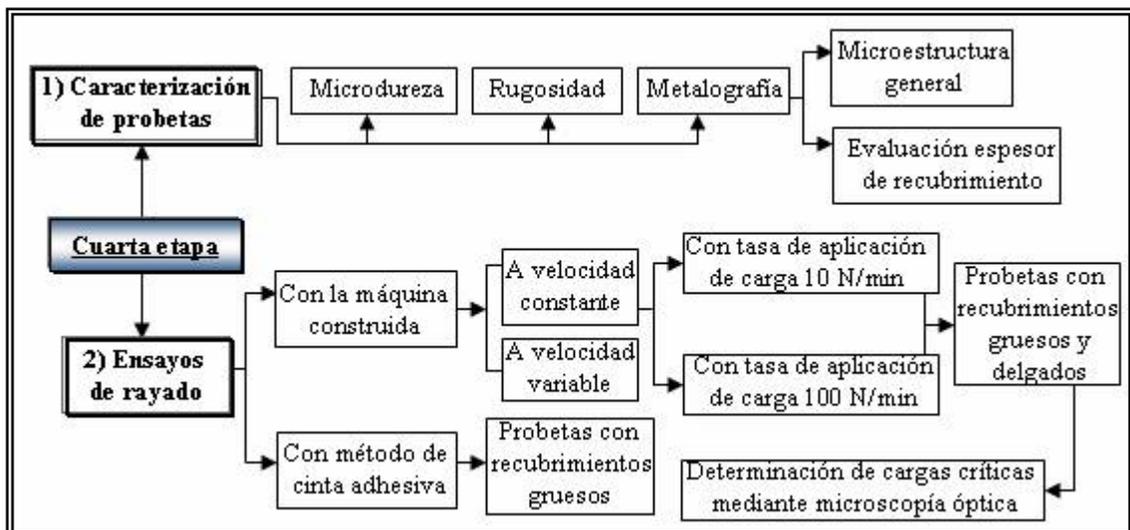


Figura 3.41. Procedimiento metodológico llevado a cabo para cumplir la cuarta etapa

Como puede apreciarse en la figura anterior, para el cumplimiento de la cuarta etapa se hizo primeramente la caracterización de las probetas: microdureza, rugosidad y metalografía. Los recubrimientos ensayados fueron: pintura automotriz con fondo fosfatado, cobreado, cromo decorativo, cromo duro y recubrimiento PVD. Con la medición de la microdureza de los recubrimientos seleccionados y ensayados, se clasificaron de acuerdo a su número de dureza Vickers (HV) en duros y blandos. Por otra parte, mediante la aplicación de los pasos del pulido mecánico, se prepararon las probetas para su estudio metalográfico, observándose con el uso de microscopía óptica su microestructura. También, se evaluó el espesor de los recubrimientos, para definir cuáles eran de capas finas ($\leq 10\mu\text{m}$) y de capas gruesas ($\geq 10\mu\text{m}$). Ésto se hizo midiendo directamente bajo el microscopio los espesores de las capas observadas de la sección transversal de las probetas y mediante ultrasonido.

En cuanto a la realización de las pruebas de rayado, éstas se dividieron en dos partes. La primera parte de los ensayos se hicieron a velocidad variable y a velocidad constante, con el uso de dos mecanismos distintos. En los ensayos con velocidad constante, se fijaron dos valores distintos de una misma variable (tasa de aplicación de carga): 10N/min y 100N/min (según norma ASTM C1624-05), ya que dependiendo de la naturaleza (espesor y microdureza) de cada recubrimiento debe seleccionarse cuál es su carga máxima de ensayo, para así poder crear sobre los recubrimientos a ensayar, niveles de esfuerzos considerables que permitan producir su despegue del sustrato y por consiguiente estimar sus cargas críticas. La segunda parte, constó de la realización de la prueba de cinta adhesiva a los recubrimientos con pintura, tomando como patrón el criterio de ensayo de la norma ASTM D3359-97.

3.1.4.1. Caracterización de probetas

Para el cumplimiento de esta subetapa del proyecto, primeramente fue necesario seleccionar una serie de probetas para la deposición de los recubrimientos. De

acuerdo a la disponibilidad de material se escogieron placas metálicas de acero simple al carbono de 3mm de espesor, éstas fueron cortadas en secciones rectangulares y preparadas superficialmente con lijas de tamaño de grano de 360 y 400, con el propósito de conseguir una superficie libre de óxidos, una rugosidad homogénea en toda la sección y así obtener un perfil de anclaje adecuado para propiciar mejores condiciones de adhesión entre recubrimiento y sustrato. Véase Figura 3.42.

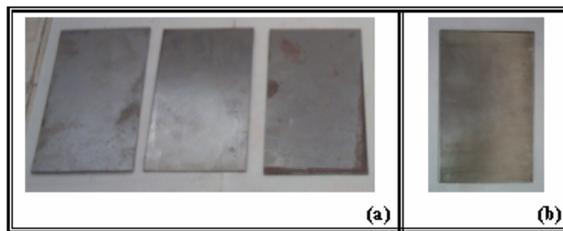


Figura 3.42. Probetas metálicas utilizadas para ser recubiertas.
a) Sin preparación superficial (antes de la deposición del recubrimiento);
b) Con preparación superficial (lista para la deposición)

Siete (7) piezas de este tipo de sustratos fueron escogidos. A cinco (5) de ellas se les depositó pintura automotriz en una industria de ensamblaje de automóviles mediante un proceso de deposición electrostático y las otras dos (2) restantes se recubrieron con cobre y cromo decorativo en un taller comercial utilizando una proceso de deposición electroquímico. Véase Figura 3.43.

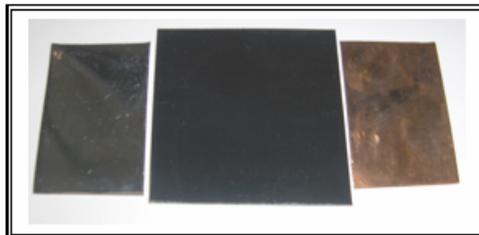


Figura 3.43. Imágenes de las probetas recubiertas; de izquierda a derecha: cromo decorativo, pintura automotriz y cobreado.

Adicionalmente, se consiguieron dos muestras de sección circular (ambas de acero simple al carbono); una recubierta con cromo duro (Cr duro) y otra con nitruro de zirconio (ZrN). Estas muestras se presentan en la Figura 3.44.

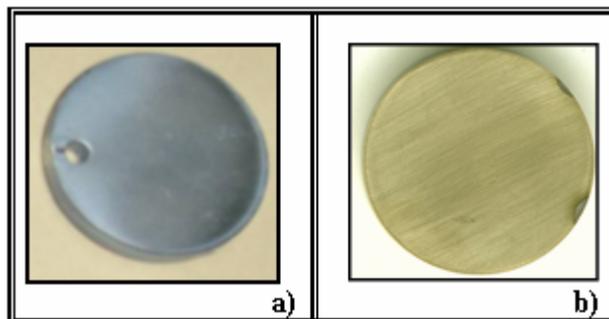


Figura 3.44. Muestras adicionales para ensayo
a) Recubrimiento de Cr duro; b) Recubrimiento de ZrN

Las características y descripción de estas muestras se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características de las probetas seleccionadas para ensayo

Código	Procedencia	Descripción (Película)	Proceso de Deposición	Substrato
R ₁	Mitsubishi Barcelona (Pintura automotriz)	Sólo fondo (Fosfatado)	Rociado electrostático	Lámina de acero AISI 1010
R ₂		Fondo + 1 Capa de pintura		
R ₃		Fondo + 1 capa de pintura + clear(brillo)		
R ₄		Fondo + 2 capas de pinturas		
R ₅		Fondo + 2 capas de pintura + clear(brillo)		
R ₆	Taller Níquel-Cromo Barcelona	Cobreado	Electrolítico	Lámina acero AISI 1010
R ₇		Cromo decorativo		Disco acero AISI 1030
R ₈		Cromo duro		Disco acero AISI 1045
R ₉	Teer Coatings England	Nitruro de Zirconio (ZrN)	Deposición Física en Fase Vapor (PVD)	Disco acero AISI 1045

El proceso formal de caracterización se realizó una vez que se codificaron las muestras recubiertas. Inicialmente se les hizo ensayo de microdureza Vickers a los recubrimientos y a sus respectivos sustratos, logrando conseguir por ensayo y error la carga más indicada para medir esta propiedad mecánica. La Figura 3.45, muestra el equipo utilizado para la realización de estos ensayos.



Figura 3.45. Equipo para medición de Microdureza Vickers (HV)

Luego, se midió la rugosidad de cada recubrimiento (incluyendo su sustrato) con el empleo de un rugosímetro. Este procedimiento se llevó a cabo midiendo la rugosidad en distintas zonas de las muestras para así obtener al final un promedio, es decir, el valor más representativo. El proceso de medición de esta característica se ilustra en la Figura 3.46.



Figura 3.46. Rugosímetro utilizado en la caracterización tribológica de las probetas

Finalmente, se realizó metalografía a las probetas: observación microscópica de microestructura de substratos y superficie de recubrimientos, conteo de poros y medición de espesor de los recubrimientos. El uso de un microscopio óptico permitió ver estos detalles en las probetas.

El cálculo del espesor de película de los recubrimientos y diámetro de poros, se logró utilizando un programa de análisis de imágenes (APPLIED VISION). Véase Figura 3.47.

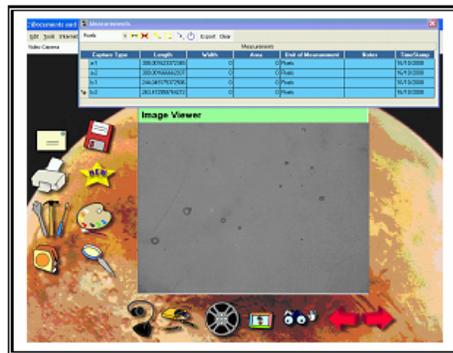


Figura 3.47. Pantalla del programa APPLIED VISION

Las dimensiones obtenidas con este programa se reportan en píxeles (px), por ello se utilizó una reglilla para calcular la magnificación (Mag) arrojada por el programa (Figura 3.48) y el resultado real de la medida observada microscópicamente se determinó con la siguiente Ec. 29.

$$Mag = \frac{D_A}{D_R} \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

D_A = Dimensión ampliada del instrumento medida con el programa [px].

D_R = Dimensión real del instrumento medida con el programa [px].

Encontrada la magnificación (Mag), aplicando una simple regla de tres directa se pudo calcular las dimensiones reales de las imágenes capturadas.

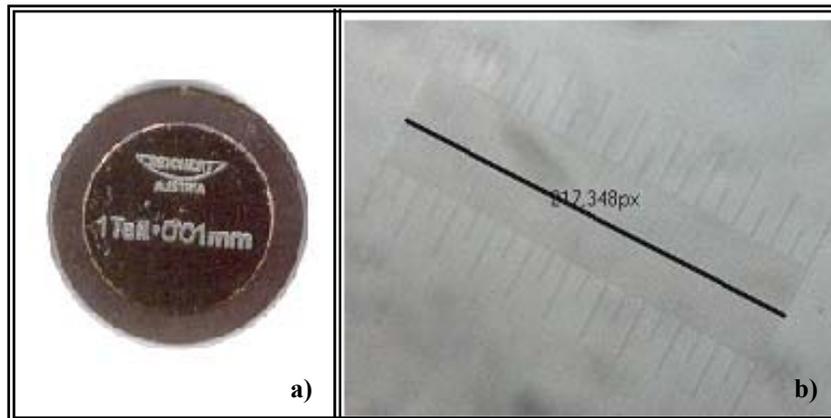


Figura 3.48. Reglilla utilizada para la determinación de dimensiones reales con el uso del programa APPLIED VISION
a) Contenedor del instrumento. b) Imagen ampliada de la reglilla (Mag. 50X) del microscopio óptico MC 2724.

Para la medición del espesor de los recubrimientos fue necesario tomar pequeñas muestras de cada recubrimiento, empotrarlas en resinas y pulirlas mecánicamente para su observación microscópica. En la Figura 3.49, se pueden apreciar algunas muestras empotradas y las interfases del sistema recubrimiento/substrato vista con microscopía óptica.

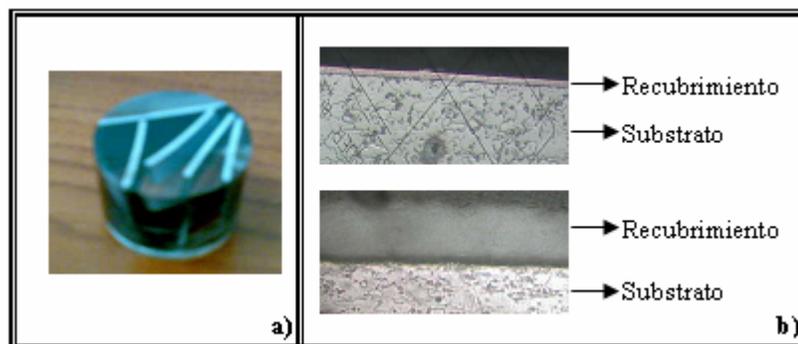


Figura 3.49. a) Muestras empotradas en resinas; b) Espesor de películas de recubrimientos (Mag. 400X)

Finalmente, en la Tabla 3.6, se registraron las características de las probetas, tales como: dureza y rugosidad del sistema recubrimiento/substrato, espesor y cantidad de poros detectada en algunos de los recubrimientos. Las durezas y espesores de los compósitos permitieron dividir el total de las muestras en dos grupos: recubrimientos gruesos y blandos (R1, R2, R3, R4 y R5) y, recubrimientos delgados y duros (R6, R7, R8 y R9). Se debe aclarar que la clasificación de los compósitos según su dureza en blandos y duros, se hizo para diferenciarlos entre sí y no por corresponder a criterios de clasificación ya preestablecidos.

Tabla 3.6. Características de los recubrimientos ensayados

M U E S T R A	Dureza			Espesor recubrimiento (μm)					Rugosidad (μm)		Poros Cant Diám. (μm)	Microscopía óptica de superficies Mag. 100X
	Substrato HV 15g 100g	Compuesta (Subs+Rec) HV 15g	Tipo	Método de medición			Prom.	Tipo	Subst.	Rec.		
				A	B	C						
R ₁	193,5 109,9	11,3	Blando	35,98	20	45,71	33,90	Grueso	0,775	0,294	----	
R ₂	193,5 109,9	8,5	Blando	64,35	130	118,62	104,32	Grueso	0,775	0,228	----	
R ₃	193,5 109,9	7,7	Blando	109,22	110	116,52	111,91	Grueso	0,775	0,108	13 2,6	
R ₄	193,5 109,9	8,2	Blando	76,94	65	80,42	74,12	Grueso	0,775	0,253	----	
R ₅	193,5 109,9	7,0	Blando	89,32	86	89,11	88,11	Grueso	0,775	0,173	13 3,2	

Leyenda. Método A: Medición por ultrasonido. Método B: Con microdurómetro. Método C: Con metalografía. Subst: Substrato. Rec: Recubrimiento. Cant.: Cantidad. Diám.: Diámetro. Mag.: Magnificación.

Tabla 3.6. Características de los recubrimientos ensayados (continuación)

M U E S T R A	Dureza			Espesor recubrimiento. (μm)					Rugosidad (μm)		Poros Cant Diám. (μm)	Microscopía óptica de superficies Mag. 100X
	Substrato HV 100g	Compuesta (Subs+Rec) HV 100g	Tipo	Métodos de medición			Prom.	Tipo	Subst.	Rec.		
				A	B	C						
R ₆	109,9	78,7	Duro	3,49	10	15,65	9,73	Delgado	0,775	0,213	----	
R ₇	109,9	435,0	Duro	5,92	6,5	6,78	6,40	Delgado	0,775	0,281	----	
R ₈	269,5	590,3	Duro	13,12	9	8,44	10,19	Delgado	0,153	0,395	----	
R ₉	303,3	612,9	Duro	1,9	----	1,75	1,83	Delgado	0,103	0,084	----	

Leyenda. Método A: Medición por ultrasonido. Método B: Con microdurómetro. Método C: Con metalografía. Subst.: Substrato. Rec: Recubrimiento. Cant.: Cantidad. Diám.: Diámetro. Mag.: Magnificación.

3.1.4.2. Ensayos de rayado

Los ensayos de rayado se hicieron: 1) con la máquina construida y 2) con el método de cinta adhesiva. Los primeros ensayos, se llevaron a cabo a velocidad variable, es decir, con un mecanismo de yugo escocés y, a velocidad constante, con el mecanismo final con el cual operará la máquina (leva-seguidor). Los segundos, se hicieron de manera manual, según el procedimiento de ensayo de la norma ASTM D3359-97 (véase Apéndice D).

Ensayos con la máquina construida: Como ya se explicó, estos ensayos se realizaron de dos formas: a velocidad variable y a velocidad constante. A continuación se detalla el procedimiento de ensayo para cada condición

Ensayos a velocidad variable: Aprovechando que la máquina ofrece la facilidad de adaptación de mecanismos para la transmisión de movimiento lineal al penetrador y a la baja velocidad angular a la salida del eje ($\approx 0,5\text{rev/min}$), se hicieron ensayos acoplándole al equipo el mecanismo de yugo escocés, el cual proporciona una velocidad variable.

El diámetro del eje (32mm) permitió que en su periferia se le hiciera una articulación con la biela (responsable de empujar al porta/penetrador). Este arreglo se dispuso para que una vez que el eje girara de 0 a 180°, el penetrador hiciera una raya de aproximadamente 10mm.

Como se sabe de antemano que durante el recorrido del penetrador la velocidad no es constante, se registraron los datos de interés (diámetro y velocidad angular del eje, y la longitud de la biela). Empleando los conocimientos básicos de determinación de velocidades de manera gráfica (cinemáticamente), se calculó la velocidad para

diferentes puntos (o grados). El perfil de velocidad obtenido se muestra en la Figura 3.50.

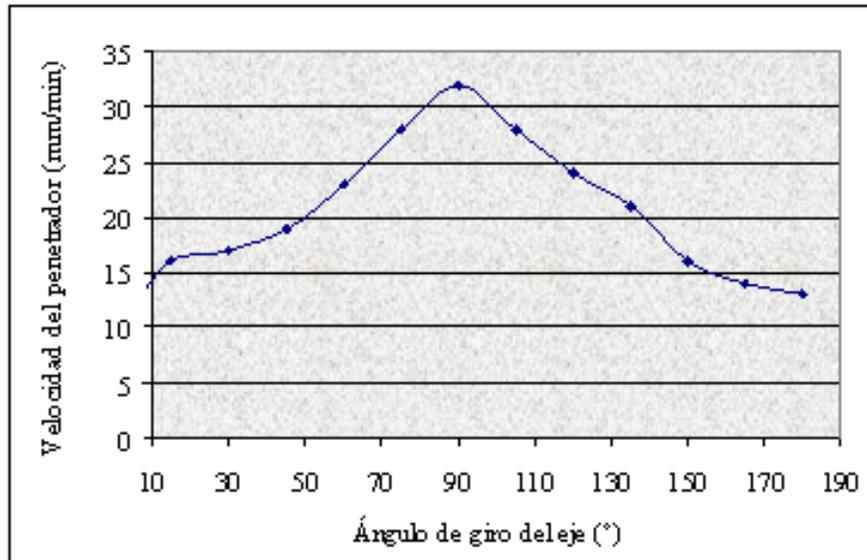


Figura 3.50. Velocidad del penetrador proporcionada por el mecanismo yugo escocés

Nótese que la velocidad comienza con una magnitud de 12mm/min, aumentando progresivamente casi al doble (32mm/min) hasta llegar aproximadamente a la mitad de la longitud de rayado, luego disminuye, muy cercanamente a la velocidad a la cual comenzó el recorrido. Para efectos de discusión, se tomará como valor de referencia que el rayado con este mecanismo se realizó a una velocidad variable promedio de aproximadamente 20mm/min.

Es importante aclarar que cuando el eje ha girado 90° grado, el penetrador ha realizado una huella de aproximadamente de 5mm de longitud sobre la probeta. Ya en este punto, se ha aplicado suficiente carga para que el recubrimiento se desprege del substrato y sea posible observar los efectos de la velocidad variable en el daño del recubrimiento. En la Tabla 3.7, se presentan las variables de ensayos obtenidas con este tipo mecanismo.

Tabla 3.7. Variables y parámetros del ensayo obtenidos con el mecanismo yugo escocés

Variable o parámetro de ensayo	Valor	
	Para una carga máxima ($L_{\text{máx}} < 20 \text{ N}$)	Para una carga máxima ($L_{\text{máx}} > 20 \text{ N}$)
Velocidad de rayado [mm/min]	20	20
Tasa de aplicación de carga [N/min]	20	200
Longitud de rayado [mm]	10	10

En la Figura 3.51, se presenta una fotografía del mecanismo una vez acoplado a la máquina, el cual fue montado antes de hacer el ensamblaje final y definitivo de la máquina de rayado. El fin de esto fue observar la variación de los resultados encontrados con las rayas obtenidas a velocidad constante respecto a las realizadas a velocidad variable.

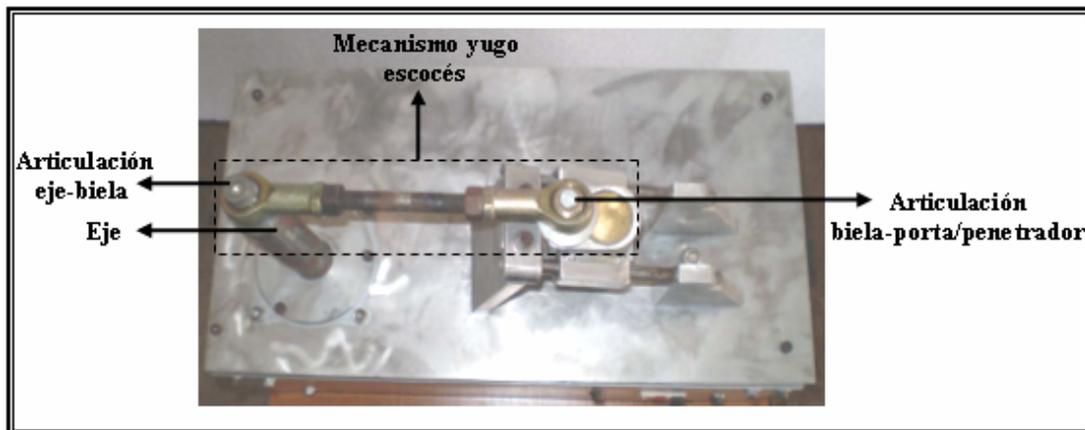


Figura 3.51. Vista superior del mecanismo de velocidad variable utilizado

Cabe destacar que por ser utilizado este primer prototipo físico para la realización del rayado en las probetas recubiertas (pruebas pilotos), se verificaron las siguientes condiciones de operación de toda la máquina: recalentamiento del motor, acople motor-reductor, alineación motor-reductor, nivel de ruido, nivel de vibración,

tiempo de ensayo, longitud de rayado, lubricación de las partes, entre otros; obteniéndose como resultado un estado normal de funcionamiento.

Como ya se sabe, los recubrimientos ensayados fueron: pintura automotriz, cobreado, cromo (decorativo y duro) y nitruro de zirconio (ZrN). Con la realización de ensayos preliminares con la tasa de aplicación de carga de 200N/min, las probetas recubiertas con pintura automotriz no soportaron esta carga aplicada desde el inicio del ensayo, determinándose que las mismas debían ser ensayadas con una tasa de aplicación menor. Así, esta variable de ensayo fue cambiada a una tasa de aplicación de carga de 20N/min. Los resultados obtenidos con este cambio de variable fueron satisfactorios en vista que no se observó en estos recubrimientos una fractura microscópica inmediata como se consiguió en los ensayos iniciales.

Por otra parte, las demás probetas ensayadas (cobreado, diversos cromo y ZrN) con una tasa de aplicación de carga de 200N/min sí generaron una fractura microscópica adecuada en los recubrimientos (se pudo constatar que se obtienen cargas críticas detectables bajo esta condición de ensayo).

Ensayos a velocidad constante: Aun cuando los ensayos explicados anteriormente, por realizarse a velocidad variable, no cumplen con la mayoría de los parámetros establecidos por la norma ASTM C1624-05; éstos permitieron facilitar la ejecución de los ensayos a velocidad constante. Del mismo modo como se hicieron los primeros ensayos en cuanto a la tasa de aplicación de carga, así mismo se realizaron los ensayos con velocidad constante, sólo que en este caso, los parámetros velocidad de rayado y tasa de aplicación de carga permanecieron constantes.

Igualmente se realizaron ensayos en las mismas probetas utilizadas anteriormente, pero esta vez, cumpliendo con los requisitos de ensayo establecidos en la norma ASTM C1624-05 (véase Tabla 3.1, Sección 3.1.2.1). Para conseguir

resultados más representativos, se realizaron como mínimo tres huellas sobre los recubrimientos objeto de estudio, evaluadas en distintas zonas de su superficie.

3.1.4.3. Determinación de las cargas críticas

Después de haber realizado los ensayos en las muestras recubiertas, tanto a velocidad variable como a velocidad constante, se determinó el punto y el modo de falla de cada recubrimiento, en otras palabras, la carga crítica asociada a cada probeta observada microscópicamente. En algunas probetas, fue difícil determinar el punto de inicio de fractura de los recubrimientos, por ello, se usó reactivo (Nital al 2%) para diferenciar el sustrato del recubrimiento. Con la ayuda del analizador de imágenes APPLIED VISION, se pudo medir las distancias críticas en los recubrimientos, las cuales se tomaron desde el primer contacto de la punta del diamante en el recubrimiento hasta dejar expuesto el sustrato. Como se explicó anteriormente, estos valores se registran en píxeles, y con la utilización de la Ec. 29, se convirtieron a unidades de longitud (mm). La Figura 3.52, muestra la imagen de una huella vista con el analizador de imágenes.

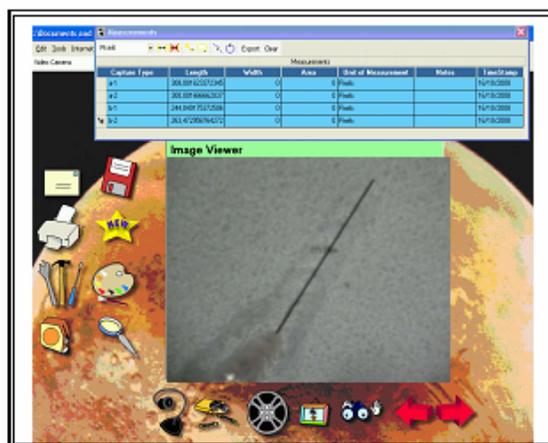


Figura 3.52. Determinación de carga crítica en una muestra recubierta

3.1.4.4. Ensayos de rayado con método de cinta adhesiva

Esta subetapa del proyecto, se llevó a cabo tomando como referencia el método de ensayo de cinta adhesiva expuesto en la norma ASTM D3359-97 a fin de verificar si existe correlación entre la prueba de rayado y este método. Siguiendo lo especificado con la norma, el procedimiento de ensayo se ejecutó como se explica a continuación:

1. Previamente conocido el espesor de película de cada recubrimiento, se escogieron las probetas a las cuales se les realizaría este ensayo. De acuerdo a los resultados descritos en la caracterización de las muestras (véase Tabla 3.6), sólo las probetas recubiertas con pintura automotriz (R1, R2, R3, R4 y R5) fueron las que cumplieron con las exigencias de dicho ensayo, ya que las mismas tienen espesores de película menor a 5mils (125 μ m) y presentan cargas críticas muy bajas en comparación con los recubrimientos metálicos y cerámicos (R6, R7, R8 y R9). La consideración anterior, conlleva a utilizar el Método de Prueba B, el cual es más adecuado para usarse en el laboratorio, en comparación al Método de Prueba A, que es principalmente utilizado en sitios de trabajo y para recubrimientos mayores a 5mils (125 μ m). Véase Apéndice D.
2. La norma establece que debe usarse una cinta específica de tipo semitransparente originalmente 3M N° 710 de 1 pulgada (25mm) de ancho. Sin embargo, las pruebas actuales ya no identifican una cinta específica. Considerando que la cinta estandarizada por la norma ya no está disponible en el comercio, se adquirieron tres tipos de cintas de distintas marcas: 3M y Morropac. Además de la cinta, fue necesario el empleo de objetos cortantes (bisturí), una lupa, borrador de lápiz, una regla y papel de seda. (Véase Figura 3.53).



Figura 3.53. Materiales utilizados en el método de cinta adhesiva

3. Como lo sugiere la norma, para recubrimientos entre 2mils ($50\mu\text{m}$) y 5mils ($125\mu\text{m}$), con la ayuda de una regla y un bisturí se realizaron seis (6) cortes paralelos y seis (6) cortes perpendicularmente entre sí, tal como se muestra en la Figura 3.54.

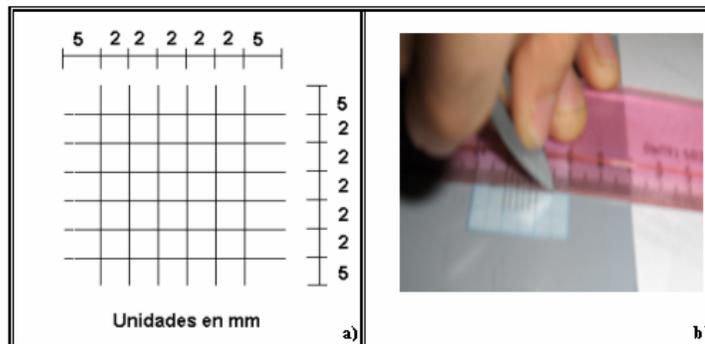


Figura 3.54. a) Representación gráfica de cortes de rayado. b) Técnica de realización de las rayas.

4. Luego de haber obtenido el modelo de rejilla con los cortes realizados sobre el recubrimiento, se limpió la zona de corte con el papel de seda y mediante el uso de la lupa se inspeccionó las incisiones por reflejo de la luz del substrato. Véase Figura 3.55.

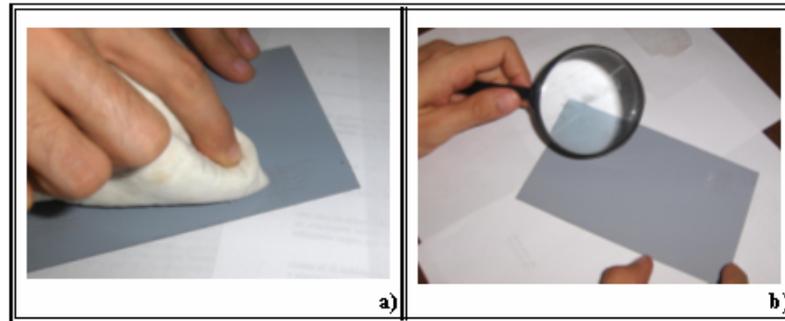


Figura 3.55. a) Limpieza de la zona ensayada; b) Uso de la lupa para la verificación de los cortes realizados

5. Con la cinta de mayor resistencia (previamente determinada), se cortaron secciones de cinta de aproximadamente 75mm. Luego, se colocó el centro de la cinta sobre al rejilla frotándola suavemente con el dedo y procurando que no se formaran burbujas de aire en la interfase. Para asegurar un buen contacto, se frotó la cinta con el borrador de un lápiz. Véase Figura 3.56.

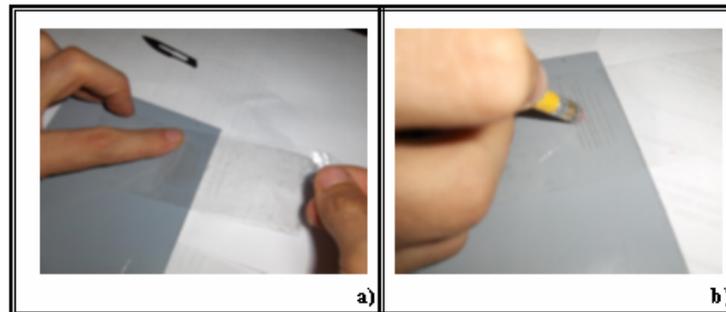


Figura 3.56. a) Técnica de pegado de la cinta; b) Frotación de la cinta con la borra del lápiz

6. Con un margen de tiempo de 90 ± 30 segundos de aplicación, se removió la cinta sujetándola por su extremo libre, halándose rápidamente de regreso sobre sí misma en un ángulo lo más cercano posible a 180° . Véase Figura 3.57.

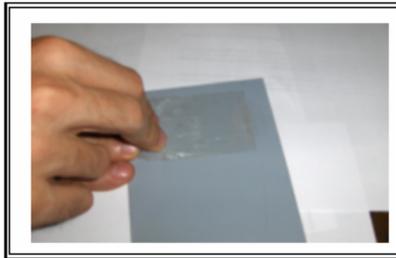


Figura 3.57. Modo de retiro de la cinta

7. Usando la lupa (o para mayor apreciación un estereoscopio), se verificó si había despegue del recubrimiento sobre el substrato. Se evaluó a nivel porcentual la cantidad de remoción de recubrimiento, según la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Patrón para cuantificación de resultados en el ensayo de cinta adhesiva (Fuente: ASTM Designation: D3359-97) [26]

Clasificación	Porcentaje de área removida	Posibles resultados
5B	0% Nada	
4B	Menos que 5%	
3B	5 – 15%	
2B	15 – 35%	
1B	35 – 65%	
0B	Mayor que 65%	

3.2. Materiales Y Equipos Utilizados

3.2.1. Fabricación de la máquina de rayado

3.2.1.1. Materiales

- Planchas de aluminio aleado de 8mm y 12mm de espesor.
- Planchas de aluminio comercial 1mm de espesor.
- Ángulos de sujeción de 8mm espesor.
- Barras de acero simple al Carbono de 10mm y 32mm de diámetro.
- Penetrador Rockwell C.
- Dispositivo para cortar vidrio modificado (aluminio aleado).
- 29 tornillos de $\frac{1}{4}$ x 1" de acero inoxidable.
- 1 tornillo de $\frac{1}{2}$ x $1\frac{1}{4}$ " de acero inoxidable.
- 2 tornillos de $\frac{1}{4}$ x 2" de acero inoxidable.
- 7 tornillos de $\frac{5}{16}$ x $1\frac{1}{2}$ " de acero inoxidable.
- 4 resortes de acero comercial.
- 2 tuercas tipo mariposa.
- Arandelas.
- Barra cilíndrica de acero inoxidable 1 $\frac{1}{8}$ " (28,9mm)
- 1 barra de acero inoxidable con rótulas incorporadas.
- Barra de acero inoxidable de sección rectangular de 5mm de espesor.
- Pintura en spray de color negro.
- Leva de acero simple al carbono.
- Cable de conexión trifásica.
- Enchufe de conexión trifásica.
- Ángulos para porta probetas cromados.
- Anillo de retención.
- Chapa de latón.

3.2.1.2. Equipos

- Torno, marca TOS TRENCIN. Czechollovakia, 220V, 22,8A, 60Hz, 10,7 KVA, 10 a 1000rpm.
- Torno CNC, marca HYUNDAI-KIA MACHINE, modelo F-21I-TB, 200-220V, 50-60Hz, 20KVA.
- Fresadora, marca TOS OLOMOUC, modelo FA3B, 7 KVA, 80Hz, 220V.
- Taladradora radial, marca CONCEPT 30, modelo PDM-30, 110V o 220V, 1720rpm, 60Hz y 15/7,5A.
- Esmeril, marca TRUPER, modelo ESMA-9N, 60 Hz, 2100W, 110V.
- Dobladora de lámina, marca BARIOLA, tipo 125/30, toneladas 125, 15Hp, 220V.
- Tronzadora, marca MAKITA, 14", 15A, 59-60Hz, 3800 rpm.
- Motor eléctrico trifásico. Marca: Bonfiglioli Group. Potencia: 0,14 kW, velocidad angular: 1020rev/min, voltaje: (230-400)V.
- Reductor doble (corona-tornillo sin fin-corona). Marca: Morse. Potencia 0,0269 kW, relación de reducción: 2160:1.
- Guarda-motor de amperaje variable. Marca Telemecanique.
- Acople tipo quijada con inserto de sintético. Marca: Serving Elgin. Diámetro 5/8".
- Cámara digital.
- Juego de llave allen.
- Martillo de goma.
- Martillo de acero.
- Alicata.
- Juego de llaves
- Alicata de retención.
- Vernier.

- Micrómetro.
- Lima manual.
- Segueta.
- Prensa.
- Destornilladores.
- Llave ajustable.
- Navaja.

3.2.1.3. Sustancias

- Tiner.
- Aceite.
- Agua.

3.2.2. Realización de ensayos de rayado

3.2.2.1. Materiales

- Planchas de acero simple de 3mm de espesor.
- Discos de acero simple al carbono de distintos espesores.
- Recubrimientos (fosfatado, pintura automotriz, cobre, cromo, nitruro de zirconio).
- Lijas de diferente tamaño de grano.
- Carburo de silicio y alúmina en polvo.
- Lápiz de grafito.
- Hoja milimetrada.
- Bisturí.
- Cintas adhesivas semitransparentes.
- Algodón.

- Papel absorbente.
- Nivel de burbuja.
- Papel de seda.
- Regla.
- Lupa.
- Ligas.

3.2.2.2. Equipos

- Estereoscopio, marca TWT CA, 110V, 20W.
- Microscopio óptico, ME-2724 lentes 5X, 10X y 40X.
- Microdurómetro, marca Adolph I. Buehler INC, carga 200g, 100g, apreciación 0,001mm.
- Secador eléctrico.
- Kit para empotrar muestras de materiales en resina epóxica, marca ESTRUENS, serial EPOFI 40200029-4099.
- Rugosímetro Marca Mitutoyo. Código N° SJ-201. Serial N° 305600709.
- Cronómetro.
- Cámara digital.
- Computador personal con programa incorporado APPLIED VISION.
- Medidor de espesor por ultrasonido POSITECTOR 6000. Rango de medida: (0-1500 micrones/0-60 mils).

3.2.2.3. Sustancias

- Jabón líquido.
- Nital al 2%.
- Alcohol absoluto.
- Agua.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo de este capítulo se basó en la ejecución de la quinta etapa del procedimiento metodológico, la cual se representa esquemáticamente en la Figura 4.1, donde puede apreciarse a grosso modo el orden del análisis y el criterio de comparación de los resultados de las pruebas realizadas en las probetas recubiertas.

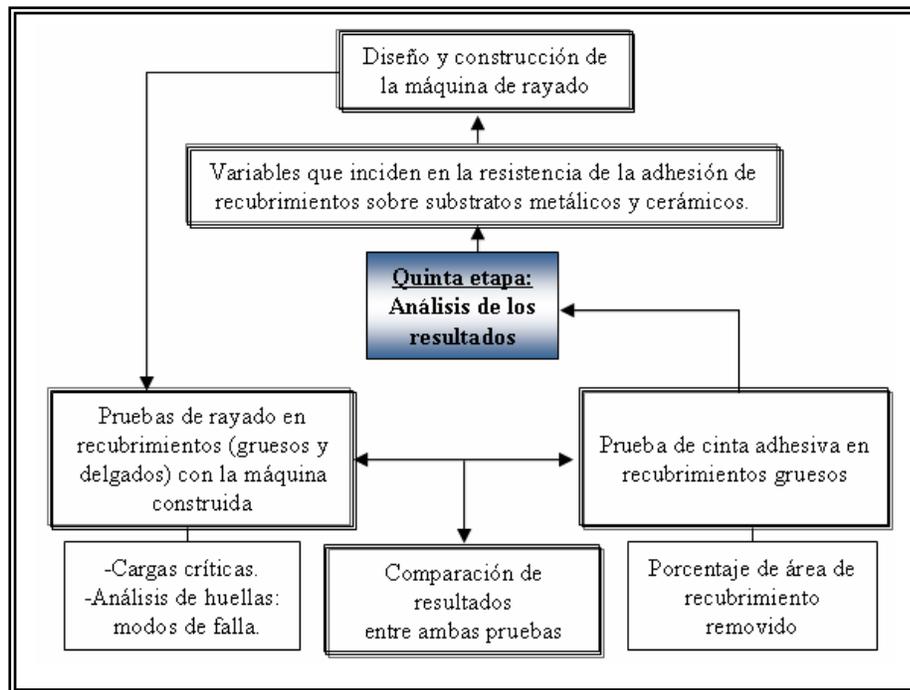


Figura 4.1. Metodología empleada para el análisis y comparación de los resultados

4.1. Variables Que Inciden En La Resistencia De La Adhesión De Recubrimientos Sobre Sustratos Metálicos Y Cerámicos

La adhesión es un fenómeno complejo y hay un número de variables que pueden influenciarla. Para un adecuado funcionamiento en servicio de muchas

combinaciones de recubrimiento/substrato es necesario el control de muchos factores que afectan la adhesión y estos envuelven una selección cuidadosa del material con que se recubre el substrato, el control de los componentes a fabricar y los procesos de deposición. En la Tabla 4.1, se presentan los factores/variables más importantes que inciden en la resistencia de la adhesión de recubrimientos sobre substratos.

Tabla 4.1. Variables que inciden en la resistencia de la adhesión de recubrimientos sobre substratos metálicos y cerámicos

Factores	Variables
Los dependientes de recubrimiento y substrato	<ul style="list-style-type: none"> -Enlace interfásial (iónico, covalente, metálico, Van de Walls, etc.). -Fases interfásiales (óxidos, reacciones durante la deposición). -Rugosidad superficial (área de contacto, uniformidad del recubrimiento, etc.). -Preparación del substrato (película, películas de reacción, etc.).
Dependientes del proceso de deposición	<ul style="list-style-type: none"> -Elección de técnica de deposición. -Contaminación. -Temperatura de deposición. -Bombardeo iónico. -Intercapas. -Esfuerzos residuales.
Dependientes de las condiciones de servicio	<ul style="list-style-type: none"> -Esfuerzos aplicados. -Ambiente de operación (temperatura, atmósfera, etc.). -Condiciones de reacción entre recubrimiento/substrato.

Para la mayoría de las aplicaciones, los requerimientos de recubrimiento/substrato, las condiciones de servicio están bien definidas y los

procesos para recubrir han sido ajustados para maximizar la adhesión del recubrimiento al sustrato.

4.2. Diseño Y Construcción De La Máquina De Rayado “RAYANIEL”

4.2.1. Cálculos de diseño

En el diseño de la máquina de rayado, los cálculos fueron de gran importancia ya que con éstos se pudo determinar las dimensiones mínimas necesarias a emplearse para su construcción. A partir de estos valores, se escogieron materiales (de acuerdo a la disponibilidad) de tal forma que sobrepasaran estas magnitudes (sobrediseñando). En la Tabla 4.2, se muestran los resultados más importantes arrojados en el diseño de las partes constitutivas de la máquina.

Tabla 4.2. Cálculos de diseño y dimensiones utilizadas en la construcción de la máquina de rayado

Parámetro de diseño	Cálculo de diseño	Dimensión empleada	Material empleado
Espesor mínimo lámina metálica inferior (mm)	0,356	8,00	Aluminio aleado
Espesor mínimo lámina metálica superior (mm)	0,891	8,00	Aluminio aleado
Diámetro mínimo de los tornillos de sujeción de la lámina inferior (mm)	4,27	7,9375 (5/16")	Acero inoxidable
Diámetro mínimo de los tornillos de sujeción de la lámina superior (mm)	5,09	6,35 (1/4")	Acero inoxidable
Diámetro mínimo eje (mm)	13,36	32,00	Acero simple
Carga admisible de soporte en columnas para que no pandee (N)	29.420	101,766	Aluminio aleado

Los resultados presentados en la Tabla 4.2, demuestran que las dimensiones utilizadas para la construcción de la máquina de rayado son muy superiores a las

obtenidas en los cálculos de diseño, por lo tanto de esta forma se garantiza que la máquina funcione bajo condiciones mecánicas normales de operación. El resultado de todo el conjunto de la máquina de rayado “RAYANIEL”, se muestra en la Figura 4.2, donde se pueden apreciar todas sus partes constitutivas.

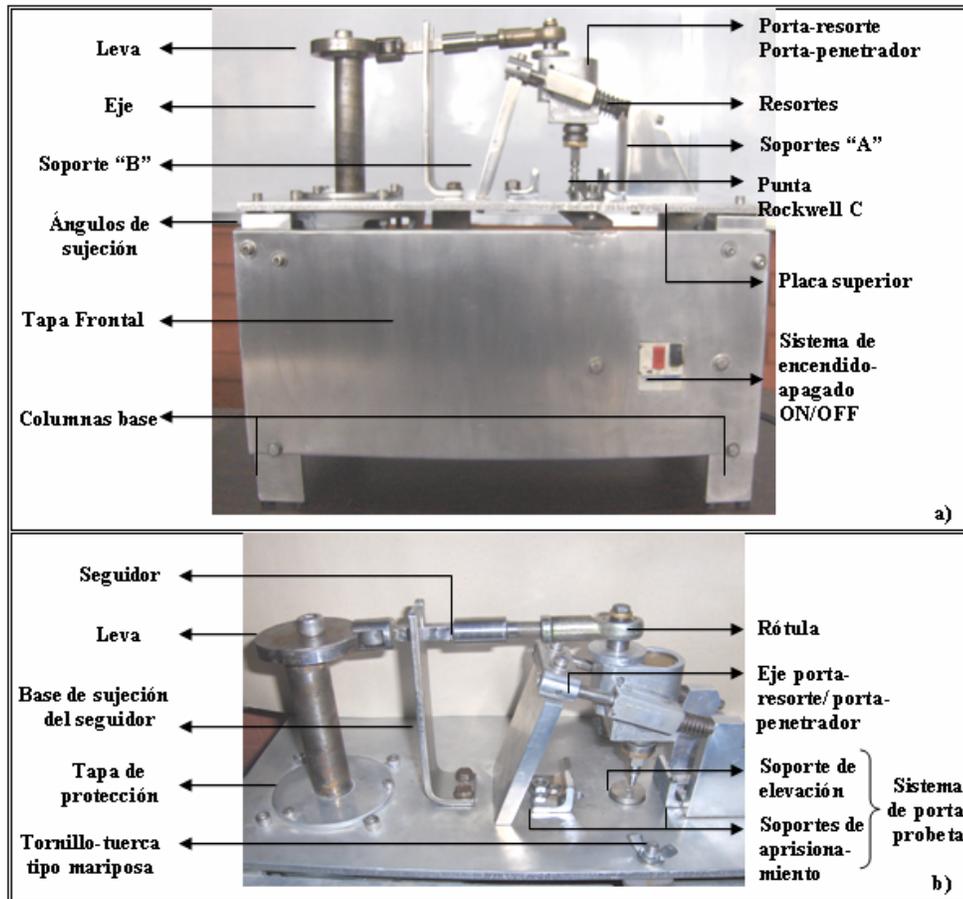


Figura 4.2. Máquina de rayado fabricada; a) Vista frontal y b) Vista superior.

Vale destacar, que el uso conveniente del material aluminio aleado, ofrece una menor relación de peso con respecto al acero (de casi 1/3 de su densidad), hecho que favorece a que la máquina posea menos peso del que se esperaba si su bastidor se construía de acero. Por su condición de aluminio aleado, este material, posee mucha más resistencia que el aluminio de uso común, la cual está por encima de los niveles de esfuerzo calculados en el diseño. Los detalles de estos cálculos pueden observarse

en el Apéndice A (ejemplo de cálculos) y en el Apéndice D (los planos de la máquina).

4.3. Pruebas De Rayado En Recubrimientos (Gruesos Y Delgados) Realizadas Con La Máquina Construida

4.3.1. Cargas críticas

A fin de revisar la exactitud de los resultados de las cargas críticas de cada recubrimiento tanto a velocidad variable como a velocidad constante, en la Tabla 4.3, se muestran las cargas críticas promedio de las tres rayas realizadas sobre los compósitos con su respectiva desviación estándar.

Tabla 4.3. Cargas críticas y desviación estándar promedio de los recubrimientos ensayados a velocidad variable y a velocidad constante

Código	Carga crítica promedio (N)		Desviación estándar (N)		Desviación estándar (%)	
	Variable	Constante	Variable	Constante	Variable	Constante
R1	0,63	0,54	0,087	0,031	13,81	5,74
R2	0,42	0,20	0,102	0,043	24,29	21,50
R3	0,24	0,16	0,018	0,013	7,50	8,13
R4	0,31	0,46	0,044	0,019	14,19	4,13
R5	0,68	0,21	0,091	0,016	13,38	7,62
R6	4,58	4,54	0,639	0,503	13,95	11,08
R7	6,31	7,76	1,234	1,009	19,56	13,00
R8	9,85	9,13	2,431	1,502	24,68	16,45
R9	10,90	21,53	1,708	1,451	15,67	6,74

Los datos suministrados en la Tabla 4.3, indican que la mayoría de los valores de las cargas críticas a velocidad constante están por debajo de los valores de las cargas críticas a velocidad variable y la dispersión de valores es mayor a velocidad variable. Ésto quiere decir que a velocidad constante, el ensayo es mucho más exacto respecto al ensayo a velocidad variable. Por su parte, el porcentaje de desviación

estándar obtenido de las tres mediciones de las cargas críticas en cada uno de los recubrimientos evaluados, indican que las diferentes huellas realizadas sobre los recubrimientos fallaban siempre en un punto muy cercano para distintas rayas, es decir, se observa poca dispersión de resultados, lo cual refleja la repetibilidad o confiabilidad del ensayo.

4.3.1.1. Relación de las cargas críticas con algunos parámetros intrínsecos y extrínsecos que afectan la prueba de rayado

Tal como se explicó en la Sección 2.3.4.2, los valores de las cargas críticas arrojadas para cada probeta dependen de las condiciones de ensayo y del sistema de recubrimiento/substrato. A continuación se interpretan estos valores de acuerdo a los parámetros intrínsecos y extrínsecos que se conocen de la prueba de rayado y que se pudieron obtener en la caracterización de las muestras, éstos son: velocidad de aplicación de carga y velocidad de rayado; dureza del substrato y del recubrimiento; espesor del recubrimiento; rugosidad del substrato y del recubrimiento. Otros parámetros como: radio de la punta del penetrador; tensiones residuales; coeficiente de fricción o rozamiento; módulo de elasticidad; adhesión entre el recubrimiento y el indentador; no fueron considerados en este análisis por la carencia de materiales y de instrumentos necesarios para medir estas características.

Parámetros intrínsecos

Velocidad de aplicación de carga y velocidad de rayado: Los resultados de las pruebas de rayado a velocidad variable y constante tanto para las muestras R1, R2, R3, R4 y R5 (recubrimientos gruesos y blandos), así como para las probetas R6, R7, R8 y R9 (recubrimientos delgados y duros), se grafican en las Figuras 4.3 y 4.4.

Para realizar un análisis más objetivo, los resultados de las cargas críticas de estas muestras se dividieron en dos grupos: Figura 4.3a, R1 (fosfatado), R2 (fosfatado + 1 capa de pintura) y R4 (fosfatado + 2 capas de pintura) y Figura 4.3b, R3 (fosfatado + 1 capa de pintura + clear) y R5 (fosfatado + 2 capas de pintura + clear). Ésto se realizó de esta forma para estudiar por separado el efecto de las capas de pintura (Figura 4.3a) y el efecto del clear (brillo) en la incidencia de la carga crítica (Figura 4.3b).

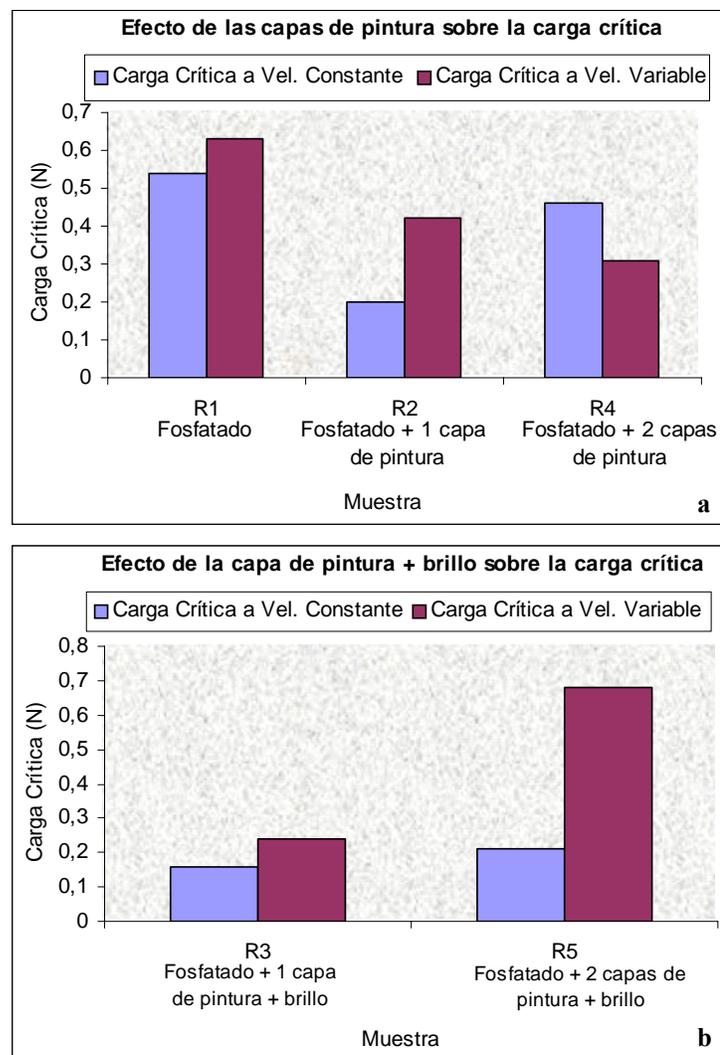


Figura 4.3. Comparación de cargas críticas a velocidad constante y variable en los recubrimientos gruesos y blandos

La Figura 4.3a, indica que las muestras R2 y R4 ensayadas a velocidad variable presentan una tendencia decreciente de la carga crítica, relacionándose esto con el número de capas de pintura, que aumenta de R1 a R4; mientras que a velocidad constante se observa lo contrario con el aumento de capas de pintura (la carga crítica aumenta de R2 a R4), sugiriéndose entonces que entre estas dos muestras, R4 tiene mayor resistencia al rayado y por ende que con la adición de capas de pintura se mejora la adhesión. Por otro lado, tanto a velocidad constante como a velocidad variable, en la muestra R1 se obtuvo la mayor carga crítica gracias a las buenas propiedades adhesivas del fosfatado.

En la Figura 4.3b, se muestra que las cargas críticas (a velocidad variable y constante) de las probetas R3 y R5, tienen una misma tendencia. Omitiendo el efecto del clear (brillo), aquí vuelve a cumplirse el comportamiento observado en la Figura 4.3a en cuanto al aumento de la carga crítica con la adición de capas de pintura, para la condición del ensayo a velocidad constante. A velocidad variable, se obtuvo que la carga crítica también aumenta de R3 a R5, comportamiento distinto a lo obtenido en la Figura 4.3a. Ante esta situación, la correlación de la misma tendencia de las cargas críticas de las muestras R2 y R4 en la Figura 4.3a (a velocidad constante), y de las muestras R3 y R5 en la Figura 4.3b (a velocidad constante y variable), corroboran que la adición de capas de pinturas mejoran la adhesión del sistema de recubrimiento/substrato.

Ahora bien, considerando el efecto del clear (brillo) sobre la adhesión del recubrimiento, a velocidad constante, las muestras R3 y R5 presentaron una disminución de la carga crítica en comparación con las muestras R2 y R4 presentadas en la Figura 4.3b. A velocidad variable, este comportamiento también se cumplió sólo para el caso de R3, en la cual se observa la disminución de la carga crítica respecto a la muestra R2 de la Figura 4.3a.

Lo anterior hace notar que la aplicación del clear sobre la pintura desmejora la adhesión del sistema recubrimiento/substrato, probablemente influenciada por la cantidad de poros presentes en la superficie del recubrimiento los cuales son producto de la aplicación de esta capa de brillo. La presencia de estos poros en el recubrimiento, afectan negativamente la adhesión de éste sobre el substrato, ya que en el momento en que la punta del indentador se desliza sobre su superficie, encuentra estos pequeños hoyos durante el recorrido y penetra más rápido en el recubrimiento, propiciando de esta forma fallas tempranas o muy incipientes en el mismo. Conociendo este efecto negativo que tiene el clear sobre las pinturas evaluadas, se puede decir que su uso es meramente estético, ya que le proporciona un mejor aspecto superficial a la pintura.

En otro plano de ideas, en las Figuras 4.3a y 4.3b, se observa que las cargas críticas a velocidad constante de estos recubrimientos (excepto R4), son relativamente menores a las obtenidas a velocidad variable. Este comportamiento puede explicarse con base a que a menor velocidad de rayado hay mayor probabilidad de encontrar adhesión defectuosa en el sistema recubrimiento/substrato, y por consiguiente el recubrimiento puede fallar mucho antes, comparando con el punto de falla observado a velocidad variable.

En relación con las cargas críticas, hay que señalar que estas dependen de la velocidad de rayado y de la tasa de aplicación de carga. Permaneciendo estas dos variables constantes la carga crítica es independiente de la velocidad de rayado. Por el contrario si estos parámetros son variables la carga crítica dependerá de la velocidad de rayado.

En la Figura 4.4, se puede observar que para los dos tipos de ensayo, existe una misma tendencia, es decir, las cargas críticas aumentan desde R6 hasta R9. Así mismo, no se observan muchas diferencias en cuanto a las cargas críticas a velocidad

constante y a velocidad variable, ésto se cumple para las probetas R6 (cobreado), R7 (cromo decorativo) y R8 (cromo duro). Sin embargo, para R9 (nitruro de zirconio), se obtuvo una carga crítica a velocidad constante de aproximadamente el doble (21N) de la hallada a velocidad variable.

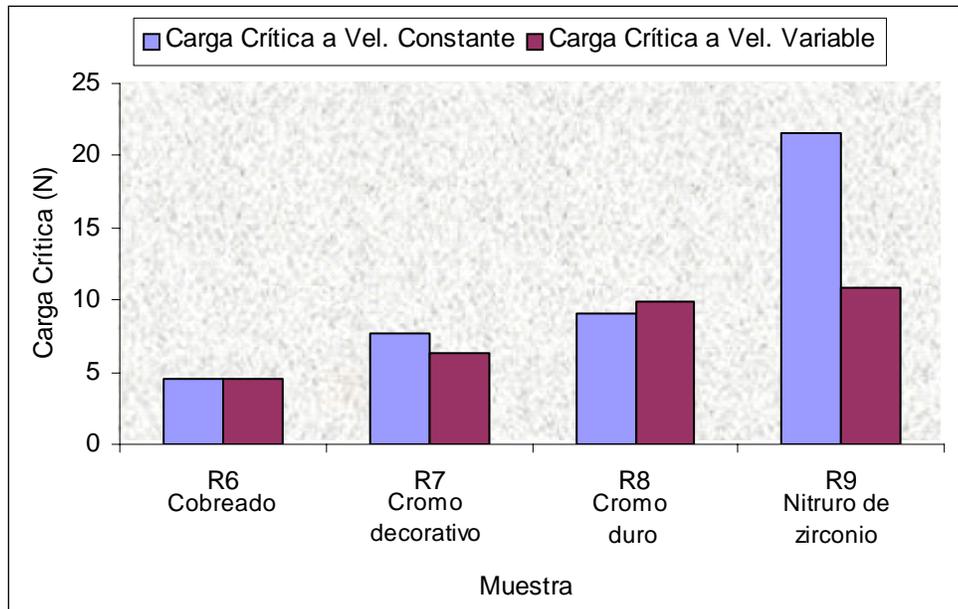


Figura 4.4. Comparación de cargas críticas a velocidad constante y variable en los recubrimientos delgados y duros

Parámetros extrínsecos

Dureza del sustrato y del recubrimiento: La dureza del sustrato y del recubrimiento también afecta el valor de las cargas críticas. En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran la relación que tienen estas dos variables con las cargas críticas de los recubrimientos ensayados.

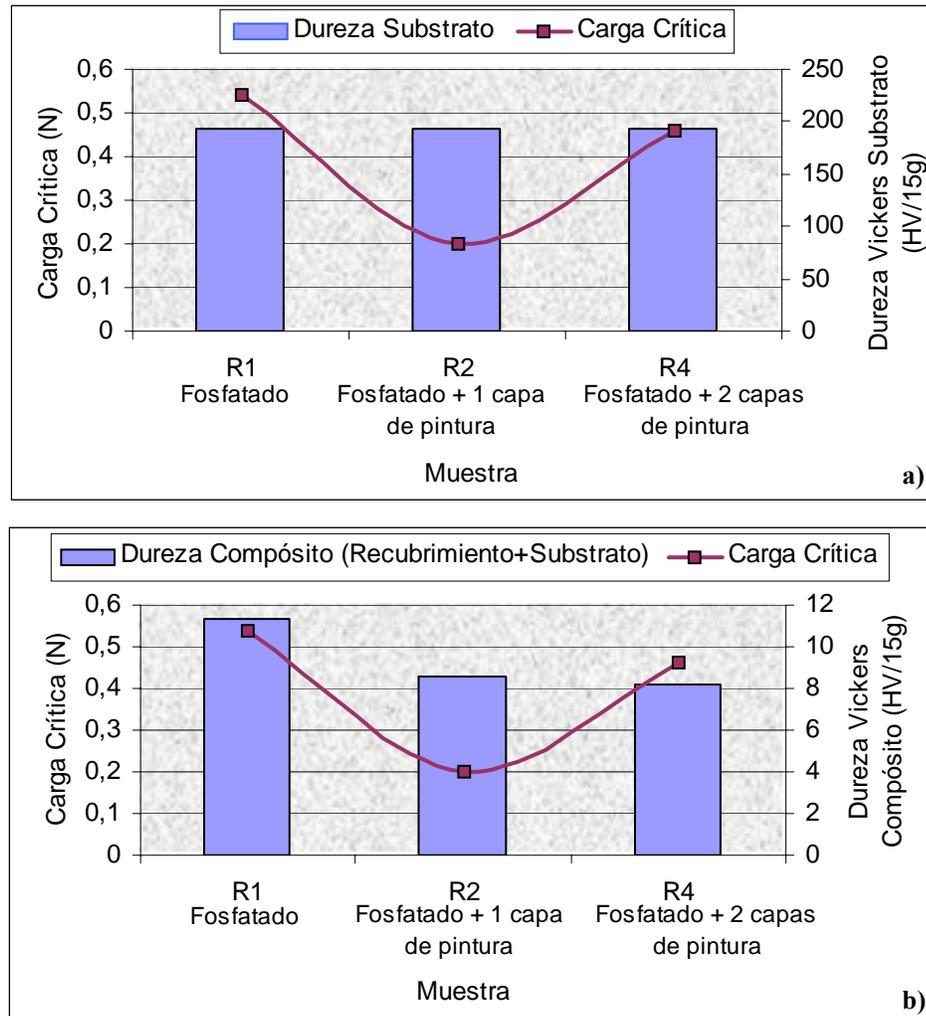


Figura 4.5. Cargas críticas de los recubrimientos R1, R2 y R4 en función de: a) la Dureza Vickers del Substrato y b) Dureza Vickers del Compósito.

En la Figura 4.5a, se observa que las cargas críticas de las muestras R1, R2 y R4, son independiente de la dureza del sustrato, ya que para recubrir estas muestras se utilizó el mismo sustrato con iguales condiciones de preparación superficial. Sin embargo, existe una variación de las cargas críticas en estas muestras que pueden ser atribuidas a la dureza que el recubrimiento le confiere al compuesto. En la Figura 4.5b, se puede ver que la muestra R1 resiste una mayor carga crítica que las muestras R2 y R4, las cuales presentaron menor dureza que ésta. De este modo se observa que

la tendencia es que cuando la dureza del compuesto disminuye (por efecto de la baja dureza del recubrimiento) también disminuye su carga crítica.

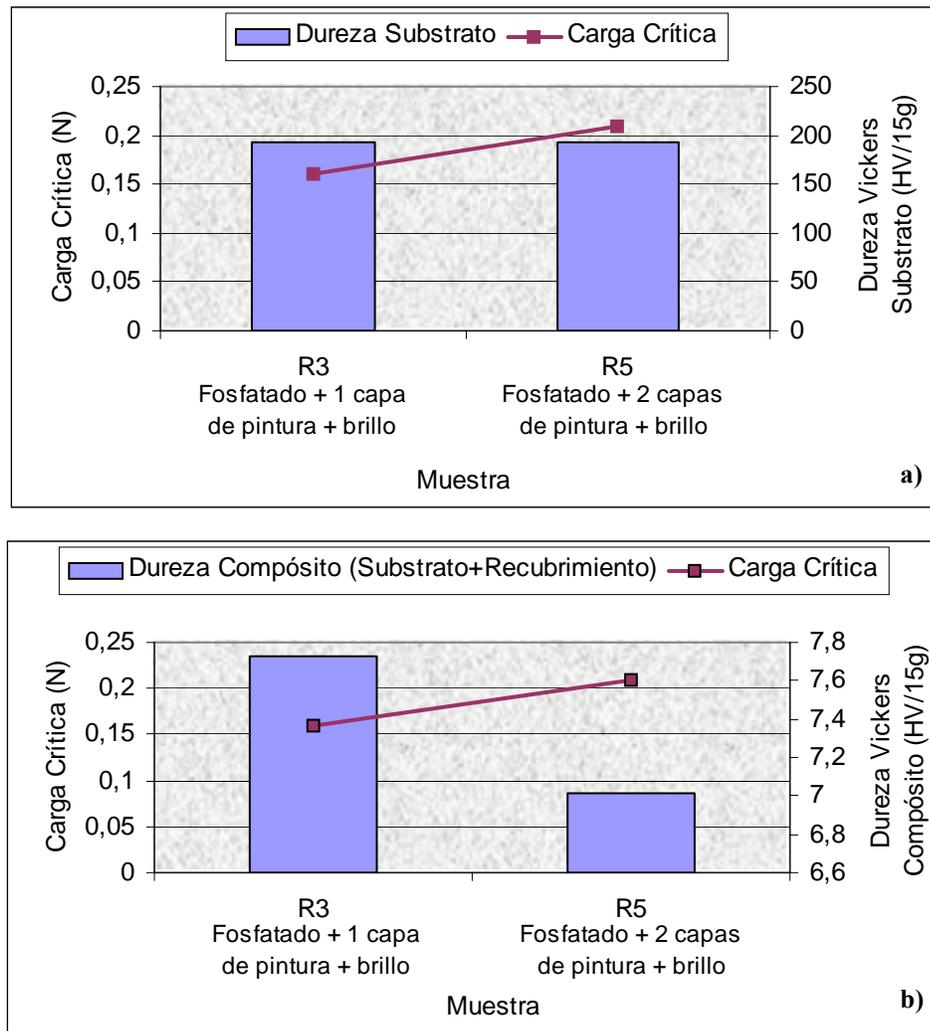


Figura 4.6. Cargas críticas de los recubrimientos R3 y R5 en función de: a) la Dureza Vickers del Substrato y b) Dureza Vickers del Compósito.

En las Figuras 4.6a y 4.6b, se observa que la dureza (del sustrato y compuesto) no tiene gran incidencia sobre las cargas críticas de las muestras R3 y R5. Nótese que la dureza del sustrato es la misma para las dos muestras y la dureza de los compósitos tienen valores muy cercanos entre sí R3 (HV= 7,7) y R5 (HV= 7,0).

La Figura 4.7, refleja que a medida que aumenta la dureza del sustrato, las cargas críticas también aumentan. Este hecho corrobora lo expuesto en los fundamentos teóricos, a mayor dureza se requiere de una mayor carga crítica para producir una mayor deformación del material y por consiguiente un despegue del recubrimiento sobre éste o para generar una decohesión entre el mismo.

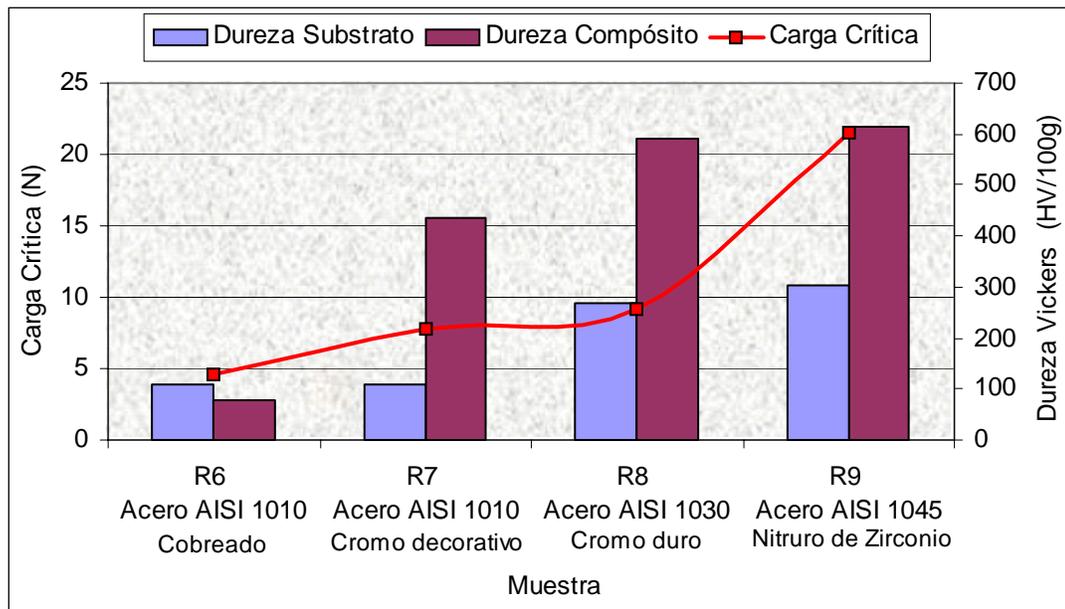


Figura 4.7. Cargas críticas de los recubrimientos delgados y duros en función de la Dureza Vickers del sustrato y del compuesto.

En la Figura 4.7, también se nota que las cargas críticas de las muestras, aumentan con la dureza de los recubrimientos. Este comportamiento es más notable en el resultado obtenido en la muestra R9; donde a diferencia de las otras tres probetas restantes (R6, R7 y R8), ésta sobresale por su gran carga crítica de aproximadamente 21N. Como ya se explicó, este es un recubrimiento sumamente duro, que ofrece una excelente adhesión por el proceso de deposición (Deposición Física en Fase de Vapor –PVD-) que incluye bombardeo de iones movilizados a gran velocidad, lo cual asegura una excelente adhesión.

Esesor del recubrimiento: El esesor del recubrimiento al igual que los otros parámetros incidentes, afecta la carga crítica resultante en el ensayo de rayado. En las Figuras 4.8 y 4.9, se observa el efecto del esesor de los recubrimientos ensayados en función de las cargas críticas.

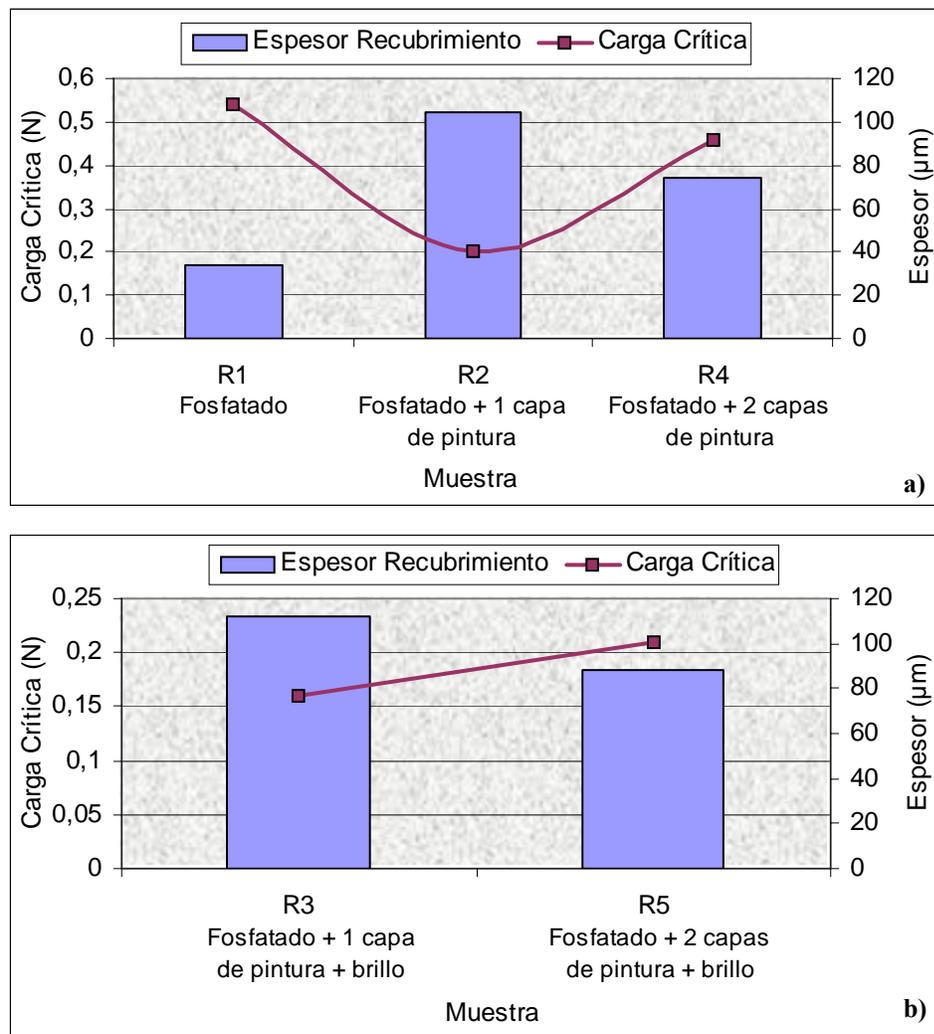


Figura 4.8. Cargas críticas de los recubrimientos: a) R1, R2 y R4 y b) R3 y R5; en función de su esesor.

En las Figuras 4.8a y 4.8b, se observa un comportamiento que a simple vista contradice a lo expuesto en los fundamentos teóricos sobre el efecto del esesor de

recubrimiento en la carga crítica, ya que a mayor espesor de película de un mismo recubrimiento debería encontrarse una mayor carga crítica. Las cargas críticas asociadas a estas probetas disminuyen con el aumento del espesor y viceversa, ésto podría explicarse con base a las propiedades mecánicas que posee el sistema recubrimiento/recubrimiento como un exceso de tensiones internas, las cuales contribuyen a que se produzca una falla temprana del recubrimiento una vez que el penetrador entre en contacto con éste.

En la Figura 4.9, se observan los resultados de cargas críticas según el espesor de los recubrimientos delgados y duros.

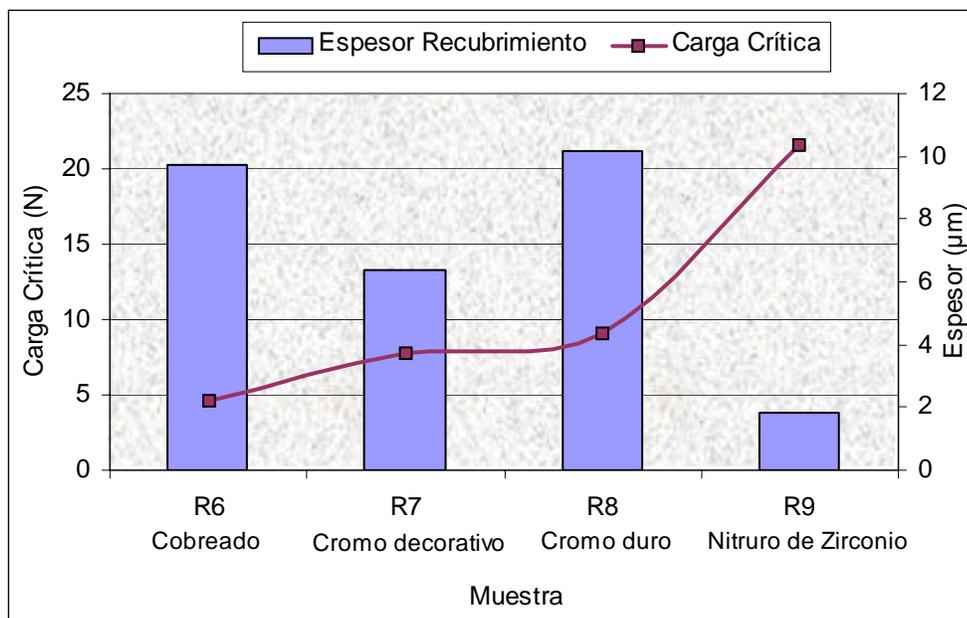


Figura 4.9. Cargas críticas en función del espesor de los recubrimientos delgados y duros.

En esta situación no puede hacerse una comparación directa entre todos los recubrimientos con respecto a sus espesores, ya que son compósitos obtenidos mediante procesos de deposición distintos y de diferentes materiales. Para poder observar la influencia del espesor en la carga crítica se debería ensayar un mismo

recubrimiento con las mismas condiciones de fabricación, sólomente variando el espesor de película.

A fin de explicar lo anteriormente expuesto, puede tomarse como ejemplo los recubrimientos R7 –cromo decorativo- y R8 –cromo duro- los cuales fueron obtenidos por un mismo proceso de deposición y son de materiales con composición química muy similar. Sin tomar en cuenta que estas muestras poseen substratos diferentes (R7 acero AISI 1010 y R8 acero tratado AISI 1030), se puede observar que la cargas crítica aumentan con el espesor de película, demostrándose que para sistemas de recubrimiento/substrato similares este criterio de análisis sí puede ser aplicado.

También puede notarse que la muestra R9 aunque presenta el espesor más bajo de todas las probetas, es la que soportó mayor carga crítica. Aunque parece contradictorio, con este resultado de carga crítica se demuestra que ésta no sólo depende del espesor del material, sino de otros factores intrínsecos como son las características inherentes a la naturaleza, estructura y composición del recubrimiento. Este recubrimiento presentó mayor carga crítica fundamentalmente por su altísima dureza (material cerámico) y por el proceso de deposición empleado (PVD) el cual como ya se indicó, es uno de los métodos de última generación que ofrece excelentes condiciones de adhesión de los recubrimientos depositados sobre substratos metálicos.

Rugosidad del substrato y del recubrimiento: Otro parámetro que incide sobre la carga crítica es la rugosidad del substrato y del recubrimiento. En las Figuras 4.10 y 4.11, se presentan las gráficas con los resultados de las cargas críticas de los recubrimientos en función de estos dos parámetros.

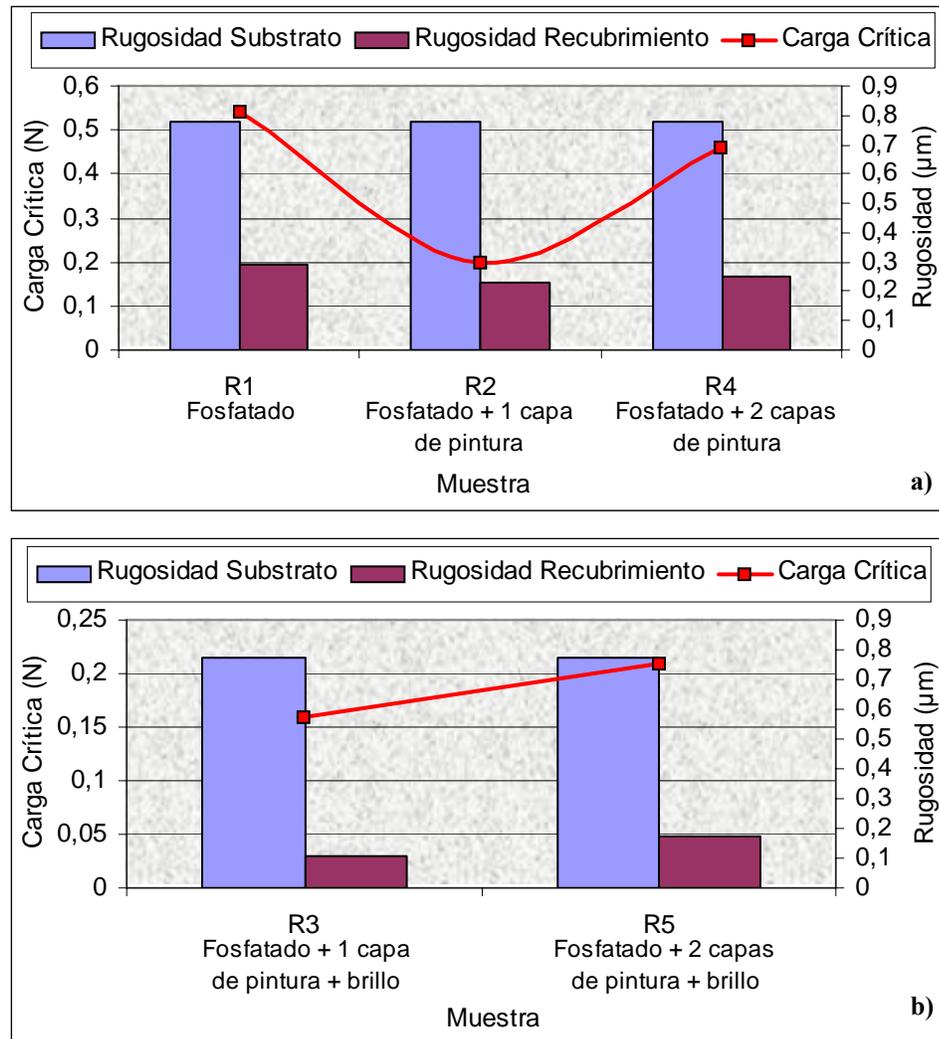


Figura 4.10. Cargas críticas de los recubrimientos: a) R1, R2 y R4 y b) R3 y R5; en función de la rugosidad del sistema recubrimiento/substrato

En cuanto a la rugosidad se observa que la capa más externa del compuesto es la que mayor incidencia tiene sobre la carga crítica, ya que las muestras que presentaron igual rugosidad del sustrato, mostraron cargas críticas distintas, dependiendo entonces de la rugosidad del recubrimiento o capa más externa. Tal comportamiento se puede verificar al comparar las rugosidades y cargas críticas obtenidas en las muestras R1 hasta R5, donde se evidencia que a mayor rugosidad del recubrimiento se obtuvo mayor carga crítica. Estos resultados son contrarios a los fundamentos

teóricos que se tienen en cuanto a investigación sobre el tema (véase Sección 2.3.4.2), especialmente la influencia de la rugosidad del recubrimiento en la carga crítica. No obstante, esta discrepancia puede explicarse a partir de la constitución de los recubrimientos en las muestras R2 y R4; donde R2 tiene dos películas (una de fosfato + una capa de pintura) y R4 tiene tres películas (una de fosfato + dos capas de pintura) las cuales fueron aplicadas una independiente de la otra, creándose en ellas condiciones de acabado y adhesión a sustratos distintos.

Cuando el penetrador toca la superficie del recubrimiento, no tiene mucha restricción por sus irregularidades o valles, que por su baja dureza se deforman con el paso de la punta de diamante, la cual sigue recorriendo la superficie del sistema y causa daños inicialmente en la primera capa de pintura (la más externa), y posteriormente llega a la película de fosfato que está directamente en contacto con el sustrato; pero antes de llegar a esta capa ya el recubrimiento habrá reportado una falla en la primera capa la cual es registrada como falla crítica.

Análogamente en la Figura 4.10b, también se observa la misma tendencia para las muestras R3 (fosfatado + 1 capa de pintura + brillo) y R5 (fosfatado + 2 capa de pintura + brillo), es decir, las cargas críticas de estos sistemas también aumentan a mayor rugosidad del recubrimiento.

Resumiendo, se puede decir, que la rugosidad superficial para este tipo de sistemas de recubrimiento/sustrato no tiene gran influencia sobre el resultado de las cargas críticas; pero se debe notar que la adición de una nueva capa a una preexistente modifica el desempeño de estas muestras, ya que, primeramente se crean estados de esfuerzos iniciales entre las interfases de las capas de pintura (primera capa y segunda capa, contadas desde la superficie hacia el sustrato) antes de propagarse a la interfase existente entre el sustrato y la película de fosfatado, donde hay más probabilidad de que ocurra una falla adhesiva.

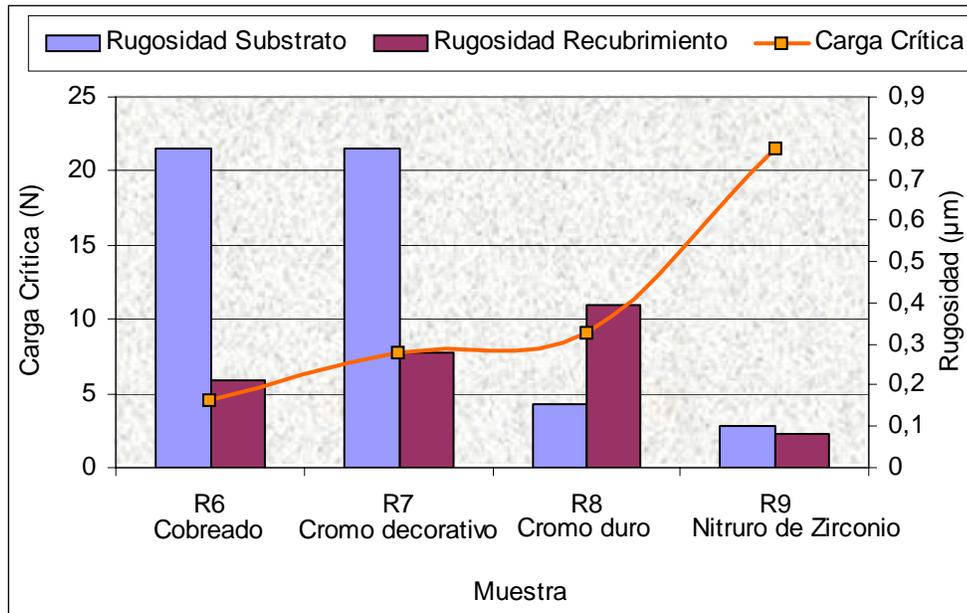


Figura 4.11. Cargas críticas en función de la rugosidad de los recubrimientos duros y delgados

En la Figura 4.11, se puede observar, que de manera general, en la medida en que la rugosidad del sistema recubrimiento/substrato disminuye, las cargas críticas aumentan. A partir de las muestras R7, R8 y R9, se observa un descenso abrupto de la rugosidad del sustrato, obteniéndose mayores cargas críticas para cada una de estas muestras. El efecto de la rugosidad del sistema sobre la carga crítica se ve mucho más marcada para la probeta R9, la cual además de tener excelentes propiedades de resistencia al rayado, también posee una rugosidad superficial muy baja, condición que tiende a favorecer a la generación de menores estados de esfuerzos dentro del mismo recubrimiento y en la interfase recubrimiento/substrato, hecho que contribuye a que se requieran mayores fuerzas para el despegue del recubrimiento sobre su sustrato. Es relevante destacar, que para los recubrimientos de una sola película, sí se cumple la premisa de que a mayor rugosidad del sistema se requieren menores fuerzas para producir daños sobre el mismo, por lo tanto las cargas críticas resultaron bajas cuando la rugosidad fue alta y viceversa

4.3.2. Análisis de huellas

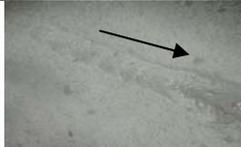
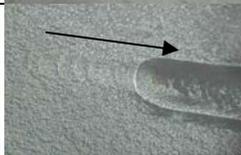
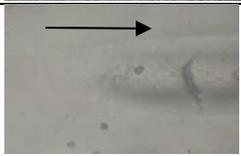
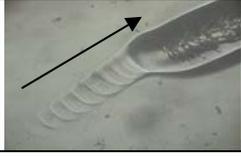
4.3.2.1. A velocidad variable y constante

El aspecto de las huellas realizadas a velocidad variable y constante se presenta en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. En las Tablas 4.4 y 4.5, sólo se muestran las fotomicrografías, dirección de rayado y las cargas críticas asociadas a cada probeta ensayadas a velocidad variable. En las Tabla 4.6 y 4.7, se muestran las fotomicrografías (a mayor aumento: 200X y 400X), la dirección de rayado, el punto de fractura así como el modo de falla del recubrimiento y su carga crítica a velocidad constante.

El análisis de huellas se hizo de acuerdo a la naturaleza del sistema recubrimiento/substrato formado en cada probeta. De este modo, el criterio de comparación se llevó a cabo agrupando las probetas con recubrimiento de pintura automotriz, siendo éstas R1, R2, R3, R4 y R5, clasificadas como recubrimientos gruesos y blandos. Por otro lado, las probetas R6, R7, R8 y R9, se compararon entre sí, según su clasificación como recubrimientos delgados y duros.

En la Tabla 4.4, las diferentes huellas observadas mediante MO presentan una morfología muy similar en las etapas iniciales del recorrido. A una magnificación de 100X, se pudo apreciar claramente el inicio del rayado y el punto de falla del recubrimiento. Para esta condición de ensayo (velocidad variable), además, se confirmó que el avance del penetrador sobre el recubrimiento no fue uniforme, es por eso que a cierta distancia del recorrido del penetrador, existe un cambio abrupto en cuanto a la penetración y al ancho de surco, posiblemente debido al cambio brusco de la tasa de aplicación de carga la cual es muy dependiente de la velocidad del rayado

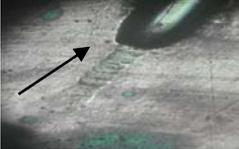
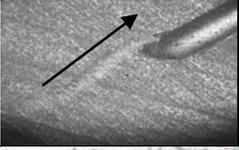
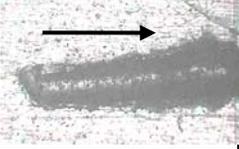
Tabla 4.4. Resultados de huellas de rayado a velocidad variable realizadas sobre los recubrimientos gruesos y blandos (Rango de aplicación de carga 0-10N)

Código	Descripción (película)	Fotomicrografía (MO) Mag.100X	Distancia Crítica Dc (mm)	Carga Crítica Promedio Lc (N)
R1	Fosfatado		0,61	0,63
R2	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa)		0,41	0,42
R3	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa + Clear)		0,24	0,24
R4	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capas)		0,30	0,31
R5	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capas + Clear)		0,66	0,68

Por otra parte las probetas R5 y R1, fueron las que presentaron mayor carga crítica, con (0,68 y 0,63N) respectivamente. Ésto indica que tales recubrimientos a velocidad variable, son los que tienen mayor resistencia al despegue y a la decohesión sobre el sustrato. Se esperaba que la carga crítica de la muestra R1, fuese una de las más altas, debido a las características del recubrimiento (fosfatado), el cual actúa como una interfase de unión, mejorando las propiedades de adhesión del sistema recubrimiento/sustrato. La probeta que tuvo menor carga crítica fue R3 con 0,24N.

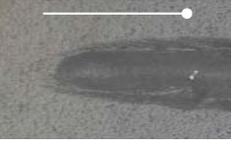
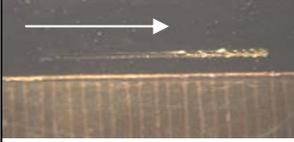
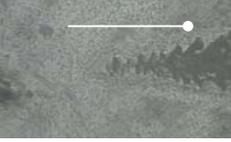
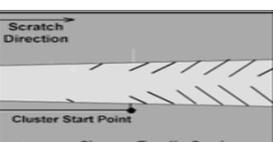
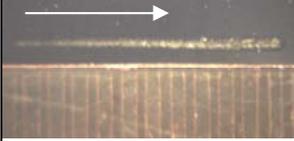
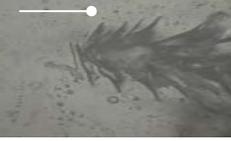
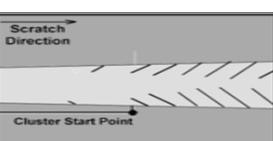
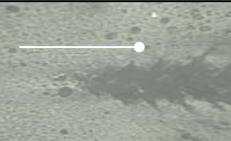
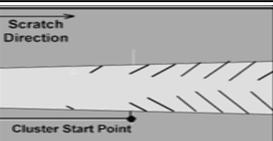
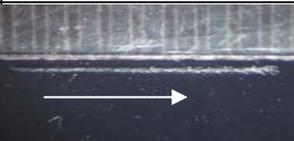
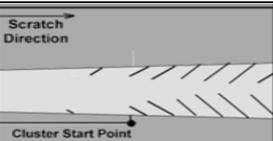
En cuanto al grupo de muestras presentadas en la Tabla 4.5, se observa que las cargas críticas aumentan desde R6 hasta R9. Al igual que las probetas de la Tabla 4.4, no hubo un recorrido uniforme del penetrador durante el ensayo. A la probeta R6 (cobreado) fue difícil determinarle su carga crítica, debido a que éste es un recubrimiento muy dúctil. En el análisis microscópico de la huella se observó que a medida que el penetrador se movía el cobre se deformaba plásticamente y no fallaba de manera visible.

Tabla 4.5. Resultados de huellas de rayado a velocidad variable realizadas sobre los recubrimientos delgados y duros (Rango de aplicación de carga 0-100N).

Código	Descripción (película)	Fotomicrografía (MO) Mag. 100X (Dirección de rayado)	Distancia Crítica Dc (mm)	Carga Crítica Promedio Lc (N)
R6	Cobreado		0,47	4,58
R7	Cromo Decorativo		0,65	6,31
R8	Cromo duro		1,11	9,85
R9	Nitruro de Zirconio		1,12	10,90

La Tabla 4.6, recoge de manera detallada los resultados de las rayas obtenidas a velocidad constante, debido a que estos ensayos son los más recomendados para ser analizados por su invariabilidad de parámetros, según la norma ASTM C1624-05.

**Tabla 4.6. Resultados de huellas de rayado realizadas a velocidad constante sobre los recubrimientos gruesos y blandos
(Rango de aplicación de carga de 0-10N)**

C Ó D I G O	Descripción (película)	Huella observada por estereoscopía Mag. Promedio: 9X	Fotomicrografías MO		Apariencia según norma ASTM C1624-05	Modo de falla	Dureza Vickers 15g (HV)	Carga y distancia crítica (N)/(mm)
			Punto de falla o fractura Mag. 100X	Aspecto modo de falla Mag. 200X				
R1	Fosfatado				-----	Frágil	11,3	0,54/0,52
R2	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa)					Frágil	8,5	0,20/0,20
R3	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa + Clear)					Frágil	7,7	0,16/0,15
R4	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capa)					Frágil	8,2	0,46/0,45
R5	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capa + Clear)					Frágil	7,0	0,22/0,21

La tercera columna de la Tabla 4.6, muestra imágenes obtenidas mediante un estereoscopio del aspecto general de las huellas a bajo aumento (magnificación promedio de 9X). En las cinco muestras ensayadas, se aprecia que las huellas completas son muy similares longitudinalmente entre sí en cuanto a su morfología.

A un aumento de 100X se pudo detectar el punto de origen de falla y con la ayuda del analizador de imágenes APPLIED VISION la distancia crítica (D_c) que permitió determinar la carga crítica (L_c) para cada recubrimiento. En las fotomicrografías que detallan el punto y modo de falla (a 100X y 200X respectivamente) se detectaron diferencias morfológicas en cuanto al ancho de surco y a la penetración en el recubrimiento antes y después del punto de carga crítica. Un poco después de este punto de falla, las probetas R2 y R4, muestran un ancho surco y una penetración del indentador mucho menor que las probetas R3 y R5. Se puede atribuir este comportamiento a las durezas de los recubrimientos, dado que las muestras R2 y R4 (con 8,5 y 8,2 HV respectivamente) tienen durezas relativamente más altas que las muestras R3 y R5 (con 7,7 y 7,0 HV respectivamente). A mayor dureza existe más resistencia del material para ser rayado o penetrado.

A un aumento mucho mayor (400X), se dilucidó con más precisión el modo de falla de cada recubrimiento, que al compararlos con la apariencia de los modos de falla presentados en la norma ASTM C1624-05, se pudo determinar que todos los recubrimientos gruesos presentaron características indicativas de modos de falla frágil.

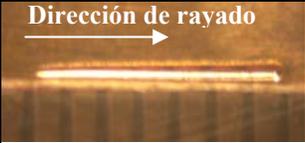
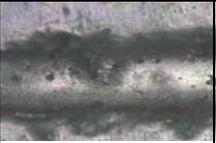
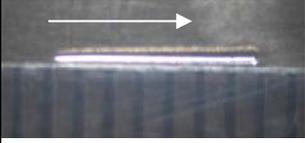
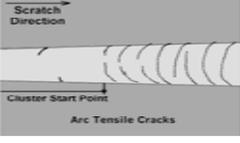
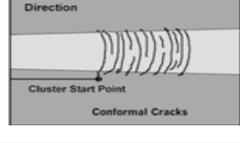
La muestra R1, recubierta de fosfatado, (material depositado en el sustrato para mejorar las propiedades de unión interfásica con la pintura) presentó el mayor valor de carga crítica (0,54N) y un modo de falla frágil. El mecanismo de falla de este recubrimiento se da debido al desprendimiento compresivo, observándose varias zonas del sustrato sin recubrir, confinados en el interior y en los límites de la huella.

Las muestras R2, R3, R4 y R5, también fracturaron de modo frágil, con mecanismos de falla de grietas de tensión en forma de “V” acostada, las cuales se forman detrás del penetrador con orientación contraria a la dirección de rayado en respuesta a los esfuerzos tensiles generados durante el deslizamiento. En estos recubrimientos, se observan los dos tipos de fallas predominantes en el ensayo de rayado: falla adhesiva y sobretodo falla cohesiva, debido a que se generaron grietas laterales que sobresalen de la huella de rayado. De estas cuatro muestras, R4 fue la que tuvo una carga crítica mayor (0,46N), luego le sigue R5 (0,22N), R2 (0,20N) y R3 (0,16N).

De manera general, se puede decir que las bajas cargas críticas obtenidas en este tipo de recubrimientos, podrían explicarse mediante las siguientes hipótesis: 1) que haya una adhesión pobre entre recubrimiento y substrato, 2) que los recubrimientos tengan muchas tensiones internas, contribuyendo a que fallen prácticamente al inicio del ensayo y 3) que el rango de aplicación de carga para este tipo de recubrimientos no sea el más indicado y deba ajustarse a uno menor que al ensayado (0-10 N), ya que estas pinturas tienen durezas y capacidad de deformación muy baja, hecho que también las haría fracturar al inicio del recorrido.

En la Tabla 4.7, el grupo de probetas conformadas por R6, R7, R8 y R9, al igual que las anteriores R1, R2, R3, R4 y R5, fueron detalladas una a una. El punto y el modo de falla pueden verse a un mayor aumento (100X y 400X) en la cuarta y quinta columna de esta tabla, donde se destaca que los detalles morfológicos difieren dependiendo de las características del tipo de recubrimiento, relacionándose tales detalles con la dureza y carga crítica obtenida en cada caso.

**Tabla 4.7. Resultados de huellas de rayado realizadas a velocidad constante sobre los recubrimientos delgados y duros.
(Rango de aplicación de carga de 0-100N).**

C Ó D I G O	Descripción (película)	Huella observada por estereoscopia Mag. Promedio: 9X	Fotomicrografías MO		Dibujo modo de falla según norma ASTM C1624-05	Modo de falla	Dureza Vickers 100g (HV)	Carga y distancia crítica (N)/(mm)
			Punto de falla o fractura Mag. 100X	Aspecto modo de falla Mag. 400X				
R6	Cobreado					Dúctil	78,7	4,54/0,46
R7	Cromo Decorativo					Dúctil	435	7,76/0,80
R8	Cromo duro					Frágil	590,3	9,13/0,94
R9	Nitruro de Zirconio					Dúctil	612,9	21,53/2,21

De las cuatro muestras, la que tuvo mayor carga crítica fue R9 -ZrN- (21,53N), que a su vez presentó la mayor dureza, ya que este recubrimiento es de material cerámico y además fue obtenido mediante una técnica de deposición que favorece una muy buena adhesión. Menores valores de cargas críticas se reportaron para R8 -cromo duro- (9,13N); R7 -cromo decorativo- (7,76N) y finalmente R6 -cobreado- (4,54 N).

A través de las fotografías obtenidas por estereoscopia, se observa que el aspecto general de la raya mejoró de acuerdo a la dureza de los compósitos. Nótese que R6 (cobreado), presenta una huella con un grosor casi uniforme desde el comienzo de la indentación hasta el final de la misma. Por otro lado, se observa como las rayas realizadas sobre R7, R8 y R9, fueron mejorando en cuanto al aspecto morfológico, comenzando con un ancho de huella pequeño (en el inicio) y aumentando progresivamente a lo largo del recorrido.

A las probetas R6 y R8, no se le encontró ninguna analogía en el aspecto de falla según la norma; sin embargo, se nota que R6 falló dúctilmente y R8 de modo frágil, por presentar grietas al azar, parecidas al quiebre de una cerámica. La muestra R7 falló de modo dúctil, debido al agrietamiento tensil.

Se puede detectar que la característica principal de este modo de falla es el agrietamiento en forma de arcos en sentido opuesto a la dirección de rayado, los cuales ocurren en la parte posterior del contacto entre el penetrador y el recubrimiento debido a los esfuerzos tensiles generados durante el deslizamiento. Según la norma, el modo de falla de R9 corresponde a una falla de tipo dúctil, teniendo como característica el agrietamiento conformal. El origen de falla se debe al doblado y agrietamiento del recubrimiento frente al penetrador.

4.4. Prueba De Cinta Adhesiva En Recubrimientos Gruesos (Pintura Automotriz)

Para el ensayo con cinta adhesiva fue difícil obtener en el mercado la cinta de prueba estándar recomendada (3M N° 710) por la norma ASTM D3359-97, o al menos una cinta que presentara mayor resistencia al despegue. A pesar de esto, se realizó la evaluación y los resultados obtenidos empleando el método de prueba “B” explicado en la norma (recomendado para recubrimientos entre 2 mils/50 μ m y 5mils/125 μ m) se presentan en la Tabla 4.8, donde se muestran las rejillas de rayado realizadas sobre cada recubrimiento y el porcentaje de remoción de pintura, el cual fue verificado empleando estereoscopia y microscopia óptica (MO) a un aumento aproximadamente igual para todas las muestras.

Tabla 4.8. Resultados obtenidos en probetas ensayadas con el método de cinta adhesiva

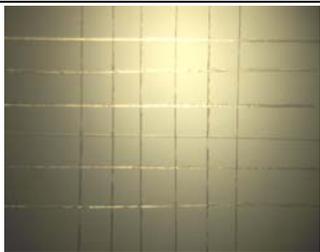
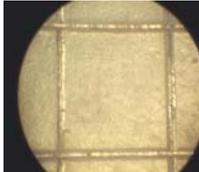
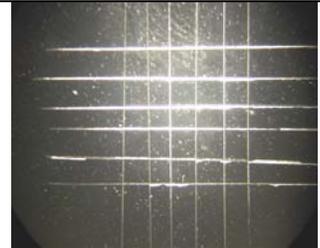
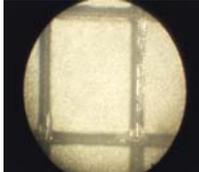
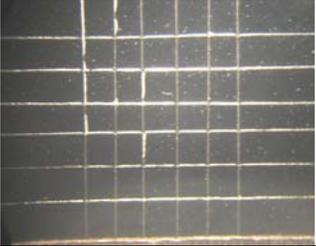
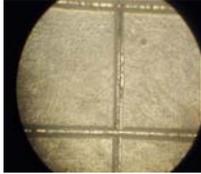
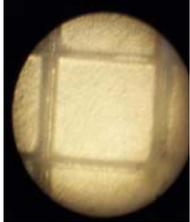
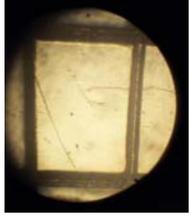
Código	Descripción (película)	Rejilla observada por estereoscopia Mag. Promedio: 7X	Microscopia óptica Mag. 100X	Patrón de comparación según norma ASTM D3359-97
				Clasificación/Porcentaje de pintura removida (%)
R1	Fosfatado			4B / \leq 5
R2	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa)			4B / \leq 5

Tabla 4.8. Resultados obtenidos en probetas ensayadas con el método de cinta adhesiva (continuación)

Código	Descripción (película)	Rejilla observada por estereoscopía Mag. Promedio: 7X	Microscopía óptica Mag. 100X	Patrón de comparación según norma ASTM D3359-97
				Clasificación/Porcentaje de pintura removida (%)
R3	Pintura Automotriz (Fosfatado + 1 Capa + Clear)			4B / ≤ 5
R4	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capa)			5B / 0
R5	Pintura Automotriz (Fosfatado + 2 Capa + Clear)			5B / 0

Según los resultados presentados en la Tabla 4.8, se tiene que las probetas que no tuvieron despegue de recubrimiento sobre su sustrato (0% de pintura removida) fueron las que registraron mayor adhesión, estas probetas son: R4 y R5. Asimismo, también se puede observar que las muestras R1, R2, R3 sí presentaron un leve desprendimiento de pintura, pudiéndose ubicar en un valor menor a 5% de porcentaje de recubrimiento removido, según la escala de la norma ASTM D3359-97. De acuerdo con este estándar, R1, R2, R3 son las muestras con menor adhesión al sustrato de acero.

4.5. Comparación De Resultados De La Prueba De Rayado Y La Prueba De Cinta Adhesiva

Luego de haber realizado los ensayos con cinta adhesiva y con la máquina construida, no se pudo establecer con claridad alguna correlación entre ambos métodos de evaluación de adhesión de recubrimientos sobre sustratos. Ésto obedece principalmente a la limitación de la cinta adhesiva utilizada que no fue suficientemente fuerte para despegar el recubrimiento de todos los sustratos. A pesar de ello, en la Figura 4.12, se grafican los resultados de ambos métodos.

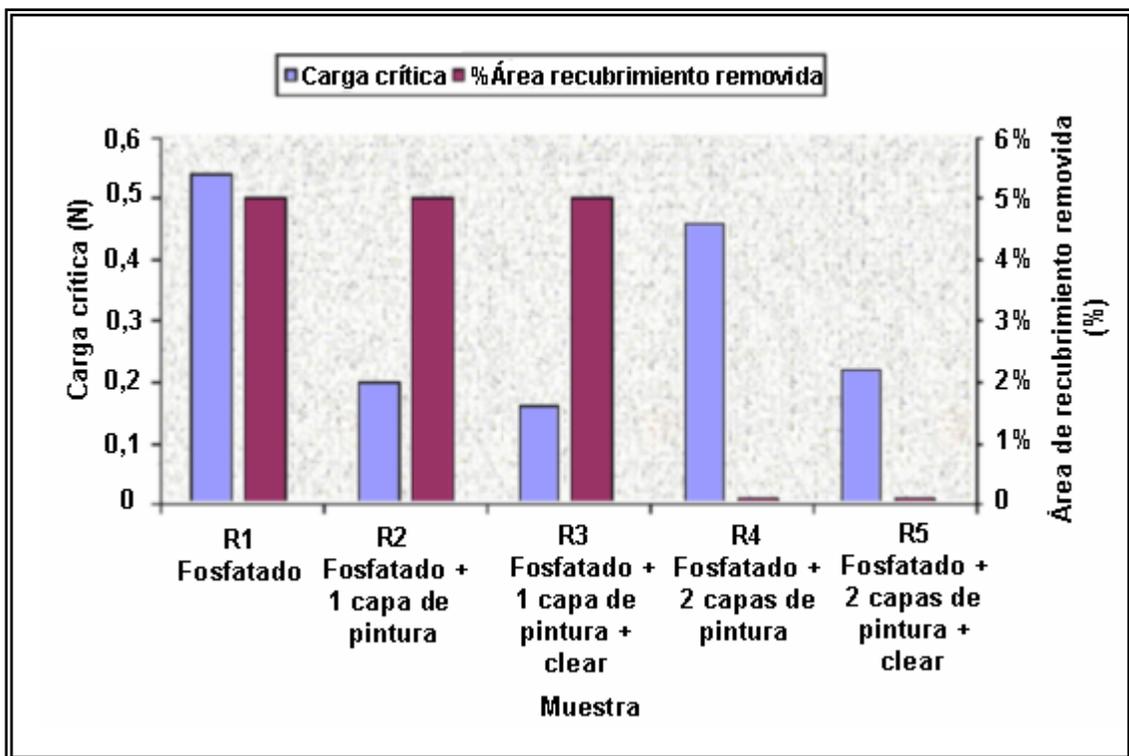


Figura 4.12. Comparación de resultados entre la prueba de rayado y el ensayo de cinta adhesiva

En el método de cinta adhesiva las probetas que tuvieron mayor porcentaje de remoción de recubrimiento de su sustrato (<5%) o menor adhesión, fueron las

probetas R1, R2 y R3. A su vez, en la prueba de rayado, las que tuvieron menor adhesión fueron, en orden decreciente: R5, R2 y R3. De esta forma, se tiene que para ambos métodos, existe una correspondencia de resultados en las probetas R2 y R3. No obstante, hay variación en cuanto a las probetas que presentaron mayor adhesión en ambos métodos. En el método de cinta las de mayor adhesiva fueron R4 y R5 y en la prueba de rayado R1 y R4, coincidiendo en ambos métodos la muestra R4 como la de mayor adhesión.

Cabe destacar además, la coincidencia en ambos métodos de la mejora de la adhesión con la adición de una capa de pintura sobre la ya existente, situación esta que se constató con los resultados obtenidos de las muestras R4 y R5.

En otro sentido, debe recalcar, que una desventaja del método de cinta adhesiva es que valora el daño del recubrimiento (porcentaje de desprendimiento de su sustrato) a través de un rango de valores y no especifica un valor definitivo de remoción de recubrimiento, como sí es el caso de la prueba de rayado que arroja un valor definitivo de la carga crítica a la cual el recubrimiento llega a fallar. También hay que señalar que el método de cinta adhesiva es un ensayo cualitativo que arroja resultados basados en comparaciones; mientras que en el de rayado, se obtienen valores característicos representativos del conjunto de factores que inciden sobre la adhesión de la muestra particular que se ensaya.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se fabricó una máquina para evaluar la adhesión de recubrimientos depositados sobre sustratos metálicos y/o cerámicos a través de la prueba de rayado, la cual se ajusta a las condiciones de ensayo establecidas en la norma ASTM C1624-05.
- La máquina de rayado denominada “RAYANIEL” se construyó empleando técnicas sencillas de fabricación, máquinas-herramientas, equipos y materiales disponibles localmente.
- Con la máquina construida fue posible realizar pruebas de rayado a velocidad constante y a velocidad variable determinándose en ambos casos que las distancias y cargas críticas de todos los recubrimientos evaluados, son proporcionales entre sí, siendo las cargas críticas a velocidad y tasa de aplicación de carga variable relativamente más altas que las obtenidas a velocidad y tasa de aplicación constante.
- Las muestras de acero ensayadas requirieron rangos de cargas distintos para las pruebas; las recubiertas con películas gruesas y blandas de pintura automotriz fueron ensayadas con un rango de carga 0-10N y las recubiertas con películas delgadas y duras de materiales metálicos y cerámicos con un rango de carga de 0-100N.

- A velocidad variable la magnitud de las cargas críticas de los recubrimientos estuvo comprendida en el rango 0,68-0,24N para las pinturas y 10,9-4,58N para los recubrimientos metálicos y cerámicos; mientras que a velocidad constante los valores estuvieron comprendidos en los rangos 0,54-0,16N y 21,53-4,54N para los mismos recubrimientos respectivamente.
- En concordancia con los resultados de las cargas críticas conseguidas en las dos condiciones de ensayo, los recubrimientos que presentaron mayor adhesión fueron: el acero recubierto con fosfato mediante rociado electroestático en el grupo de muestras con películas gruesas y blandas, y el acero recubierto con ZrN mediante PVD en el grupo de muestras con películas delgadas y duras.
- En la prueba de rayado, si la velocidad y la tasa de aplicación de carga permanecen constantes, la carga crítica es independiente de estos dos parámetros y los valores son más exactos para repeticiones de rayados sobre un mismo recubrimiento; por el contrario si son variables, la carga crítica es dependiente de la velocidad y la tasa de aplicación de carga.
- La realización de los ensayos de rayado a velocidad constante (estandarizado en la norma ASTM C1624-05) permitió establecer comparaciones de cargas críticas y mecanismos de fallas en los recubrimientos de compósitos distintos, encontrándose que estas características varían en función de los parámetros extrínsecos del ensayo (la rugosidad superficial, el espesor y método de deposición recubrimiento, la naturaleza, microestructura y dureza del compósito).
- En las muestras con recubrimientos gruesos y blandos, se observó un modo de falla frágil mientras que las muestras con recubrimientos delgados y duros

fallaron de modo dúctil excepto una de las muestras no totalmente clasificable dentro de esta última categoría.

- En los recubrimientos gruesos y blandos, la dureza del substrato no tuvo mucho efecto sobre las cargas críticas, pero a mayor dureza compuesta (substrato más recubrimiento) se obtuvo mayor carga crítica al igual que con el aumento de capas de pinturas, mientras que con la aplicación del clear (brillo) sobre éstas se desmejoró la adhesión debido probablemente a defectos (microporos) y tensiones internas presentes en esta capa, aspectos éstos que probablemente también contribuyeron a que el efecto del espesor y la rugosidad de tales recubrimientos sobre las cargas críticas no fuera el esperado.
- En los recubrimientos delgados y duros, a mayor dureza compuesta se obtuvo mayor carga crítica; pero el efecto del espesor del recubrimiento sobre la carga crítica no pudo ser establecido claramente debido a las características particulares de cada muestra, sin embargo, en las similares que sólo diferían en el espesor del recubrimiento se observó que a mayor espesor mayor carga crítica, contrario a lo que sucede con la rugosidad ya que se comprobó que a mayor rugosidad del sistema recubrimiento/substrato se consiguen cargas críticas menores.
- La relación de las cargas críticas de todos los recubrimientos evaluados (gruesos y blandos/delgados y duros) con los parámetros de la prueba de rayado, sugieren que este método es más aplicable a los recubrimientos duros, en vista que en los recubrimientos blandos no se tienen antecedentes sobre su comportamiento al rayado en relación a la influencia de dichos parámetros sobre sus cargas críticas.

- Tanto la prueba de rayado utilizando la máquina construida como la prueba de cinta adhesiva, confirmaron el incremento de adhesión con la aplicación de una capa de pintura a una ya depositada previamente y coincidieron en los resultados que indican a los mismos recubrimientos (R2 y R3) como los de menor adhesión.

5.2. Recomendaciones

- Acoplar un sensor de emisión acústica (EA) y un sensor de fuerza tangencial con conexión a un computador personal (PC) en la máquina para obtener de manera más precisa las cargas críticas y las fuerzas tangenciales respectivamente de los recubrimientos ensayados.
- Verificar que las probetas a ser ensayadas estén completamente limpias y libre de cualquier sustancia que pueda alterar el resultado.
- Además de la caracterización realizada en las probetas utilizadas en este proyecto, considerar también su caracterización en cuanto a módulo de elasticidad, tensiones residuales y coeficiente de fricción del recubrimiento, con el objeto de analizar la influencia de estos parámetros sobre las cargas críticas del sistema recubrimiento/substrato.
- Evaluar la adhesión de sistemas de recubrimiento/substrato muy similares entre sí, para así obtener resultados más precisos durante la comparación.
- Realizar varias huellas sobre los recubrimientos en distintas zonas de su superficie a fin de obtener resultados más representativos.

- Utilizar Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), para comprender mejor los modos de falla de los recubrimientos.

- Realizar ensayos de micro-rayado en las muestras recubiertas con pintura automotriz.

- Utilizar probetas con dimensiones relativamente pequeñas que permitan una mejor sujeción de las mismas en el sistema de porta-probeta de la máquina.

- Adquirir una cinta adhesiva con características similares a la recomendada por la norma.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brad, L., A y Appeltz K., T. **“Influencia del método de deposición sobre la resistencia a la adhesión de un recubrimiento de acero inoxidable proyectado térmicamente”**, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas (1999).
- [2] Castañeda E., G. **“Caracterización de dos recubrimientos de TiN sobre acero AISI 316L depositado mediante dos técnicas PVD”**, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Caracas (1999).
- [3] López, G. **“Caracterización tribológica de películas de ZrN depositadas mediante técnica PVD”**, Tesis Postgrado, Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas (2003).
- [4] Sims, C, Stoloff, N and Hagel, W. **"Superalloys II. High temperature materials for aerospace and industrial power"**. John Wiley & Sons. New York. (1987).
- [5] Centro de Investigaciones de Tecnología Química (CIDETEQ), [en línea]. Disponible en: <http://www.cideteq.mx>
- [6] Fleming P., Henry. **“Organic coating technology”**. Volumen I. Primera Edición, John Wiley and Sons, INC. USA.
- [6] http://www.ucv.ve/cifi/Paginas/Cifi_Indice/Revista12n/art7.htm.
- [7] http://www.crclarke.co.uk/Products_S/Dip%20Coating.htm
- [8] <http://www.istas.net/fittema/att/li1.htm>
- [9] Mattox, D.M. **“Deposition technologies for films and coatings”**. Editorial Noyes. Publications. USA, (1982).
- [10] Ahmed, N.A.G. **“Ion plating technology, developments and applications”**. John Wiley & Sons Publications. Great Britain, (1987).
- [11] Bull, S.J. **“Interfaces and adhesion”**. Surface Science and Technology Department, AEA Industrial Technology, Harwell Laboratory, Oxfordshire,

- U.K. 1992.
- [12] Steinmann, P.A., y Hintermann. **“A review of the mechanical test for assessment of thin-film adhesion”**. Journal Vacuum Science Technology, Swiss Center for Electronics and Microtechnology Inc. Switzerland (1988).
- [13] Heavens., J. **“Phys. Rad.”**, Scientific Publisher. USA (1950).
- [14] Benjamín, P. and Weaver, C. **“Proc. Roy. Soc.”** Scientific Publisher USA, (1960).
- [15] Perry, A. J. and Archer, N.J. **“Materials coatings techniques”**. AGARD Lecture Series No. 106, USA (1982).
- [16] Takadoun, H. **“Influence roughness and coating thickness on adhesion, friction and wear of TiN films”**. Surface and Coatings Technology, 96. (1997).
- [17] Steinmann, P.A., and Tardy, H.E. **“Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic and extrinsic parameters on the critical load”**. Thin Solid Films, 154. (1987).
- [18] Rickerby, D.S., and Bull, S.J. **“Surf. Coat. Technol”**. Scientific Publisher (39-40), 315. (1989).
- [19] Foaud, T. **“Adhesion evaluation of thin ceramic coating on tool steel using The scratch testing technique”**. Surf. Coat. Technol. (1996).
- [20] Burnett, S.J., and Rickerby, D.S. **“Surf. Coat. Technol.”**. Scientific Publisher. USA (1990).
- [21] Bull, S.J., Rickerby, M., Mathew, L., and Valli, J. **“Surf. And Technol”**. Scientific Publisher. USA (1988).
- [22] Bull, S.J. **“Failure modes in scratch adhesion testing”**. Surface and Coating technology. (1991).
- [23] ASTM Designation: C-1624. **“Standard test method for adhesion strength and mechanical failure modes of ceramic coatings by quantitative single point scratch testing”**. USA (2005).
- [24] <http://www.westportcorp.com/hardness/rockwell/Indenters.asp>

- [25] Mott, R. **“Diseño de elementos de máquinas”**. Cuarta Edición. Editorial Pearson-Prentice Hall. México (2006).
- [26] ASTM Designation: D 3359 – 97. **“Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test”**. USA (1997).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS SOBRE SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
CHRISTOPHER D. J. DÍAZ G.	CVLAC: 16.182.640 E MAIL: chrisdanield@gmail.com
JOSÉ D. ALLEN A.	CVLAC: 16.927.020 E MAIL: jdaamecanica484@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Recubrimiento

Prueba de rayado

Adhesión

Carga crítica

Substrato

Interfase recubrimiento/substrato

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERIA MECANICA

RESUMEN (ABSTRACT):

EN ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN, SE FABRICÓ UNA MÁQUINA PARA LA EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS SOBRE SUBSTRATOS METÁLICOS Y CERÁMICOS, LA CUAL SE DISEÑÓ PARA FUNCIONAR BAJO EL PRINCIPIO BÁSICO DEL ENSAYO DE RAYADO Y DETERMINAR LAS CARGAS CRÍTICAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR FALLAS ADHESIVAS Y/O COHESIVAS EN PELÍCULAS DE RECUBRIMIENTOS. LOS PARÁMETROS DE ENSAYO CONSIDERADOS PARA TAL DISEÑO FUERON TOMADOS DE LA NORMA ASTM C1624-05. CON EL OBJETO DE VERIFICAR SU FUNCIONALIDAD, SE REALIZARON PRUEBAS DE RAYADO SOBRE DOS GRUPOS DE PROBETAS, RECUBIERTAS CON: A) PINTURA AUTOMOTRIZ Y B) RECUBRIMIENTOS METÁLICOS Y CERÁMICOS, OBTENIÉNDOSE HUELLAS CON UNA LONGITUD MÁXIMA DE RAYADO DE 10 MM. A PARTIR DE UN PROGRAMA COMPUTARIZADO (ANALIZADOR DE IMÁGENES APPLIED VISION) Y DEL USO DE MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO), SE PUDO DETERMINAR LAS CARGAS CRÍTICAS Y LOS POSIBLES MODOS DE FALLA DE LOS RECUBRIMIENTOS ENSAYADOS. EN LOS ENSAYOS DE RAYADO SE OBTUVO QUE EN EL GRUPO A, LA ADHESIÓN DE LAS PROBETAS CON PINTURAS MEJORÓ (MAYOR CARGA CRÍTICA) CON LA ADICIÓN DE UNA NUEVA CAPA DE PINTURA; Y EN EL GRUPO B, LA ADHESIÓN MEJORÓ CON EL AUMENTO DE LA DUREZA DEL COMPÓSITO, SOBRESALIENDO LAS MUESTRAS CON NITRURO DE ZIRCONIO (ZRN) Y CROMO DURO QUE PRESENTARON MAYORES CARGAS CRÍTICAS. POR OTRA PARTE, SE REALIZARON ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE ADHESIÓN CON EL MÉTODO DE CINTA ADHESIVA EN LAS MUESTRAS RECUBIERTAS CON PINTURA AUTOMOTRIZ, A FIN DE VERIFICAR LA CORRESPONDENCIA O NO DE RESULTADOS PARA AMBAS PRUEBAS.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
GLORYS LÓPEZ	CVLAC:	4.784.899.			
	E_MAIL	gloryslopez@cantv.net			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
YMBHER BRIGGS	CVLAC:	5.490.469			
	E_MAIL	ybriggse@hotmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
LUIS MARTÍNEZ	CVLAC:	8.499.616.			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
RÓMULO NOTTARO	CVLAC:	11.903.887			
	E_MAIL	romulonotaro@cantv.net			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	06	11
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA. doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7
8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO _____

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA _____

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE, NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

DE ACUERDO CON EL ARTICULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE: "LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS POR OTROS FINES, CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO".

CHRISTOPHER D. J. DÍAZ G.

JOSÉ D. ALLEN A.

AUTORES

TUTOR

JURADO

JURADO

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS

DELIA VILLARROEL