



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



## **EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE UN CATALIZADOR Y UN TENSOACTIVO EN EL CROMADO DE EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE  
CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

**Tutor Académico**

Ing. Víctor Guanipa

**Co-Tutor Académico**

Ing. Vanesa Altomare

**Autores:**

Br. Lara B. Mayra V.

Br. Velázquez M. Glemnys K.

Valencia, Enero de 2007  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado Titulado: **EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE UN CATALIZADOR Y UN TENSOACTIVO EN EL CROMADO DE EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES** realizada por los bachilleres: Mayra V. Lara B. C.I. 13.700.766 y Glemnys K. Velázquez M. C.I. 13.953.467, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su calidad y forma de presentación.

---

Prof. Víctor Guanipa (MSC)  
**Presidente**

---

Prof. Vanessa Altomare  
**Jurado**

---

Prof. Pablo Baricelli (Ph D.)  
**Jurado**

Valencia, 15 de diciembre del 2006.

Ciudadana:

Prof. Cathy Pérez de Morello.

Directora de la Escuela de Ingeniería Química

Y demás Miembros del Consejo de la Escuela de Ingeniería Química.

Universidad de Carabobo.

Nosotros, los abajo firmantes y miembros del Jurado evaluador del Trabajo Especial de Grado, presentado por las Bachilleres Mayra V. Lara B., portadora de la Cédula de Identidad N° 13.700.766 y Glemnys K. Velásquez M., titular de la Cédula de Identidad N° 13.953.467, titulado "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE UN CATALIZADOR Y UN TENSOACTIVO EN EL CROMADO DE EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES", nos dirigimos a ese cuerpo a fin de informar que a dicho trabajo decidimos otorgarle "MENCIÓN HONORÍFICA", sobre la base de los siguientes elementos:

1. El Trabajo fue defendido de una manera impecable, además de la excelente disertación del mismo ante el jurado evaluador y público presente.
2. Avances inéditos en la metodología de la investigación para la ejecución de cada objetivo específico, donde se diseñó, se construyó y se realizó la puesta en marcha de una cuba de cromado para ejes de acero a escala piloto, obteniéndose condiciones operacionales de relevancia para la industria de amortiguadores.
3. Se formuló la estandarización de la solución electroquímica mediante la combinación de las técnicas de la Ingeniería Química y la industria metalmecánica, por tanto, se requiere la preparación y estudio de métodos en el área de electrodeposición, la cual no había sido estudiada a profundidad durante la carrera de ingeniería química de la Universidad de Carabobo, así como un entrenamiento a nivel profesional, en las áreas de: Química analítica, Análisis instrumental industrial, Catálisis en superficie y Fenómenos interfaciales, para lograr el desarrollo de esta investigación.
4. Alta receptividad por parte de la empresa, ya que se logró una disminución en gastos de materia prima en un 4%, en el número de piezas defectuosas y en el nivel de contaminación en el área de trabajo aportando aspectos cognitivos de gran relevancia a las empresas relacionados a la calidad del producto terminado y creación de conciencia ambiental, en virtud que el cromo VI es un agente altamente contaminante y perjudicial para la salud de quienes lo manipulan, pudiendo causar cáncer en las personas que se encuentran en contacto directo e indirecto con dicha solución de cromo.

5. La Escuela de Ingeniería Química cuenta con el desarrollo de un proyecto de resultados concretos y comprobados, que abarca desde la identificación de las variables influyentes en un proceso de cromo duro, selección del diseño experimental a utilizar, realización del cromado a escala piloto de los ejes de acero, estudio del impacto ambiental del proceso de reducción del cromo VI a cromo metálico y la edición de un manual de operación de la cuba diseñada.

6. La investigación constituye un trabajo inédito, el cual nunca se había desarrollado en nuestra Universidad requiriendo la asesoría de expertos en el área de la electrodeposición y fenómenos interfaciales.

7. Se recomienda la publicación de este trabajo en revistas especializadas en el área.

Sin otro particular quedamos de ustedes,  
Atentamente,

---

Prof. Víctor Guanipa  
**Presidente**

---

Prof. Pablo Baricelli  
**Jurado**

---

Prof. Vanessa Altomare  
**Jurado**

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por habernos dado la vida y con ella la oportunidad de desarrollar nuestra carrera e iluminarnos el camino hacia su feliz culminación y llenarnos de fe, constancia y perseverancia día tras día durante la realización de este trabajo especial de grado ...*

*A la Universidad de Carabobo, nuestra Alma Mater, que se convirtió en un segundo hogar durante todo este tiempo y donde nos formamos no solo como profesionales sino que también nos vio crecer como individuos, y que nos permitió llevar a feliz término la realización de la presente investigación, a esta nuestra casa de estudios, mil gracias...*

*A la empresa Gabriel de Venezuela, y en especial a los Ingenieros Fanny Acero, Rafael Silva, y a todos y cada uno de los trabajadores de la planta de cromado, por brindarnos su conocimiento y colaboración para el desarrollo de este trabajo especial y sin cuyo muy significativo aporte no hubiese sido posible la realización de la presente investigación ...*

*A nuestro tutor Ing Víctor Guanipa, por otorgarnos la gran oportunidad de compartir sus conocimientos, experiencia profesional y de vida, por toda la paciencia, fe y confianza que deposito en nosotras y su motivación al logro de nuestros objetivos, y sobre todas las cosas, por haber compartido, luchado y continuado a nuestro lado durante este largo tiempo siempre sonriente; a ud infinitas gracias...*

*A nuestra Co-tutora Ing Vanesa Altomare, por brindarnos su valiosa colaboración para la realización de esta investigación, por habernos acompañado en todo momento, y sobre todo en los mas difíciles, por su guía y pronta respuesta ante los obstáculos que sin su presencia oportuna difícilmente hubiésemos podido enfrentar, a ud mil gracias por convertirse en esa mano amiga que nos llevo a la exitosa culminación de nuestra meta...*

*Al Lic Mario Rossi, por permitirnos llevar a cabo la realización de la presente investigación en el Laboratorio de Química Orgánica, por toda la ayuda prestada, y sobre todo por*

*bríndarnos sus conocimientos, consejos y experiencia y acompañarnos durante la extenuante jornada de experimentación, a tí Muchísimas Gracias...*

*A Henry, Anderson y el señor Ascanio por su ayuda en la fabricación y montaje del equipo utilizado en la fase de experimentación y sin cuya colaboración no hubiese sido posible la realización de la presente investigación...*

### ***Glemnys:***

*A cada uno de mis familiares, abuela, tíos, tías, primos y primas por acompañarme durante mi carrera con su apoyo, cariño y aliento....*

*A la Sra Lila Ludeña quien me brindo su ayuda durante todo el transcurso de mi carrera, por sus palabras de aliento, su fe y confianza en mí, por su cariño incondicional y por enseñarme a través de sus consejos, su experiencia y su gran espíritu a ser una mejor persona, y convertirme en un futuro en una mejor profesional..*

*A David, por convertirte en mi gran amigo, porque estuviste a mi lado desde el principio de este camino y fuiste mi apoyo en cada momento, por todo el amor, protección y cariño que me brindaste durante todos estos años y porque he contado contigo siempre y aun hoy estas presente...*

*A Cesar, Zully y Aldibaro por su eterna amistad, por su apoyo y motivación en los momentos mas difíciles y por impregnarme de alegría durante todo este tiempo...*

*A Flor, Nidia, Norbelys e Isabel por convertirse en mas que mis compañeras de estudio, en mis grandes amigas; por estar allí en los buenos y malos momentos, por compartir cada día de esta difícil pero muy hermosa carrera, por su compañía, aliento y hermandad*

*durante estos años de estudio y sobretodo porque aun nos queda mucho por recorrer, a uds amigas gracias hoy y siempre...*

*A todos mis amigos y amigas de la UC y en especial a Juan Carlos por su apoyo, motivación y cariño en el transcurso de este tiempo...*

*A Mayra, por ser mas que mi compañera de tesis, mi amiga, por tu paciencia y la confianza que depositaste en mí, por tu constancia, valor y apoyo durante todo este tiempo y por superar juntas los malos momentos que nos toco compartir, hoy te agradezco por haberme dado la oportunidad de culminar esta etapa importantísima de mi vida en tu compañía..*

*Y finalmente a Daniel, porque aunque no estuviste presente desde el principio de mi carrera me has acompañado desde el inicio de este trabajo de grado, por tu infinita paciencia y ese gran amor que me has brindado durante todo este tiempo compartido, por ser mi apoyo en los momentos difíciles que me toco vivir, por toda la colaboración que me brindaste y entre tantas otras cosas, gracias por darme la maravillosa oportunidad de disfrutar de este y todos los demás triunfos que la vida me depare, a tu lado...*

**Mayra:**

*A mi familia, por ser en mi vida la fuerza y la razón para alcanzar las metas, y al final estar allí para compartirlas conmigo!*

*A mis amigas muy queridas; Verónica, Lorena, Elizabeth, Ivel, Berlyz y muy especialmente a Darling, ya que más que amigas ya son hermanas para mí, gracias por ser como son , por estar y ser un apoyo en tantos momentos.....NO tengo como agradecerles..... Solo puedo decirles GRACIAS! MIL GRACIAS!!!!*

*A los amigos de la UC, Edgar, Gaudy, Nidia, Munia, Genny, Jessica, Johanna, Johanil y Juan Carlos, mil gracias a todos, junto a ustedes logre disfrutar y valorar estos últimos semestres como estudiante de esta carrera, llevándome así los mejores recuerdos que tendré en mi vida futura.....*

*A Glemnys, porque juntas descubrimos que el éxito se logra trabajando con tenacidad y con perseverancia, que solo cuando existe una amistad se logra vencer obstáculos que a veces parecían invencibles, gracias amiga por la lucha, la constancia y la confianza, al final lo logramos colega!!!!!!*

*A todas aquellas personas que están a mi lado, de una forma u otra, ya que lo están por una razón, ayudando con un grano de arena, que ponen día con día y que al final de la vida conforman esa montaña de vivencias que nos ayudan a saber que has vivido y a plenitud.*

*Finalmente, las autoras les damos gracias a todos, gracias, desde el primero hasta el último, simplemente GRACIAS!!!!!!*

## DEDICATORIA

*A tí papá, que siempre creíste y confiaste en mí, me apoyaste, acompañaste y diste aliento en todo momento de mi vida, en especial de mi carrera; y que desde niña eras mi guía, consejero y protector; fuíste más que un maravilloso padre, un gran amigo, y aunque hoy no estés conmigo se que desde allá arriba estas sonriéndome, orgulloso y feliz de haber logrado éste que también era tu sueño, a tí te debo todo cuanto soy hoy...*

*A tí mamá, por ser mi gran compañera, y compartir a mi lado durante todo este tiempo, por enseñarme la importancia del estudio y convertírte cada día en un ejemplo de lo que es ser una gran mujer, por tu paciencia e infinito amor, por tus consejos, tu apoyo, y eterna motivación; y por tu valentía, e incansable lucha y trabajo para guiarme por la vida, tu más que nadie merece disfrutar de este momento, esto es solo una parte de lo mucho que te debo...*

**A tí hermano, por tu apoyo, y sobre todas las cosas, por recordarme con tu entusiasmo y alegría que hay que sonreírle siempre a la vida a pesar de todo; éste también es tu logro...**

*A mis sobrina y ahijada, como ejemplo de constancia, amor por un sueño y perseverancia, para que siempre tengan presente que cuando se lucha por alcanzar una meta, a pesar de las dificultades, si se tiene verdadera pasión, se hará realidad...*

*A cada uno de ustedes gracias por convertirse en mi inspiración....*

Glemnys Velázquez

## DEDICATORIA

*A mis padres, por que gracias a ellos soy la persona que soy. A mí padre porque de él aprendí muchas cosas, conocimientos, lecciones de vidas, la importante que es el estudio y ser una mejor persona cada día. A mi madre porque de ella aprendí que la vida es una completa lucha, pero que si se lucha por amor todo es posible, hasta seguir viviendo.... pase lo que pase!!!!*

*A mi hermana, a la cual quiero por sobre todas las cosas, porque ella es mi compañera, mi gran amiga, la persona con la que siempre contare y que siempre deseo tener a mi lado.*

*A mi hermano, porque aunque lo tuve por muy poco tiempo es una parte importante en mi vida y es un pedazo de mí que nunca dejare a un lado, te amare por toda la vida y más allá.*

*A mi hermosa sobrina, que nos ha llenado la vida de luz, de amor y ternura, pero lo más importante, porque es una razón más para seguir adelante después de tanto y tanto.*

*Gracias a todos por estar y por ser quienes son en mi vida.....LOS AMO!!!*

Mayra Vanessa Lara Borges

## SUMARIO

**El presente trabajo tuvo como objetivo general la evaluación de la influencia del tensoactivo y del catalizador empleados en el proceso de cromado, del tipo de cromo duro, en los ejes de acero para amortiguadores, para lo cual se identifican y analizan las variables del proceso que influyen en mayor proporción en el mismo, con el fin de generar la alternativa de solución que garantice la calidad del depósito de cromo en la superficie del eje.**

**Las variables influyentes en el proceso fueron detectadas, analizadas y sometidas a un diseño experimental de tipo factorial, en el cual se manejaron dos variables independientes, concentración de tensoactivo y concentración de catalizador, y una dependiente, espesor de la capa de cromo, para lo cual se realizó el cromado de ejes de acero a escala piloto; esto a su vez, fue generando distintas alternativas de solución que luego se analizaron hasta lograr obtener la mejor condición de operación del proceso.**

Las alternativas de solución se estudiaron en base a la función respuesta o variable dependiente del diseño factorial, siendo la seleccionada aquella que garantice un espesor de la capa de cromo en la superficie del eje, que se encuentre entre los parámetros de calidad planteados por una empresa productora de amortiguadores en su proceso de producción.

En base a ello, la alternativa generada del estudio experimental realizado, estableció como mejores condiciones de operación a escala piloto, el empleo de un volumen de tensoactivo de 2,3 mL y una concentración de catalizador de 240 g/L, obteniéndose así, en el eje, un cromado uniforme y un espesor de cromo dentro del parámetro de 14,5 micras, además de una disminución en el uso de materia prima en un 4%, siendo estos los resultados más resaltantes obtenidos en la experimentación.

**Se recomienda el uso de la cuba a escala piloto con fines prácticos y/o didácticos, de forma tal, que la misma sirva como apoyo para futuras investigaciones que se deseen realizar en la materia del proceso de electrodeposición de cromo duro.**

## SUMMARY

**The present work had as general objective the evaluation of the influence of the tensoactivo and of the catalyst employees in the process of having chromed, of the type of hard chromium, in the steel axes for shocks, for that which, they are identified and they analyze the variables of the process, that influence in more proportion in the same one, with the purpose of generating the solution alternative that guarantees the quality of the deposit of chromium in the surface of the axis.**

The influential variables in the process were detected, analyzed and subjected to an experimental design of factorial type, in which two independent variables, tensoactivo concentration and catalyst concentration, and a clerk were managed, thickness of the chromium layer, for that which was carried out the one chromed of steel axes to scale pilot; this in turn, was generating different solution alternatives that then were analyzed until being able to obtain the best condition in operation of the process.

The solution alternatives were studied based on the function answer or dependent variable of the factorial design, being the one selected that that guarantees a thickness of the chromium layer in the surface of the axis, that is among the parameters of quality outlined by a company producer of shocks in their production process.

Based on it, the generated alternative of the carried out experimental study, it settled down like better operation conditions to scale pilot, the employment of a volume of tensoactivo of 2,3 mL and a concentration of catalyst of 240 g/L, being obtained this way, in the axis, a chromed uniform and a chromium thickness inside the parameter of 14,5 microns, besides a decrease in the matter use prevails in 4%, being these the results more important obtained in the experimentation.

The use is recommended from the vat to scale pilot, with practical and/or didactic ends, in such way, that the same one serves like support for future investigations that are wanted to carry out in the matter of the process of deposition of hard chromium.

## INTRODUCCIÓN

**Un ejemplo de utilización del proceso de cromo duro son las empresas productoras de amortiguadores para vehículos, éstas lo emplean con el fin de mejorar las propiedades físicas y químicas de los ejes de acero que conforman la estructura del amortiguador, el proceso electrolítico llevado a cabo presenta un gran número de irregularidades que conllevan a la producción de piezas defectuosas y retardos en el proceso productivo de estas empresas, por ello se plantea la posibilidad de aumentar la producción de ejes cromados para amortiguadores, para lo que se hace necesario el estudio de las variables involucradas en el proceso a fin de identificar y controlar su influencia con el fin de garantizar de este modo un incremento en la productividad y capacidad de producción de la línea de cromado manteniendo los parámetros de calidad exigidos por el mercado.**

Para el logro de los objetivos planteados se realiza primeramente la identificación de las condiciones típicas, bajo las cuales operan las líneas de cromado de distintas empresas, en donde se llevan a cabo visitas a la línea, entrevistas con el personal y revisión de manuales. Una vez se han establecido las condiciones de operación de las cubas se identifican y analizan las variables que influyen directamente sobre la calidad del proceso, a fin de manipular las variables y analizar la influencia e interactividad de las mismas sobre éste. Lo antes mencionado es esencial para comenzar a generar las alternativas de solución, las cuales se fundamentan en experimentaciones de campo y cálculos estadísticos, para así garantizar la mejor alternativa que garantice un incremento en la producción de los ejes de acero conservando los parámetros de calidad ya planteados por las empresas.

El presente trabajo especial de grado está estructurado en cinco (5) capítulos. El Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema existente, definiéndose la situación actual y deseada, se formulan los objetivos tanto el general como los específicos, además de la justificación, limitaciones y alcances del presente trabajo. En el Capítulo 2 se encuentran los antecedentes y fundamentos teóricos que sustentan la investigación; seguidamente en el Capítulo 3 se abarca la metodología empleada para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados. El Capítulo 4 incluye el análisis y discusión de los resultados obtenidos luego de la realización de la experiencia práctica. Una vez han sido analizados los resultados obtenidos se genera la alternativa de solución y se plantean las nuevas condiciones de operación de la línea a través de la

edición de un manual de operación. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes de esta investigación.

Para finalizar, al implementar las alternativas de solución que son generadas en la presente investigación, se garantiza un incremento en los niveles de producción de las líneas de cromado de ejes de acero de distintas empresas, manteniendo los niveles de calidad ya establecidos por las mismas, además de aportar un mejor control interno de las cubas de cromado y un mantenimiento preventivo de ellas, disminuyendo los costos operacionales y las paradas no planificadas por las empresas.

# **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el siguiente capítulo se presenta el problema en estudio, la situación actual y deseada y las razones que justifican la investigación, definiendo los objetivos a lograr, las limitaciones y el alcance de la misma.

## **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Las empresas productoras y comercializadoras de autopartes de vehículos automotores para el mercado venezolano e internacional, y en especial las fabricantes de amortiguadores, cuentan entre sus etapas de producción con un proceso de cromado para los ejes que son ensamblados dentro del amortiguador y que le proporcionan a éste la protección requerida contra el efecto de corrosión.

El acero, del cual están fabricados los ejes, es un material muy susceptible a todos los mecanismos de la corrosión así que en este tipo de fabricas se deben hacer esfuerzos por mantener los materiales sin deterioro en el proceso de fabricación y dar las condiciones de protección anticorrosiva para que la pieza pueda cumplir su función por todo el periodo de garantía ofrecido por el fabricante.

Tomando en cuenta el mercado Venezolano, el amortiguador de suspensión automotriz, es una pieza de corta vida ya que está sometido a condiciones extremas de desgaste por fatiga y ataque de cualquier cantidad de compuestos químicos provenientes de las carreteras. Lo anteriormente dicho hace necesario someter a la pieza principal del ensamblado del amortiguador, el eje, a un proceso de protección que impida la presencia de fallas en éste, originadas del deterioro por acción corrosiva.

Los amortiguadores que son fabricados en el país son de tipo convencional y Mcpherson, conociéndose el primer tipo como un amortiguador de diseño sencillo, y el segundo como un amortiguador de diseño estructural, ideales para el 4x4; ya que son de doble acción porque actúan tanto en compresión como en extensión.

Algunos de los equipos y materiales que se emplean en este trabajo así como también el proceso de fabricación, son tomados de una empresa de la zona, donde se incluye también algunos de sus proveedores.

El proceso de fabricación de amortiguadores consta de varias etapas de producción, como lo son: corte, desbaste, mecanizado, fresado, cementado, rectificado, cromado, ensamblaje, pintura, embalado y despacho.

En la primera etapa del proceso(corte),es cortada la barra de acero a una longitud específica, ésta depende del diseño del amortiguador el cual varía para cada modelo de automóvil, luego, es tomada la barra y llevada a la máquina debastadora (desbaste) donde se le reduce al diámetro requerido para cada tipo de eje en fabricación, que será de 1/2", 9/16" y 11/16" para el tipo de amortiguador convencional y de 20 mm, 22 mm y 25 mm para el tipo McPherson. Una vez realizado el desbaste, se pasa a la etapa de mecanizado, donde son cortadas las puntas de la barra de acero para luego ser fresadas (fresado) dándole forma a estas puntas cuyo acabado puede ser hexagonal si será utilizada en un amortiguador tipo Mcpherson o plana si será empleada en uno convencional, convirtiéndose así la barra de acero en el llamado eje del amortiguador, que en la etapa del cementado, sufre un templado superficial hasta una cierta profundidad según valores de especificación, esto, para dar dureza superficial al eje, los ejes luego son rectificadas para obtener una mayor calidad de superficie y mejor precisión en el diámetro y así ser llevados a la etapa de cromado.

En la línea de cromado, los ejes son ensamblados en gancheras, las cuales son dispositivos para colgar varios ejes simultáneamente, están construidas de acero y permiten cromar con una solución diluida de ácido crómico, solo hasta 60 piezas por vez. El tratamiento se realiza con la finalidad de dar propiedades anticorrosivas a las piezas y mejorar las características específicas del material del eje tales como durabilidad, proporcionando mayor dureza al eje y efecto de roce, disminuyendo la fricción entre el eje y el sello del amortiguador. Una vez finalizado el proceso de cromado, ya en las etapas finales, los ejes son ensamblados a la base del amortiguador, posteriormente son pintados, embalados y despachados a los almacenes en espera del envío a clientes y distribuidores.

**La línea de cromado consta de varios procesos físico-químicos, tal como se puede observar en la Figura 1.1. El proceso generalmente se inicia con una serie de pretratamientos, el primero de ellos es el desengrase químico y electrolítico, donde se le retiran partículas y residuos a la superficie del material, éste se lleva a cabo, a través de un desengrase con un producto químico, suministrado por un proveedor, identificado por la empresa con las siglas V-20DI, el cual es un producto alcalino, soluble en agua, para ser**

usado previo a los procesos de cromado o fosfatizado, remueve sucios tenaces como aceites y grasas dejando el material preparado para los procesos posteriores, el V-20DI se usa fundamentalmente por inmersión y requiere de una concentración de trabajo entre 40 – 80 g/L a una temperatura entre 40 - 70 °C. Posteriormente, el eje es tratado con una solución electrolítica, también proporcionada a la empresa por un proveedor externo, esta solución conocida como V-77DE remueve completamente los sucios sólidos y debido a su alta alcalinidad neutraliza los sucios ácidos sin perder su eficacia limpiadora, requiere de una concentración de trabajo de entre 30-60 g/L y una temperatura de 40 - 60 °C. De allí el eje pasa a la siguiente cuba donde es aplicado un enjuague con agua a la pieza con el fin de retirar el exceso de desengrase químico o electrolítico y posteriormente un mordentado, donde se ataca la superficie de acero a cromar con una solución diluida de ácido crómico para lograr máxima adherencia del deposito, el baño de mordentado es en principio electrolitos de cromo diluido; en general se trabaja con una concentración equivalente a la mitad de la del baño de cromado, es decir entre 9,3 – 11,5 °Be y con una temperatura igual a la de dicho baño, entre 54 – 65 °C, por esto el proceso de mordentado es considerado como un pre-cromado.



**FIGURA 1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE CROMADO EN UNA EMPRESA FABRICANTE DE AMORTIGUADORES**

Al finalizar los pretratamientos, se procede a introducir los ejes en las cubas de cromado, las cuales constan de una solución de cromo hexavalente con barras de plomo sumergidas, que actúan como ánodo, de 2 pulgadas de diámetro y colocadas alrededor del

eje que se va a cromar, éstas sufren un proceso de oxidación, provocando a su vez, la reducción del cromo hexavalente, solución a la que se le aplica una corriente eléctrica, que puede llegar a alcanzar los  $50 \text{ A/dm}^2$  actuando de esta manera, como una celda electrolítica donde el cromo hexavalente es reducido a cromo trivalente o también conocido como cromo metálico, el cual se deposita a lo largo de la superficie del eje. Adicionalmente, en esta reacción interviene la presencia de un tensoactivador cuya función es, entre otras, la de disminuir la evaporación de la solución de cromo y un catalizador que favorece la velocidad de la reacción. Una vez transcurrido el tiempo de deposición, el cual oscila entre 35 – 50 minutos dependiendo del tamaño y diámetro de cada tipo de eje, las piezas son enjuagadas con agua con la finalidad de retirar el exceso de cromo.

Finalmente, las piezas son retiradas de las gancheras e inspeccionadas con la finalidad de verificar la total deposición y recubrimiento de cada una de ellas, para luego ser llevadas al tratamiento de deshidrogenado, donde se le elimina el hidrógeno que genera el cromado, posteriormente son pulidas para finalmente realizarles un enjuague manual, con una manguera a presión, esto con la finalidad de retirar el solvente, aceite y contaminantes que salen de la pulidora, tales como; restos de la piedra de pulir que quedan adheridos al eje. Aquellas piezas que lleguen a este punto son transportadas al almacén de ejes cromados en espera a ser llevadas a la línea de ensamblaje del amortiguador.

Por lo general, en el proceso de cromado las condiciones de operación son controladas de forma empírica, tales como, la adición de tensoactivo, cuya concentración necesaria dentro de cada cuba es desconocida y solo es agregado una cierta cantidad (aproximadamente 500 mL por cada cuba) por el operario, cuando detecta un olor apreciable a cromo, que le indica así, que esta ocurriendo la evaporación de la solución crómica. Además, suelen desconocerse las características y concentración requerida de catalizador que debe estar presente en las cubas, puesto que la medición de éste es chequeada por proveedores internacionales, es decir, cuando en una empresa se detectan fallas en el cromado del eje, son tomadas muestras de la solución crómica presente en las cubas y enviadas a los laboratorios especializados pertenecientes a las empresas proveedoras del catalizador utilizado en el proceso, donde se determina, entre otras cosas, el nivel de concentración actual del catalizador y el nivel al que debería estar, enviándole a la empresa, las condiciones de dosificación del catalizador que garantizará el óptimo funcionamiento del proceso.

El control externo, toma entre 2 a 3 meses de respuesta, esto depende del proveedor, y por lo tanto, durante ese tiempo, ocurren fallas en el proceso, como el aumento en el tiempo de deposición de cromo en el eje, defectos de cromado, como cromado opaco (sin brillo), cromado rugoso e incluso, falta de uniformidad de la capa de cromado alrededor del diámetro del eje, lo que implica una deficiente calidad en la deposición de cromo a lo largo de su superficie; incurriendo así, en retrabajo de los ejes defectuosos con posterior atraso en las subsiguientes líneas de operación y por lo tanto, disminución de la capacidad productiva de la línea de cromado.

En tal sentido, el propósito del trabajo consiste en evaluar los niveles de concentración requeridos de catalizador y tensoactivador que permita controlar y mejorar el proceso de cromado de los ejes con una velocidad de respuesta en la toma de acciones correctivas más eficaces; y que a la vez sea empleada la menor cantidad posible de ácido crómico con la finalidad de disminuir la contaminación generada por el proceso, así como también, el efecto nocivo que causa sobre el operario el empleo y manipulación a diario de altas concentraciones de cromo.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente, en los procesos de cromado se desconocen las concentraciones requeridas de tensoactivo y catalizador para lograr un adecuado proceso productivo, puesto que la adición de tensoactivo cuando se realiza, se hace en forma empírica; y es necesario realizar análisis en laboratorios especializados, ubicados fuera del país, para estandarizar los niveles de concentración de catalizador, lo cual implica, atraso en el calendario productivo por disminución de la producción de cromado de ejes por defectos de cromado, a consecuencia, de la falta de un control interno que les permita conocer los niveles de concentración de catalizador y tensoactivador; Por tal motivo, se requiere de la evaluación a escala piloto del proceso de cromado en cuanto a la concentración y dosificación necesarias de tensoactivo y catalizador que permita establecer el tiempo de residencia de estos químicos dentro de las cubas para lograr un alto rendimiento del proceso en cuestión a escala industrial.

### **1.2.1. Situación actual**

En el proceso de cromado de ejes de amortiguadores los niveles de concentración y dosificación de tensoactivo se realizan por lo general, de forma empírica, y del catalizador se realizan por indicación de un proveedor externo a las empresas venezolanas, ya que éstas no cuentan con una evaluación de la concentración y dosificación que permita mantener un control interno del proceso que garantice ejes de

alta calidad y que cumpla con las especificaciones del cliente, provocando así, una disminución de la capacidad de producción por fallas en la línea, convirtiéndola, en la etapa crítica y limitante del proceso productivo de los amortiguadores.

### **1.2.2. Situación deseada**

Contar con una evaluación de los distintos niveles de concentración y dosificación del tensoactivo y catalizador, a escala piloto, que permita establecer un control interno del proceso de cromado que garantice ejes de alta calidad; y que cumplan con las especificaciones de los clientes sin necesidad de recurrir a agentes externos para su control.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar la influencia del tensoactivo y catalizador en el proceso de cromado, con la finalidad de determinar los niveles de concentración y dosificación necesarios para lograr un mayor rendimiento en la producción de ejes de acero para amortiguadores.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- 1.3.2.1 Identificar las condiciones de operación típicas de un proceso de cromado, con la finalidad de conocer las áreas críticas.
- 1.3.2.2 Analizar las condiciones de operación típicas de un proceso de cromado, con el propósito de detectar desviaciones con los estándares de control y especificaciones en el mismo.
- 1.3.2.3 Determinar el efecto de la concentración del tensoactivador y catalizador en el proceso de cromado, a fin de conocer la influencia sobre éste y el producto.
- 1.3.2.4 Especificar la concentración de tensoactivo y catalizador mediante un diseño experimental, que permita garantizar un mejor funcionamiento del proceso de cromado.
- 1.3.2.5 Diseñar un manual de operación de la cuba de cromado a escala piloto, que permita la fácil operatividad del equipo.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Conocer, mediante una evaluación, los niveles de concentración del catalizador y tensoactivo es de vital importancia para las empresas fabricantes de amortiguadores ya que le permitirá controlar las condiciones de operación idóneas del proceso de cromado de los ejes.

Producto de esta investigación, el sector fabricante de piezas de autopartes de vehículos, contará con resultados que contribuirán a la toma de decisiones y al establecimiento de las estrategias a seguir para mejorar la producción de amortiguadores, en consecuencia, las empresas dispondrán de un trabajo realizado sobre el proceso de cromado, que constituye un medio de solución a la problemática presentada en esta etapa de la producción.

Además, la realización de este trabajo aporta una base para investigaciones futuras que puedan realizarse dentro y fuera de la Universidad de Carabobo, sobre la evaluación del uso de tensoactivadores y catalizadores en un proceso real de cromado, el cual no ha sido profundamente estudiado durante la carrera de Ingeniería Química de esta institución, así como también incentivará el interés por parte del estudiantado y profesorado de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo en el estudio de esta rama de la Química presente en los procesos industriales.

Adicionalmente, representa un aporte de material bibliográfico en el área de diseño de experimentos usando el diseño experimental factorial, ya que, permite paso a paso el desarrollo de un experimento utilizando dicha técnica, herramientas estadísticas como el ANOVA y análisis de procesos; de necesarios conocimientos para los futuros ingenieros de la Universidad de Carabobo.

Finalmente, el desarrollar este Trabajo Especial de Grado, le ofrece a los autores la oportunidad de enriquecer y afianzar los conocimientos adquiridos durante el estudio de la carrera de Ingeniería Química y obtener experiencia en el ámbito industrial y laboral.

## **1.5. LIMITACIONES Y ALCANCE**

Para la realización de este trabajo de investigación el factor limitante más importante será el número de pruebas a realizar para la determinación de la concentración de ácido crómico, tensoactivo y catalizador presentes en la solución debido al costo elevado de las mismas, producto de los compuestos y equipos utilizados para tal fin.

Otra de las limitaciones será, además, la espera por los materiales, tales como; el ácido crómico y tensoactivo, entre otros; ya que son materia de importación y que serán donados por una empresa fabricante de amortiguadores de la zona.

En cuanto al alcance, la investigación en desarrollo planteará la evaluación de los distintos niveles de dosificación y concentración de tensoactivo y catalizador que garantice un control interno del proceso de cromado, planteando la mejor alternativa de solución, para las condiciones de dosificación del tensoactivo y catalizador que permita mejorar dicho proceso, quedando a disponibilidad de las empresas fabricantes de amortiguadores la adopción de dicha solución.

# 1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presentan los antecedentes y fundamentos teóricos los cuales sustentan la investigación realizada.

## 2.1 ANTECEDENTES

A continuación, se presentan los trabajos usados como base para la realización de la presente investigación.

2.1.1 CEDEÑO, L y A. RAMOS, (2004). **Evaluación de la línea de cromado de ejes de acero para amortiguadores en una empresa fabricante de autopartes.** Gabriel de Venezuela C.A., Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar los parámetros del proceso de cromado de los ejes de acero para amortiguadores en la línea de cromado de la empresa antes mencionada y así obtener un aumento en la capacidad de producción.

De los resultados obtenidos, se obtiene que al aumentar la intensidad de corriente mediante un cambio de los rectificadores se logra un aumento significativo en el nivel de producción. La diferencia del trabajo mencionado y el que se realiza actualmente aún cuando fue realizado sobre la misma línea de producción; es que no enfocan el estudio a nivel del uso e influencia de los tensoactivadores y catalizadores presentes en las cubas de cromado.

2.1.2 CORONA, R y C, LAU. (2004). **Rediseño de la línea de tratamiento químico de los perfiles de aluminio de la empresa I.V.I.V Group, C.A.** I.V.I.V Group, C.A, Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en rediseñar la línea de tratamiento químico de los perfiles de aluminio de la empresa I.V.I.V Group, C.A con el fin de mejorar el tratado de los perfiles.

De los resultados obtenidos se concluye que la temperatura y el tiempo de inmersión en los baños de ALUSAT 20 y ALUCOAT ZR-70 son las variables de mayor influencia en el tratamiento, además la combinación adecuada de estos factores genera una deposición apreciable de titanio y zirconio sobre la superficie de los perfiles tratados, también se concluye que la alternativa de rediseño propuesta es rentable para la empresa.

La semejanza entre ambos trabajos de investigación está en la metodología empleada; ya que, en el trabajo mencionado el método utilizado por los investigadores consiste en la identificación de las variables y el análisis de éstas para posteriormente diagnosticar el proceso y establecer las alternativas de mejoramiento, seleccionando la mejor alternativa en base a los ensayos realizados; a través del uso de un diseño experimental factorial y metodología de TAGUCHI. La diferencia entre ambos trabajos es que en el trabajo actual, la evaluación de las variables más influyentes es sobre un proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores mientras que en el trabajo mencionado se hace sobre un proceso de tratamiento químico de los perfiles de aluminio y además en este se hará un rediseño a la línea de tratamiento.

2.1.3 BAEZ, T y L, CRESPO. (2004). **Determinación de la cantidad adecuada de tensoactivo y fragancias para desinfectantes y detergentes líquidos elaborados por La Envasadora P.A., C.A.** La Envasadora P.A., C.A, Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en determinar la cantidad adecuada de tensoactivo y fragancias en los lavaplatos y desinfectantes líquidos, para asegurar la calidad de los productos y lograr mayor competitividad en el mercado.

Entre los logros alcanzados se concluye que las variables más influyentes sobre la calidad de los lavaplatos líquidos fueron: la cantidad de fragancia, la mezcla de surfactante y la cantidad de espesantes empleada en la elaboración; en el caso de los desinfectantes solo se considera la cantidad de surfactante (nonilfenol etoxilado) obteniendo además la cantidad adecuada de estos factores que debe ser empleada con el fin de mejorar y asegurar la calidad de los productos; también se concluye que la implementación de estas nuevas formulas propuestas resulta económicamente rentable para la empresa.

La similitud entre ambos trabajos de investigación radica principalmente en que se determina la cantidad adecuada de tensoactivo que debe ser utilizada en la obtención del producto y además en la metodología llevada a cabo ya que se identifican los factores que influyen sobre la calidad de los productos y procesos, luego se elabora un diseño y un análisis experimental factorial para el análisis de los factores más influyentes y su interacción, además de emplear un análisis de varianza para la selección de la mejor combinación de las variables que permita la obtención de la formula mejorada. La diferencia entra ambos trabajos, es que en el trabajo actual se hace sobre el proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores mientras que

en el trabajo mencionado se hace sobre el proceso de producción de lavaplatos y desinfectantes líquidos.

2.1.4 BELISARIO, Y M, BLASCO. (2002). **Evaluación de la extracción de aceite esencial de albahaca mediante CO<sub>2</sub> supercrítico.** Sala de Cromatografía del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar la extracción del aceite esencial de albahaca utilizando CO<sub>2</sub> supercrítico, con la finalidad de establecer las mejores condiciones de operación en dicho proceso.

De los resultados obtenidos se concluye que se obtiene una alta extracción de cera del aceite mediante este método, arrojando por tanto un alto rendimiento y una incidencia significativa de ciertas variables de operación como; el número de ciclos, flujo de CO<sub>2</sub>, corte de la hoja, presión de operación y temperatura de la válvula micrométrica.

La semejanza entre ambos trabajos de investigación está en la metodología empleada ya que en el trabajo mencionado el método utilizado por los investigadores consiste en el análisis de las variables independientes y dependientes vinculadas al proceso a fin de establecer posteriormente un análisis factorial de las variables fundamentales que inciden fuertemente en el proceso de extracción, fijando además los niveles en los que se deben ubicar dichas variables. La diferencia entre ambos trabajos es que en el trabajo actual, la evaluación de las variables más influyentes es sobre un proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores mientras que el del trabajo mencionado es un proceso de extracción de aceites.

2.1.5 APONTE, Y. (2001). **Evaluación de catalizadores para el mejoramiento de la calidad de naftas de craqueo.** PDVSA – INTEVEP, Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar la potencialidad de catalizadores de hidroconversión de naftas, diseñados para producir gasolinas reformuladas con bajo contenido de azufre y aromático, a fin de emplearse en la producción de gasolinas altamente saturadas para alimentar el mercado de vehículos avanzados.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, el autor concluye que los catalizadores monometálicos Pd-Pt, presentaron más altas actividades en la reacción de hidrogenación de benceno, además son los que permiten maximizar la eficiencia del sistema de producción de las naftas de craqueo hidrotratadas y no hidrotratadas.

La similitud del trabajo mencionado con la investigación actual radica principalmente en que ambas investigaciones realizan la evaluación de catalizadores para el mejoramiento del proceso productivo, con la diferencia de que en el trabajo mencionado se lleva a cabo en un proceso de craqueo, mientras que en el trabajo actual se realiza en un proceso de cromado.

2.1.6 JÍMENEZ, H. (1999). **Disminución del tiempo de atemperamiento de las láminas litografiadas en el proceso de elaboración de tapas para la industria embotelladora.** Industrias Metalgráfica S.A., Universidad de Carabobo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en determinar la mejor combinación de variables, en el proceso de elaboración de tapas, que conduzcan a la disminución del tiempo de atemperamiento de las láminas litografiadas, asegurando la calidad de la tapa corona como producto final.

De los resultados obtenidos, se concluye que es posible disminuir el tiempo de atemperamiento de las láminas litografiadas en un 50 % mediante la fijación de los factores más influyentes sobre el proceso en sus niveles óptimos de respuesta y la realización de un estudio formal del proceso en general, utilizando herramientas estadísticas, como el análisis de varianza y la técnica de TAGUCHI, los factores más influyentes son; La hojalata, la siza y la interacción de ambas.

La similitud entre ambos trabajos de investigación está basada en la metodología empleada ya que en ellos, se seleccionan los factores más influyentes sobre el proceso, se estudia la influencia de estos individualmente y su interacción indicando los niveles óptimos en los que debe ubicarse cada factor con la finalidad de mejorar el proceso; esto se logra a través del diseño experimental factorial y técnica de TAGUCHI, así como también mediante el uso de herramientas estadísticas como el análisis de varianza. La diferencia entre ambos trabajos radica principalmente en que el proceso en estudio del trabajo mencionado es la elaboración de tapas para la industria embotelladora mientras que en el trabajo actual es un proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores.

## **2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

A continuación, se exponen las bases teóricas sobre las cuales se fundamenta la presente investigación.

### **2.2.1. Corrosión**

La corrosión se define como el deterioro de una superficie, evitarlo es imposible, pero llevándolo a un proceso de recubrimiento electrolítico, al menos se puede lograr con toda seguridad la inhibición del efecto corrosivo, retardando su velocidad.

**La corrosión es causada por los agentes corrosivos: humedad (aire húmedo), agua, rozamiento o fricciones, altas temperaturas, etc.**

**Cuando se va a recubrir electrolíticamente, se debe tener en cuenta el tipo de material (composición física o química cuando menos) antes de ser tratado, ya que no se debe recubrir al azar porque las propiedades diferentes de los materiales exigen tratamientos relativos o totalmente diferentes, claro, si es que se desea realizar trabajos muy serios y a la larga económicos <sup>[19]</sup>.**

### **2.2.2. Galvanotecnia**

La Galvanotecnia es un proceso electroquímico por el cual se deposita una capa fina de metal sobre una base generalmente metálica. Los objetos se galvanizan para evitar la corrosión, obtener una superficie dura o un acabado atractivo, y purificar o separar metales para su análisis cuantitativo. Los metales que se utilizan normalmente son: cadmio, cromo, cobre, oro, níquel, plata y estaño. Los accesorios cromados de automóvil, por ejemplo, son productos típicos de galvanotecnia.

Este proceso se conoce con el nombre de **galvanostegia**, cuando se recubre un metal con otro metal, generalmente de mayor valor agregado; tanto para su presentación, como para la protección, por decir niquelado, cromado, zincado, dorado o plateado, etc.

En el caso de que la pieza a recubrir sea no conductora o no metálica el proceso recibe el nombre de **Galvanoplastia** estos pueden ser de plásticos, cerámicos, yeso, fibra de vidrio, etc <sup>[19]</sup>.

### **2.2.3. Nociones sobre electrodeposición**

Los metales tienen una estructura ordenada, en la cual un núcleo central positivo y los electrones más cercanos se encuentran en posiciones más o menos fijas, en tanto que los electrones más alejados, más libres, se desplazan a través de todo el metal <sup>[1]</sup>.

En una electrodeposición el metal que se quiere depositar se encuentra disuelto en un baño de electro deposición y al aplicar una corriente continua por medio de un rectificador, los iones del metal se depositaran mediante una reacción catódica sobre la pieza a recubrir (cátodo) y sobre el ánodo se producirá la reacción anódica.

Los elementos básicos para electrodepositar un metal sobre una pieza constituyen un circuito eléctrico y se describen a continuación:

- La fuente que suministra corriente: el rectificador.
- La solución con agua y sales del metal a depositar: solución electrolítica.
- El recipiente que contiene la solución: la cuba.
- Las piezas sobre la cual se realizara el proceso: pieza, metal base o cátodo.
- Las conexiones que forman el circuito entre las partes.
- Un elemento conductor que cierra el circuito entre las partes: el ánodo.
- Un soporte para las piezas: gancheras o tambor rotatorio.

Cuando se suministre corriente a este circuito, se producirá el fenómeno conocido como electrolisis. En este ocurren dos reacciones simultáneas: una en el cátodo y otra en el ánodo<sup>[1]</sup>.

La reacción catódica principal también conocida como reacción de reducción, es la deposición del metal que se encontraba en la solución sobre la pieza. La reacción anódica principal ocurre sobre el ánodo y es conocida como reacción de oxidación. Hay procesos en los cuales se utilizan ánodos solubles como por ejemplo: ánodos de zinc, níquel, cobre y cadmio, y otros en los que se emplean ánodos insolubles, como es el caso del cromado, donde el ánodo es de plomo y es insoluble en los baños de cromado.

#### 2.2.4. Amortiguadores

Los amortiguadores son los encargados de mantener el contacto entre el neumático y el terreno ya sea para transmitir mejor la fuerza o para lograr un mejor frenado. También evitan que el sistema de suspensión quede oscilando luego de absorber un impacto<sup>[13]</sup>.

La suspensión tiene un cometido realmente importante en un vehículo, y es mantener lo más estable posible las masas suspendidas del mismo, absorbiendo todas las irregularidades del terreno, evitando así transmitir las al habitáculo; no sólo proporciona un confort de



**Figura 2.1**  
**Imagen de unos amortiguadores tipo convencional, Mcpherson de todoterreno de una empresa fabricante de amortiguadores.**

marcha, sino que además proporciona la adherencia al asfalto y evita las transferencias de pesos excesiva por inercia.

Una suspensión excesivamente blanda influye negativamente en la estabilidad del vehículo, en la frenada; en el desgaste de los neumáticos y una excesivamente dura influye en la adherencia y la tracción del mismo. Por ello, ambos factores deben combinarse para lograr la mayor eficacia.

Los diversos requerimientos a los que debe responder un vehículo determinan la clase de suspensiones que adoptará. No son las mismas necesidades las de un todoterreno que las de un superdeportivo, y esto se ve reflejado en sus sistemas de suspensiones.

En la actualidad, existen distintos sistemas de suspensión y de amortiguación. En este punto, se debe hacer la primera clasificación entre suspensiones delanteras y traseras, ya que ambas son diferentes. Dentro de cualquiera de las dos, hay también distintos tipos que pueden combinarse de varias formas.

Las delanteras son más complejas y hasta más sofisticadas que las traseras, dado que las primeras deben incorporar, además de su función específica, el sistema y la función de dirección del vehículo. Por lo tanto, requieren de articulaciones y de espacio para permitir el giro de las ruedas. Además, en la mayoría de los automóviles modernos, la tracción es delantera, por lo que la suspensión debe contemplar también las fuerzas de aceleración y desaceleración que el motor imprime sobre el conjunto.

Son dos los sistemas más usados en las suspensiones delanteras: el muy popular McPherson, de excelentes resultados en cuanto a tenida y confort; y el de parrillas superpuestas, más indicado para vehículos de transmisión trasera (deportivos) y de transmisión integral (todoterrenos)<sup>[20]</sup>.

#### **2.2.5. Ejes del amortiguador**

El cromo duro se deposita especialmente en piezas que deben soportar grandes esfuerzos mecánicos, y en general en lugares donde se requiera bastante precisión; como lo es el caso de los ejes de amortiguadores; Estos ejes sufren desgastes que pueden comprometer el funcionamiento del amortiguador. Por ello, se someten a un proceso de cromado electrolítico, que garantice resistencia al esfuerzo mecánico al cual se ven sometidos y le proporcione además propiedades anticorrosivas y permita

mejorar las características específicas tales como, durabilidad y efecto de roce, entre otros. Generalmente la capa de cromo depositada no es totalmente uniforme por lo cual se da espesor mayor del necesario y después se rectifican las piezas para conseguir las dimensiones y acabado adecuadas.



(a)



(b)

**Figura 2.2**

**Imágenes de los ejes de un amortiguador tipo convencional de 1/2" de diámetro en una empresa fabricante de amortiguadores. En la Fig (a) se aprecian los ejes antes de ser sometidos al proceso de cromado y en la Fig (b) luego de ser sometidos al proceso.**

#### 2.2.6. Descripción de los elementos básicos para la electrodeposición

**A continuación se describen cada uno de los elementos que forman parte en un proceso de electrodeposición.**

- **Rectificador:** La función del rectificador es la de proveer la corriente necesaria para el proceso. El rectificador toma la corriente alterna de la línea (monofásica o trifásica) modificando su onda de manera de asemejarla a la corriente continua (como la de una batería)<sup>[1]</sup>.
- **Cuba de trabajo:** En general es rectangular. El material de construcción de la misma requiere que sea resistente al tipo de baño a utilizar y a las condiciones de operación (temperatura, etc.). Son depósitos que contienen las soluciones galvánicas, las cuales son preparadas en las mismas, estas tinas pueden ser de: PVC, plástico, fibra de vidrio, hierro recubierto con fibra de vidrio, hierro esmaltado, etc., dependiendo mucho de la capacidad y del tipo de solución (ácido o base a contener)<sup>[1]</sup>.

- **Sistema de calentamiento y enfriamiento de las cubas:** En la actualidad, se dispone de los siguientes métodos:
  - Calentamiento mediante un quemador colocado debajo de la misma.
  - Calentamiento a través de calentadores eléctricos por inmersión.
  - Calentamiento o enfriamiento mediante serpentines.
  - Calentamiento o enfriamiento mediante circulación externa.
  
- **Solución electrolítica:** Aunque cada tipo de baño posee una formulación definida, la función de los diversos componentes siempre es idéntica<sup>[1]</sup>.
  
- **Electrodos Inertes:** Llamados también electrodos inatacables, estos solo sirven para transferir electrones a la solución o recibirlos de éste, comúnmente están constituidos por un conductor de platino, acero inoxidable, etc<sup>[1]</sup>.
  
- **Electrodos Reactivos:** Conocidos también como atacables, estos intervienen químicamente en el proceso. Están normalmente constituidos de un metal que se desprende de éste en forma de iones en la solución, o que se combina con los iones descargados procedentes de la solución<sup>[1]</sup>.
  
- **Ánodos:** Son planchas, barras o esferas metálicas que cierran el circuito. Podemos distinguir dos tipos de ánodos: solubles e insolubles<sup>[1]</sup>.
  - **Ánodos solubles:** son del mismo tipo de metal que se desea depositar. Entre los de este tipo, están los ánodos de zinc, níquel, cobre y cadmio, los cuales se disuelven por la reacción anódica y a veces se disuelven simultáneamente por ataque químico del mismo. Cuando se utilizan estos ánodos es muy importante que los sean de máxima pureza, porque de lo contrario serían una fuente de contaminación permanente de los baños.
  - **Ánodos insolubles:** confeccionados de un material incapaz de disolverse en la solución electrolítica. Su función es sólo la de cerrar el circuito. Entre los de este tipo, podemos mencionar los ánodos de acero, acero inoxidable y plomo (este último se utiliza en la cuba de deposición de cromo).
  
- **Conexiones:** Son cables o barras de cobre o acero que conectan al rectificador con la cuba. Las barras anódicas se conectan al terminal positivo del rectificador y la barra catódica (a la cual se conectan las piezas) se conecta al terminal negativo<sup>[1]</sup>.

- **Gancheras:** Son dispositivos para colgar varias piezas similares simultáneamente. Se construyen de un material que es inerte a la solución de la cuba (generalmente acero o cobre) y deben revestirse en plástico para evitar que el metal en solución se deposite sobre ellas con el consiguiente perjuicio económico<sup>[1]</sup>.

### 2.2.7. Cromado Electrolítico

El cromo es un metal muy difícil de trabajar en frío porque es muy duro y quebradizo, en caliente es igual de difícil porque se oxida con una capa de óxido de cromo dura e infusible. Por estas razones, el cromo no se suele emplear como metal puro salvo en ocasiones muy raras aunque eso sí, entra a formar parte de muchas aleaciones. Especialmente es aleado con el hierro porque mejora su dureza y resistencia a la corrosión. El acero inoxidable contiene entre 8 a 12 % de cromo, y es el principal responsable de que sea inoxidable. Muchas herramientas están fabricadas con aleaciones de hierro cromo y vanadio. El *nicrom* o cromoniquel se emplea para fabricar resistencias eléctricas<sup>[10]</sup>.

Debido a las dificultades de la metalurgia de cromo cuando es necesario aplicarlo se emplean básicamente dos procedimientos, sputtering y recubrimiento electrolítico. El recubrimiento electrolítico con cromo es extensivamente usado en la industria para proteger metales de la corrosión y mejorar su aspecto. También, se emplea para restaurar piezas metálicas o conseguir superficies muy duraderas y con bajo coeficiente de rozamiento (cromo duro).

### 2.2.8. Electrodeposición de cromo duro

Aunque el cromo es un elemento relativamente no noble, cuando se efectúa un cromado, se forma inmediatamente una capa de óxidos, que le confiere al recubrimiento la propiedad de ser resistente al deterioro y a la corrosión. La resistencia a la corrosión se ve reforzada por el hecho de que los medios acuosos son repelidos por la superficie, debido a la baja humectabilidad del cromo<sup>[1]</sup>.

Al contrario del cromo obtenido metalúrgicamente, el cromo electrodepositado es frágil y duro. La estructura de los recubrimientos es en su mayor parte fisurada. Los depósitos de cromo duro tienen entre 30 fisuras/mm y 50 fisuras/mm. La dureza del recubrimiento obtenido es función de su estructura y por lo tanto de la formulación del baño y de las condiciones de electrodeposición. La estructura de grano fino es la que determina la alta dureza de los recubrimientos de cromo.

Los recubrimientos de cromo presentan un buen comportamiento ante el rozamiento. El coeficiente de rozamiento es bajo. Debido a la alta dureza, fisuración y buen comportamiento al rozamiento los depósitos de cromo resultan ser resistentes al desgaste, abrasión y al rayado. Las fisuras características de este tipo de depósitos le confiere al material buena resistencia al desgaste en aquellos usos en que se emplea lubricación, ya que proveen una acción humectante y facilitan la retención del lubricante. Tiene un buen poder de reflexión (65%) y no presenta deterioro en su aspecto incluso cuando son sometidos a temperaturas de hasta 500 °C.

El cromado duro difiere del cromado decorativo en que el cromo brillante o decorativo son finas capas de cromo que se depositan sobre cobre o níquel para mejorar el aspecto de algunos objetos; mientras que el recubrimiento obtenido en proceso de cromo duro es duro y de alta resistencia a la corrosión, por ello se utiliza para aplicaciones en las que se busca resistencia al desgaste y/o a la corrosión.

El cromo duro (salvo raras excepciones) se deposita directamente sobre el metal base, mientras que el cromado decorativo se deposita sobre capas intermedias de níquel o de cobre y níquel. El famoso niquelado de paragolpes y otros embellecedores de coche suele consistir en una capa de níquel terminada con un Flash de cromo de algunas micras de espesor. El color del cromo es mas azulado y reflectante que el níquel y es mucho más resistente a la corrosión ya que inmediatamente se forma una fina e imperceptible capa de oxido que protege al metal.

El cromo duro se deposita en un rango de espesores entre 2,5  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$ , y para ciertas aplicaciones en espesores aún mayores, mientras que el cromado decorativo rara vez excede de 1,3  $\mu\text{m}$ .

Sin embargo, El cromo tiene poco poder cubriente, menos aun si las capas que se depositan son tan finas como una micra. Por ello, las superficies a cubrir deben estar bien pulidas, brillantes y desengrasadas ya que el cromo no va a tapar ninguna imperfección.

Una superficie apta para cromar debe estar libre de: Grasas, aceite, pasta de pulido, Óxidos, Fisuras, poros, rayaduras, rechupes, impurezas, Tensiones en el metal, y fallas estructurales.

La rugosidad máxima de la superficie debe ser de 0,1 micrones, esto es, la superficie debe estar bien pulida.

El cromo duro se produce por electrodeposición desde una solución que contiene ácido crómico y un anión que actúa como catalizador en una proporción adecuada. Los tiempos de electrodeposición pueden ser desde algunos minutos hasta varias horas, pudiendo reducirse mediante el uso de electrolitos de alta eficiencia. Los metales base sobre los que se deposita cromo duro son acero, acero de alta resistencia, acero de herramientas, fundiciones de hierro, aleaciones de base níquel, cobre, latón y aluminio.

El límite de fatiga de un acero de alta resistencia puede reducirse en un 50% cuando el mismo está cromado, a causa de la estructura fisurada del recubrimiento de cromo. Sin embargo, con tratamientos de granallado con partículas esféricas y con tratamientos térmicos posteriores al cromado se puede recuperar la mayor parte de la resistencia a la fatiga original<sup>[1]</sup>.

Las materias primas o materiales a recubrir con cromo duro pueden ser: todo tipo de matrices, ejes hidráulicos, asientos de rodamientos, asientos de rodajes, gusanos extrusores, guía hilos, rodillos, cigüeñales, vástagos (de trenes de aterrizaje), pistones, árboles de levas, camisas de motores, soportes de aparato de óptica, malla de ladrilleros (minería), etc. todos con fines de darles mejor dureza<sup>[19]</sup>.

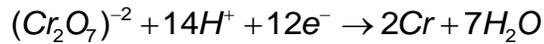
En la industria automotriz se emplea cromado en amortiguadores para proveer resistencia al desgaste.

#### **2.2.8.1. Reacciones Involucradas**

La electrodeposición de cromo es posible desde soluciones de cromo hexavalente (Cr VI) a soluciones de cromo trivalente (Cr III). El mecanismo de la electrodeposición hasta el presente no está muy claro. Según la literatura<sup>[1]</sup>, el cromo se encuentra en el electrolito como aniones complejos de compuestos de cromo con el número de oxidación seis, principalmente como complejos de dicromato. La deposición de cromo desde soluciones de ácido crómico solo no es posible, ya que aunque el ácido crómico es la fuente de metal (cromo), se requiere de la presencia de un catalizador, por lo general, ácidos; como sulfúrico, fluorhídrico, hexafluorsilícico o sus sales; para que se deposite cromo sobre el metal a recubrir.

- **Reacciones catódicas**

La reducción a cromo se lleva a cabo desde los aniones complejos a través de intermediarios como compuestos de cromo III y se puede expresar a través de la siguiente reacción global:



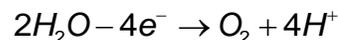
El potencial de electrodeposición de cromo desde electrolito de cromado cae en la zona de evolución de hidrógeno. Esto significa que se pueden producir ambas reacciones. Al menos la mitad de la energía se utiliza en la evolución de hidrógeno, según la reacción:



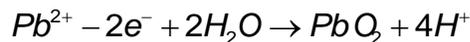
Es por ello que la eficiencia de la reacción es tan baja, entre 10 y 25% dependiendo del proceso y como excepción 40%.

- **Reacciones anódicas**

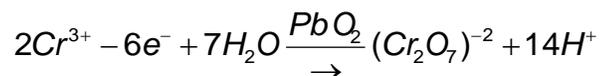
La reacción principal es la evolución de oxígeno:



Pero en la práctica es muy importante la formación de una capa marrón negruzca de dióxido de plomo sobre la superficie del ánodo que proviene de compuestos de plomo II que se encuentran en el baño:



Esta capa tiene un efecto catalítico sobre los iones Cr III formados en el cátodo, ya que provoca su oxidación a compuestos de Cr VI, como ácido crómico:



A través de estas reacciones se establece en el electrolito de cromado un equilibrio para la concentración de iones Cr III, en las condiciones de trabajo apropiadas.

### 2.2.9. Proceso de Cromado

**Las operaciones unitarias más comunes en un proceso de electrodeposición son:**

- Desengrase.
- Activación de superficie de pieza a recubrir (en el proceso de cromado duro sería el mordentado)
- Proceso de electrodeposición (por ejemplo: cromo duro)
- Enjuague.

### **2.2.9.1. Desengrase**

Una superficie adecuada para electrodeposición es aquella en la que las películas superficiales, no aptas para el depósito metálico, han sido reemplazadas por otras películas que facilitan dicho procesos<sup>[12]</sup>.

El tipo de suciedad presente en piezas metálicas se puede clasificar en seis grupos:

- Compuestos pigmentados de laminados.
- Aceites y grasas no pigmentadas.
- Fluidos de corte.
- Compuestos de pulido de desbaste y pulido de terminación.
- Cascarillas y óxidos.
- Otros.

Los diferentes medios de desengrase empleados corrientemente son la inmersión en solventes orgánicos, vapor de solventes orgánicos, inmersión en emulsión de hidrocarburo (puede ser kerosene) y agua (estos medios también contienen tensoactivo y agentes de unión para mantener estables las emulsiones), limpieza alcalina aplicada por inmersión y/o spray, limpieza electrolítica y limpieza por ultrasonido.

La selección del procedimiento de desengrase más adecuado depende fundamentalmente del metal a limpiar, de las características de las piezas, del tipo de suciedad a remover, del costo y de aspectos relacionados con seguridad y medio ambiente.

#### **❖ Desengrase alcalino por inmersión**

El desengrase se produce como el resultado de la inmersión de las piezas en un baño alcalino cuyos componentes remueven la mayor parte de las suciedades oleosas, y algunas de las suciedades sólidas. El rango de concentración de este tipo de limpiadores varía entre 60 y 120 g/L y el de temperatura entre 50 y 95 °C. Los nuevos limpiadores operan a concentraciones y temperaturas menores (concentraciones entre 15 y 45 g/L, temperaturas entre 20 y 40 °C)<sup>[12]</sup>.

El rango de pH se establece de acuerdo a la reactividad del metal a ser limpiado. Los limpiadores fuertemente alcalinos están formulados en base a álcali, silicato, fosfato, complejantes y tensoactivos, su rango de pH es de 10,5 a 13,0; son los limpiadores más potentes, pero su aplicación se limita al acero, ya que la mayor parte de los otros metales se atacan. Los limpiadores moderadamente alcalinos de pH 8 a 10 contienen fosfatos, boratos, carbonato, complejantes y tensoactivo. Son apropiados para la limpieza de zinc, aluminio, latón y otras aleaciones susceptibles de atacarse.

Los limpiadores actuales son concebidos de tal modo que se obtenga de ellos la máxima efectividad con la menor concentración y la menor temperatura posible y cuya formulación tenga en cuenta las exigencias ambientales. Actualmente se trata de evitar el uso de complejantes fuertes como el EDTA y a reemplazar los fosfatos por razones ambientales.

Los limpiadores alcalinos son difíciles de enjuagar. Se recomienda emplear doble enjuague, con agua caliente en el primero y con buena agitación o un fuerte enjuague en spray. El enjuague con agua caliente asegura una mayor eficiencia de enjuague, aunque a veces puede formarse una película de óxido. El contenido del producto limpiador en el agua de enjuague no debe ser superior al 3%.



**Figura 2.3**

**Cuba de desengrase químico donde son sumergidos los ejes antes del proceso de cromado en una empresa fabricante de amortiguadores.**

**El equipamiento de acero de baja aleación es adecuado. Las cubas deben tener un drenaje en el fondo, una cañería de rebalse para espumar, una trampa de grasa y una serpentina de calentamiento. Ciertos limpiadores requieren una bomba de circulación.**

#### ❖ **Desengrase electrolítico**

La electrolimpieza consiste en una limpieza con agitación provista por el movimiento ascendente de burbujas de hidrógeno u oxígeno formados por la descomposición del agua en la solución. Este desengrase es un medio efectivo para la eliminación de residuos de pulido. Los productos de limpieza utilizados son mezclas alcalinas para uso con corriente y deben poseer:

- *Alta conductividad eléctrica*, dada por el hidróxido de sodio (NaOH)
- *Acción humectante y emulsificante*, suministrada por tensoactivos no iónicos (de baja espuma) y de algunos iónicos surfactantes requeridos para aumentar la solubilidad de los no iónicos.
- *Acción defloculante*, para suspender las partículas sólidas removidas de las piezas. Los agentes no deben depositarse en el electrodo.

Los limpiadores electrolíticos se usan en concentraciones entre 60 y 120 g/L, temperatura entre 50 y 95°C y densidades de corriente de 5 a 15 A/dm<sup>2</sup>. El rango de voltaje normal es de 6 a 12 voltios.

Hay nuevas formulaciones que operan a concentraciones entre 45 y 75 g/L con un máximo de 90 g/L y temperaturas entre 45 y 75°C, con densidades de corriente de 3 a 8 A/dm<sup>2</sup>.

La operación puede ser anódica o catódica.

#### **2.2.9.2. Preparación de la superficie antes del cromado – mordentado**

En primer lugar las piezas (maquinadas) a cromar se someten a una operación de desengrase que puede ser por inmersión electrolítica o incluso manual, cuando el mecanizado anterior es suficientemente cuidadoso<sup>[12]</sup>.

Luego de un enjuague apropiado sigue la etapa de mordentado. Es necesario el ataque de la superficie de acero a cromar para lograr la máxima adherencia del depósito. Se prefiere el ataque anódico. Se puede hacer un ligero ataque por inmersión ácida para lograr superficies mejor terminadas pero a costa de lograr menor adherencia.

Los baños de mordentado son en principio electrolitos de cromo diluido. En general se trabaja con una concentración equivalente a la mitad de la del baño de cromado y con una temperatura igual a la de dicho baño. La densidad de corriente utilizada suele estar entre 20 y 30 A/dm<sup>2</sup>.

El estado de la superficie del metal base a cromar es decisivo para la calidad del recubrimiento obtenido. La presencia de microrugosidades en la superficie del metal base influye en la aparición de dendritas o nódulos en el depósito de cromo. La superficie del metal base debe ser lo más uniforme posible y de ser necesario se puede recurrir al electropulido.

### 2.2.9.3. Cromado

El baño de electrodeposición de cromo opera usualmente a una temperatura entre 55 y 60 °C y a una densidad de corriente de 50 A/dm<sup>2</sup>. En algunos casos, con desempeño óptimo y buena disposición de ánodos se puede alcanzar los 50 A/dm<sup>2</sup>. Cuando las piezas ingresan provenientes de la etapa de mordentado, la corriente debe elevarse hasta el valor de trabajo en un periodo máximo de 10 a 60 minutos. En estas condiciones el crecimiento de capa es de 0,6 µm/min en electrolitos convencionales de sulfato y de 1µm/min en electrolitos mixtos libres de fluoruro<sup>[12]</sup>.

#### ❖ Componentes del baño de cromado

##### ➤ Ácido crómico

**Los electrolitos de cromado trabajan con ánodos insolubles. Por lo tanto debe agregarse permanentemente ácido crómico. El contenido de ácido crómico se determina semicuantitativamente por densidad y cuantitativamente por titulación<sup>[1]</sup>.**

El ácido crómico se descompone por la corriente eléctrica en cromo metálico que se deposita en el cátodo y oxígeno que se desprende en el ánodo. El ácido crómico (en realidad es un anhídrido soluble en agua) contiene aproximadamente un 50% en cromo metálico.

Para conseguir un baño electrolítico de cromo se disuelve ácido crómico en agua en una proporción de 300 gramos por litro; Se emplea como ánodo un electrodo de plomo o grafito. El plomo sirve como ánodo porque se forma una placa de óxido de plomo que es conductor pero que impide que se siga corroyendo por oxidación anódica. Al contrario que en otros baños como los del níquel el cromo que se deposita en el cátodo procede del ácido crómico disuelto y no del ánodo, por lo que poco a poco se va empobreciendo en cromo la solución. Con el uso el cromo se va agotando y hay que reponerlo añadiendo más ácido crómico.

##### ➤ Sulfato-Catalizadores

El ácido crómico es la fuente de metal (cromo). Sin embargo, una solución de ácido crómico no depositará cromo a menos que se encuentre un catalizador. Si la concentración del catalizador es muy baja o muy alta el cromo no se depositará <sup>[1]</sup>.

Hay tres tipos de formulaciones de baños de cromado:

- Baño de sulfato convencional
- Baño de catalizadores mixtos
- Baño libre de fluoruro

**Para el proceso de cromo duro, son empleados los baños de sulfato y libre de fluoruro, siendo el baño de catalizadores mixtos no utilizado para tal fin; la razón es el ataque de las áreas de acero no cromadas en las zonas de baja densidad de corriente, con lo que se acelera la contaminación de las soluciones y disminuye su vida útil.**

#### **Baño de sulfato:**

La concentración de ácido crómico en estos baños tiene un rango de variación de 225 g/L a 275 g/L, y la relación  $\text{CrO}_3 : \text{SO}_4^{2-}$  debe mantenerse en el rango 75:1.

Un contenido de ácido sulfúrico demasiado bajo puede producir depósitos tipo arco iris en zonas de baja densidad de corriente y el rendimiento, además no es óptimo. El contenido de sulfato óptimo está alrededor del 1%, el rendimiento baja para concentraciones crecientes primero en forma lenta, luego más rápido y posteriormente la electrodeposición se detiene. Este comportamiento característico se mantiene para los otros ácidos. Un exceso de ácido sulfúrico se elimina agregando carbonato de bario (se produce la precipitación de sulfato de bario)<sup>[1]</sup>.

#### **Baño libre de fluoruro:**

Fue patentado en Alemania en el año 1984 y en poco tiempo se introdujo en el mercado. La formulación incluye ácido crómico, sulfato y un catalizador orgánico estable. Un electrolito típico contiene entre 250g/L – 300 g/L de ácido crómico y entre 1,1% - 1,5% de ácido sulfúrico. La dureza del depósito y la resistencia a la corrosión aumenta desde el baño convencional al baño libre de fluoruro<sup>[1]</sup>.

Los catalizadores sin sulfato que se conocen hoy se emplean fundamentalmente en combinación con el ácido sulfúrico. Ellos influyen en forma decisiva en las propiedades del electrolito y de los depósitos. Esta influencia está descrita en la literatura solo en forma incompleta por razones comerciales. En general estos catalizadores influyen de la siguiente manera en la electrodeposición de cromo:

- Aumento del rendimiento
- Deposición de cromo con dureza mayor
- Deposición de cromo con mayor resistencia al rozamiento, mejor nivelación, mejor penetración y mayor rango de trabajo.

- Los depósitos de cromo son más lisos, con menos tendencia al quemado y a la formación de dendritas.

### ➤ **Tensoactivos**

Los tensoactivos llamados también surfactantes o agentes de superficie activa, son especies químicas con una naturaleza o estructura polar - no polar, con tendencia a localizarse "convenientemente" en la interfase que se forma entre dos sustancias, formando una capa monomolecular adsorbida por la interfase. Las soluciones de tensoactivos resultan ser activas al colocarse en forma de capa monomolecular adsorbida en la superficie entre las fases hidrofílicas e hidrofóbicas. Esta ubicación "impide" el tráfico de moléculas que van de la superficie al interior de líquido en busca de un estado de menor energía, disminuyendo así, el fenómeno de tensión superficial; que se define como el trabajo necesario para aumentar, a temperatura constante y de modo reversible, el área de una superficie en una unidad (1)<sup>[13]</sup>.

Las propiedades generales y comportamiento de los agentes tensoactivos se deben al carácter dual de sus moléculas (grupo hidrófilo y lipófilo); es así como el antagonismo entre estas dos secciones de su molécula y el equilibrio entre ellas, es la que da al compuesto sus propiedades activas de superficie.

El grupo hidrófilo ejerce un efecto solubilizante y tiende a llevar a la molécula a disolución completa. El grupo hidrófobo, en cambio, debido a su insolubilidad tiende a contrarrestar la tendencia del otro. Sí se logra el equilibrio adecuado entre los dos grupos se ve que la sustancia no se disuelve por completo, ni queda sin disolver del todo, concentrándose en la interfase con sus moléculas orientadas de tal forma que los grupos hidrófilos se orientan hacia la fase acuosa, mientras que los hidrófobos hacia la no acuosa o a la fase vapor <sup>[13]</sup>.

Los grupos hidrófilos pueden estar cargados eléctricamente, debido a la presencia de un par de iones de carga opuesta, o presentar cargas residuales, positivas o negativas que ponen de manifiesto la presencia de un dipolar.

Los surfactantes o tensoactivos no-iónicos son aquellos que sin ionizarse, se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrófilos).

Los surfactantes no-iónicos tienen la ventaja de que son estables con la mayoría de los productos químicos en las concentraciones usuales de empleo. Al no ionizarse en agua, no forman sales con los iones metálicos y son igualmente efectivos en aguas blandas y duras.

Durante el cromado se produce un intenso desprendimiento de gases tanto en el ánodo como en el cátodo, haciendo necesario el uso de tensoactivos, por lo general no iónicos, con el fin de reducir la tensión superficial del electrolito de cromo ya que la explosión de las burbujas en la superficie del electrolito hace que se produzcan salpicaduras de éste y la niebla agresiva que se forma hace necesaria la ventilación porque perjudica la atmósfera del lugar de trabajo.

Mediante la utilización de tensoactivos, por ejemplo, tensoactivos con fluor resistentes al ácido crómico, se puede reducir la tensión superficial del electrolito de cromo desde 70 hasta 20 mN/m; por debajo de 30 mN/m no se forma niebla. Se sobreentiende que no deben utilizarse tensoactivos que perjudiquen al depósito, por ejemplo, por formación de poros. Se debe evitar el exceso de tensoactivo.

Debe tenerse en cuenta que este tensoactivo formara sobre la superficie del electrolito una pequeña capa de espuma. Estas capas de espuma impiden una correcta evaporación del agua, necesaria cuando se recupera electrolito. Es más, una mezcla de oxígeno e hidrógeno podría producir explosiones. Es por eso que hoy en día se utilizan tensoactivos que forman poca espuma.

La necesidad de ventilación disminuye por el uso de tensoactivos pero de ningún modo se evita.

### ➤ **Impurezas**

Se produce por incorporación de cobre, hierro o cromo trivalente. La conductividad de la solución disminuye y se requiere un mayor voltaje para lograr una densidad de corriente dada. El Cr (III) es el resultado de una relación ánodo/cátodo muy baja, una condición que siempre se da cuando se cromata el interior de cilindros. Un contenido de hierro de 10 g/L reduce la eficiencia de corriente catódica en un 30%. La contaminación por Fe y Cr (III) puede producir depósitos rugosos y dendritas. Los electrolitos de cromo recién preparados no contienen iones Cr (III). Después de la reducción de ácido crómico en el cátodo se forman compuestos de cromo trivalente y al

mismo tiempo se produce la oxidación de los compuestos de cromo trivalente en el ánodo, por lo que se establece una concentración de equilibrio de iones Cr (III). No se deben tolerar contenidos de iones Cr (III) superiores al 5% para el proceso de cromado duro<sup>[1]</sup>.

**El modo más usual de bajar el nivel de impurezas de un baño es por dilución, con corrección posterior de su contenido de ácido crómico y catalizadores.**

#### **2.2.9.4. Enjuague**

**El enjuague final se realiza con el fin de sacar los sólidos disueltos y las sales adheridas a la pieza, además de retirar el exceso de cromo. Para realizar un buen enjuague debe existir movimiento relativo turbulento y un adecuado periodo de contacto entre la pieza y el agua.**

**También debe haber agua suficiente durante el periodo de contacto para reducir la concentración de sales que son removidas de la superficie<sup>[1]</sup>.**

❖ Aspectos adicionales en enjuague:

**Tamaño de cuba de enjuague:** Siempre se debe tener la cuba de enjuague del mismo tamaño que las cubas de trabajo para que el enjuague sea más efectivo.

**Los humectantes ayudan al buen enjuague:** Dado que el buen enjuague requiere contacto íntimo entre la superficie de la pieza y el agua de enjuague, el uso de un agente humectante en el agua de enjuague ayuda al contacto íntimo y el desplazamiento de la película de líquido de concentración. Además, si se usa aire para la agitación de la cuba de enjuague, el agente humectante incrementará el número de burbujas de aire formado.

**Los enjuagues calientes y templados son más efectivos:** Las aguas de enjuague calientes son más efectivas en el enjuague que las aguas frías. Los enjuagues templados son importantes cuando ellos siguen a baños de limpieza y deposición que tienden a congelarse sobre las piezas.

#### **2.2.10. Equipos utilizados en el proceso de cromo duro**

A continuación se presentan los equipos generalmente utilizados en una planta de cromado.

- **Cubas**

Las cubas de trabajo son rectangulares, usualmente se emplea como material acero revestido con aleaciones de plomo, antimonio o estaño, ladrillos resistentes a ácido o recubrimientos plásticos como PVC con temperatura menor a  $66^{\circ}\text{C}$ <sup>[12]</sup>.

- **Agitadores**

Se puede emplear agitación por aire, evitando el ingreso de aceite proveniente de la bomba de aire, es preferible que el aire provenga de un soplador de baja presión, libre de aceite<sup>[12]</sup>.

- **Extractor de emanaciones**

Sobre la superficie del baño de cromado se forma una niebla de ácido crómico, toxica. La concentración máxima admisible para 8 horas diarias de exposición es de  $0,05 \text{ mg de niebla de } \text{CrO}_3/\text{m}^3 \text{ de aire}$ , según la legislación vigente. Debido a que la niebla es extremadamente toxica, es imprescindible contar con instalaciones apropiadas para su extracción.

La velocidad de ventilación mínima requerida es de  $60 \text{ m}^3/\text{min}$  por  $\text{m}^2$  de superficie de solución. Usualmente se usa una ventilación lateral en ambos lados de la cuba. Para un tanque de hasta 600 mm de ancho será suficiente con una ventilación en un lado, a menos que existan fuertes corrientes de aire en otro sentido. La velocidad del aire en la campana lateral debería ser como mínimo de  $600 \text{ m}/\text{min}$ <sup>[12]</sup>.



**Figura 2.4**

**Cuba de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores.**



**Figura 2.5**

**Extractor de emanaciones ubicado en una cuba de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores.**

Los conductos de ventilación deben contar con trampas de condensado para recoger el ácido crómico. El drenaje de estas trampas debería recogerse en un recipiente especial y de ahí volcarse a la cuba de cromado o bien descontaminarse.

El sistema debe incluir un limpiador de gases para eliminar la mayor parte de las emanaciones de ácido crómico antes de que el aire sea emitido a la atmósfera. El material de los conductos debe ser de acero al carbono pintado con una pintura resistente al ácido o PVC.

- **Gancheras**

- \* Deben estar diseñadas para sostener adecuadamente a las piezas sin que se caigan, en una posición que facilite la electrodeposición uniforme, con bajo arrastre<sup>[12]</sup>.

- \* Las piezas con salientes (zonas de alta densidad de corriente) se pueden disponer de modo que se apantallen unas a otras o utilizar “ladrones” de corriente para reducir la densidad de corriente en puntos salientes.

- \* El contacto eléctrico debe ser eficiente.

- \* Buen aislamiento de las gancheras con pintura resistente.



(a)



(b)

**Figura 2.6**

**Gancheras ubicadas en el proceso de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores. En la Fig (a) se puede apreciar la ganchera desde una vista frontal y en la Fig (b) la vista lateral.**

- **Conexiones**

Son barras de acero o cobre que conectan al rectificador con las cubas, Las barras anódicas se conectan al terminal positivo del rectificador y la barra catódica, a la cual se conectan las piezas, se conecta al terminal negativo<sup>[12]</sup>.



**Figura 2.7**  
**Conexiones de cobre ubicadas en el proceso de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores**

### 2.2.11. Control del proceso de cromado

Además de la composición, las variables principales que se deben controlar en la electrodeposición de cromo duro son: ánodos, densidad de corriente, temperatura<sup>[1]</sup>.

El proceso de cromado duro tiene rendimientos de 15 a 25%. El rendimiento puede aumentar en general con las siguientes acciones:

- Aumentar el contenido de catalizadores hasta el valor óptimo.
- Llevar la concentración de ácido crómico al óptimo, que se encuentra entre 250 y 300 g/L dependiendo del electrolito.
- Trabajar a mayor densidad de corriente.
- Trabajar a menor temperatura.

#### \* **Ánodos**

Los ánodos se fabrican en plomo o mejor en una aleación de plomo-antimonio. También se pueden realizar en grafito. Es conveniente aunque no imprescindible que el ánodo tenga al menos diez veces más superficie que la de la pieza a recubrir, Para el recubrimiento en cromo duro, cuanto más cerca este el ánodo del cátodo más uniforme es la distribución del cromo; por lo tanto, se recomienda que la distancia entre ánodo y cátodo sea de entre 2 y 3 cm. Un ánodo que este trabajando bien debe tener un color grisáceo de óxido de plomo. Si el ánodo tiene un color



**Figura 2.8**  
**Ánodos de plomo del proceso de cromado de una empresa fabricante de**

amarillento es que se ha formado una capa de cromato de plomo debido a que hay poca densidad de corriente. Conviene sacar los ánodos del electrolito cuando no este en operación<sup>[14]</sup>.

#### \* Corriente

Para la electrólisis del cromo es conveniente emplear corriente continua filtrada. No es conveniente emplear corriente rectificada de media onda sin filtrar ya que en los momentos en que la tensión es nula el ácido crómico ataca al cromo pasivandolo. Al pasivarse aumenta la resistencia eléctrica del cromo y se disminuye la adherencia de las capas subsiguientes. De igual manera no se deben dejar las piezas a cromar inmersas en el electrolito sin corriente y cuando se sumerjan por primera vez deberán llevar la corriente conectada<sup>[1]</sup>.

La eficiencia de corriente aumenta significativamente con densidad de corriente creciente y levemente con temperatura decreciente.

#### \* Voltaje

El voltaje esta determinado por la configuración de la cuba y los electrodos. Lo que hay que controlar es la intensidad. De cualquier manera el voltaje suele estar por debajo de los 7 voltios. El cromo duro y el cromo brillante son exactamente iguales, lo único que ocurre es que la capa de cromo duro suele ser mucho más gruesa y se aplican mayores intensidades para que este mayor espesor se consiga antes<sup>[1]</sup>.

Tanto la intensidad de corriente como el voltaje se provee a través de un rectificador que convierte la corriente alterna en corriente continua.



**Figura 2.9**  
**Rectificadores utilizados en el proceso de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores.**

#### \* Temperatura

Si se cuenta con potencia disponible es mejor trabajar a alta temperatura, porque la velocidad de electrodeposición aumenta con la temperatura.

El control de la temperatura debe mantenerse dentro de una variación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , de otro modo se vera afectado el espesor y calidad del deposito obtenido. Es muy conveniente efectuar un control automático de la temperatura<sup>[1]</sup>.

### **2.2.12. Control de calidad del electrodepósito de cromado duro**

La calidad de un recubrimiento está definida por su espesor, porosidad, adhesión, condiciones de servicio a las que será expuesto, etc<sup>[1]</sup>.

- **Medición de espesor**

El espesor de un recubrimiento metálico tiene una relación directa con propiedades tales como la resistencia a la corrosión o la resistencia al desgaste.

Existen diversos métodos de mediciones basados en diferentes normas, pero el más utilizado es el de medición con el uso de un **micrómetro**.

Si el espesor del metal se conoce con exactitud, la geometría es simple y la superficie no rugosa, puede utilizarse un micrómetro, especialmente para espesores gruesos como es el caso del cromo duro.

A menudo, cuando se requiere un espesor de recubrimiento grueso, el mismo no es uniforme, y en ese caso se le aplica un exceso de recubrimiento y se lleva a medida mediante mecanizado de terminaciones.

### **2.2.13. Catalizadores – Catalizador HEEF 25GS**

Un catalizador propiamente dicho es una sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos, y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma<sup>[15]</sup>.

De esta forma se dice que la reacción es "catalizada". Ejemplos de uso: reactores de producción de amoníaco, en donde se utilizan sustancias para acelerar y elevar el nivel de producción de  $\text{NH}_3$ , sin que las mismas intervengan en las uniones atómicas pero que si estén presentes en la mezcla. En este caso el catalizador es un líquido, pero puede ser sólido o gaseoso.

El catalizador HEEF 25 GS esta formulado para mantener la solución de cromado perfectamente balanceada en cuanto a sus requerimientos de ácido crómico y catalizador. Para asegurar que este equilibrio se mantenga, se deberán confirmar periódicamente la concentración en las cubas.

El catalizador soporta un total de 7,5 g/L de impurezas, dependiendo del espesor y calidad, como limite tolerable. Las impurezas cationicas pueden ser eliminadas por los métodos usuales de resinas de intercambio o electro-diálisis con membranas.

#### **2.2.14. Tensoactivador Fumetrol 108**

Actualmente, las emisiones hexavalentes del cromo de baños de galvanoplastia duros del cromo son controladas por la ventilación del lugar de trabajo, los ventiladores de la extracción, y el uso de un dispositivo del control de la contaminación atmosférica (APCD), que es típicamente un depurador de la niebla, en otras palabras, encargado de quitar el cromo de la corriente del aire del extractor<sup>[3]</sup>.

Los baños de galvanoplastia hexavalentes del cromo generan los gases (es decir, hidrógeno y oxígeno) en los electrodos, que se levantan y crean una niebla del ácido crómico mientras que estallan en la superficie. Un tensoactivo disminuye la tensión de superficie de un baño de la galvanoplastia, reduce el tamaño de las burbujas y disminuye su impacto mientras que él se escapa en la superficie. Por consiguiente, las emisiones del cromo hexavalente y la exposición del trabajador se reducen grandemente. Fumetrol® 108 es un producto único que reduce humos de baños duros de la galvanoplastia de cromo sin afectar los cocientes del catalizador o causar picaduras. Es de actuación rápida. Los humos se reducen inmediatamente después de la adición al baño. No tiene ningún efecto en el equilibrio y/o en el control del baño de la galvanoplastia y es compatible con las soluciones de sulfato y cromo de HEEF 25.

Fumetrol® 108 es relativamente soluble en agua y produce una espuma muy pequeña, haciéndola fácil de utilizar. Generando además la ventaja de que la exposición del trabajador a las emisiones hexavalentes del cromo se reduce una vez adicionado el tensoactivo. La calidad del aire es aproximadamente dos a cuatro veces mejor con la adición de Fumetrol® 108.

FUMETROL 108, es permanentemente estable, altamente efectivo para toda cuba de cromado. Esta provisto de un excelente balance entre la película que produce sobre

la superficie y la reducción de la tensión superficial para eliminar pérdidas al ambiente por evaporación de la solución crómica.

FUMETROL 108 disminuye la tensión superficial de 25 a 35 dinas/cm, sustancialmente.

FUMETROL 108 ofrece las siguientes ventajas cuando está presente en las cubas de cromado:

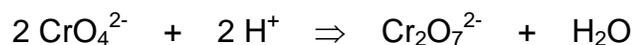
- Eliminación de la irradiación de gases de ácido crómico en el área de trabajo
- Decrecimiento en los costos de calentamiento por la reducción de la ventilación requerida sobre los tanques de cromado.
- Menos peligro de contaminación en las adyacencias donde esta ubicada la solución crómica
- Incremento en la vida útil de los equipos de ventilación y otros equipos cercanos al proceso de cromado.

Inicialmente se requiere de 1,0 a 1,5 galones de FUMETROL 108 por cada 1000 galones de la solución de cromo, es recomendado para activar la supresión efectiva de los vapores y la reducción de la tensión superficial.

### **2.2.15. Descontaminación de cromo**

Las cubas de mordentado y de cromo duro contienen trióxido de cromo ( $\text{CrO}_3$ ). El  $\text{CrO}_3$  en solución acuosa se encuentra como ácido crómico y funciona con valencia VI. El cromo hexavalente, como ya se ha mencionado anteriormente, es tóxico, por ello debe reducirse a cromo trivalente que es mucho menos tóxico<sup>[1]</sup>.

El ácido crómico o cromo hexavalente en solución acuosa forma el anión estable cromato,  $\text{CrO}_4^{2-}$ , que es de color amarillo. Este anión, en medio ácido se apropia de otra molécula de  $\text{CrO}_3$ , originando el anión dicromato,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , color naranja. Por consiguiente, la presencia de cromatos o dicromatos depende del pH del medio:



El cromo trivalente es de color verde, violeta o gris según el grado de hidratación o la clase de sal en que se encuentra disuelto.

Para la reducción del Cr (VI) a Cr (III) se usa el dióxido de azufre y sus sales, las sales ferrosas y el sulfuro de hierro. A continuación se detalla una de las técnicas empleadas en este proceso:

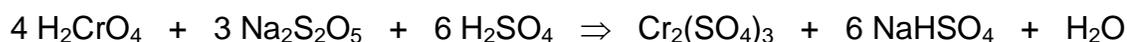
- **Reducción de cromato con metabisulfito**

El metabisulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) en solución acuosa forma un equilibrio con el ión disulfito:



La solubilidad del metabisulfito de sodio en agua a 20°C es de 54g / 100 mL.

El metabisulfito reduce al cromato en medio ácido, de la siguiente forma:



El sulfito [S(IV)] se oxida a sulfato [S(VI)]. La reacción consume ácido y es fuertemente dependiente de la temperatura y del pH. La velocidad de reacción aumenta a medida que disminuye el pH. Se debe mantener un pH entre 2 y 3. En esta reacción se producen emanaciones de gases de  $\text{SO}_2$  que son tóxicos y corrosivos.

En las empresas productoras de amortiguadores, es realizado este procedimiento para el tratamiento de efluentes que contienen cromo (VI); y para ello, se agrega a la solución a tratar, ácido clorhídrico al 10 o 20% para bajar el pH hasta que este se encuentre comprendido entre 2 y 3, agitando para que se mezcle bien, posteriormente, se agrega el metabisulfito de sodio agitando hasta que no se detecte cromo VI, esta prueba se realiza fácilmente con “kits” de reactivos comerciales que existen en el mercado; si el baño era amarillo se vera que cambia a color verde y luego azul. Luego se agrega soda cáustica hasta que el pH se encuentre entre 8,5 y 9, se deja reposar un día y finalmente se descarga el liquido sobrenadante y se recoge el barro del fondo. Este sedimento o barro se guarda para su disposición final. La reglamentación vigente exige que este efluente final debe tener una concentración de cromo hexavalente menor a 0,2 mg/L.

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

En el siguiente capítulo se plantean los pasos y procedimientos a seguir para lograr alcanzar los objetivos aquí planteados.

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación a realizar desde el punto de vista del diseño, es de tipo experimental ya que serán tomadas dos de las variables más influyentes, como lo son, la concentración de tensoactivo y catalizador en una cuba de cromado a escala piloto, las cuales serán manipuladas y analizadas a fin de determinar tanto la influencia que tienen éstas sobre el proceso como la interacción entre ellas. De acuerdo a la profundidad de la investigación, ésta es de tipo correlacional, ya que será analizada la relación entre las variables y se determinará la mejor correlación posible con el propósito de establecer las condiciones de operación óptimas que garanticen un nivel de calidad de cromado aceptable en el eje del amortiguador.

#### **3.2. PASOS METODOLÓGICOS**

Para el logro de los objetivos propuestos, se presenta a continuación una serie evaluativa de pasos que describen la metodología a emplear.

##### **3.2.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN TÍPICAS DE UN PROCESO DE CROMADO**

Se realiza una inducción y conducción en el proceso para conocer las etapas de producción, las variables y parámetros involucrados, las principales líneas de producción y la metodología de medición allí aplicada.

###### **3.2.1.1. Reconocimiento del proceso de cromado de los ejes de amortiguadores**

Se realizan visitas continuas y guiadas a la línea de cromado, entrevistas y preguntas con el personal que allí opera, además de revisión de manuales y cronogramas de planificación para lograr conocer ampliamente el proceso de cromado.

###### **3.2.1.2. Compresión detallada del proceso de cromado de los ejes de amortiguadores**

Se realiza una investigación teórica detallada del principio en el cual se basa la electrodeposición, específicamente del cromo duro, que aunados a las visitas dirigidas permite conocer el funcionamiento del proceso de cromado y de esta forma alcanzar una mayor comprensión sobre los fenómenos y procesos que allí ocurren.

### **3.2.1.3. Identificación de variables en la etapa de cromado**

Se procede a revisar los manuales, cronogramas y guías de funcionamiento del proceso para lograr identificar las variables que intervienen en el mismo y cuales de ellas son controladas o no.

### **3.2.1.4. Recolección de las variables medidas del proceso de cromado**

Se realizan la recolección de las variables medidas involucradas en el proceso de cromado mediante el uso de aparatos y equipos de sistema de control instalados en la línea del proceso de producción.

## **3.2.2. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN TÍPICAS DE UN PROCESO DE CROMADO**

Se realiza un análisis de las variables involucradas en el proceso a través de la aplicación de un diagrama causa-efecto.

### **3.2.2.1. Identificación de todas las posibles variables que afectan el proceso de cromado**

Mediante la revisión de los manuales, cronogramas y guías del funcionamiento del proceso, así como las visitas continuas a la línea de cromado, se puede verificar las variables que afectan el proceso.

### **3.2.2.2. Desarrollo del diagrama causa-efecto**

Una vez que han sido identificadas todas las posibles variables que intervienen en el proceso se procede a realizar el diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

A través de dicha herramienta se conocen las causas raíz del problema o situaciones que provoquen descontrol y/o fallas en los parámetros del proceso de cromado.

El diagrama causa efecto o diagrama de Ishikawa consta de seis categorías: método, medición, medio ambiente, mano de obra, maquinaria y materiales.

A continuación se describen cada una de las categorías antes mencionadas:

**Método:** Aquí se incluye los métodos o procedimientos ejecutados por los operarios en las distintas etapas llevadas a cabo en el proceso

**Medición:** En esta categoría se incluye la medición de las variables controladas para llevar a cabo el proceso, los análisis físico-químicos realizados a la materia prima y características de calidad del producto final.

**Medio ambiente:** En esta categoría se considera el análisis de las variables que influyen en el medio de trabajo o el efecto que genera el proceso en sí en el medio ambiente.

**Mano de obra:** Se incluye en esta categoría la experiencia y entrenamiento con la que cuenta el personal, turnos de trabajo en los que se labora y el tipo de personal de fabricación que se encarga de poner en funcionamiento los equipos con los parámetros involucrados en especificaciones.

**Maquinaria:** Se incluye los factores relacionados con los equipos existentes en el área de producción.

**Materiales:** En esta categoría se toman los factores relacionados con la materia y reactivos relacionados directamente con el proceso de cromado de los ejes.

#### **3.2.2.3. Análisis cualitativo de cada una de las variables**

Una vez realizado el diagrama de causa-efecto o diagrama de Ishikawa se analizan cada una de las variables detectadas como causantes de las imperfecciones o fallas en la calidad, apariencia y deposición del cromo duro en el eje de acero.

#### **3.2.2.4. Selección de las variables críticas más influyentes**

Una vez realizado el análisis cualitativo se determinan aquellas causas que afecten en mayor grado al proceso para estudiarlas y analizarlas a fin de establecer la mejor y más efectiva solución al problema en estudio.

### **3.2.3. DETERMINACIÓN DE EL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL TENSOACTIVADOR Y CATALIZADOR EN EL PROCESO DE CROMADO**

Se realiza el diseño del experimento para lograr conocer los niveles de experimentación a ser aplicados y conocer así la correlación óptima a ser usada en un diseño factorial.

### **3.2.3.1. Planificación del experimento**

La planificación del experimento se lleva a cabo mediante la selección de los factores a estudiar y el establecimiento de la función respuesta que se analizará.

- Selección de las variables independientes (factores)

Una vez son conocidas las variables independientes del proceso a través del diagrama de Ishikawa analizado, se procede a establecer los factores que van a ser estudiados en el diseño factorial.

Los factores se pueden elegir libremente con la finalidad de obtener la mejor respuesta, las variables cuantitativas se pueden medir y variar de una forma progresiva, y las variables directas son identificables y cualitativas.

- Identificación de la función respuesta

Se plantea la función respuesta como el espesor de la capa de cromo en el eje ya que este es el parámetro indicativo de la calidad en el proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores.

### **3.2.3.2. Diseño del experimento**

El diseño experimental se lleva a cabo mediante el establecimiento de los niveles que se asignarán a cada factor, el arreglo matricial más adecuado y el número de tratamientos que generará la interacción de los distintos factores y sus niveles.

- Establecimiento de los niveles o valores de cada factor

Para garantizar un estudio robusto de los factores seleccionados en la planificación del experimento se escogerán niveles que sean capaces de cubrir el comportamiento de los baños dentro y fuera de la amplitud de los rangos sugeridos como estándar del proceso.

- Selección del arreglo matricial más adecuado al tipo de diseño factorial establecido

Se plantean según el número de factores, ya sean bifactorial, trifactorial o multifactorial, si se manipulan dos, tres o más factores respectivamente. También se considera según la forma en como se seleccionen los niveles de los factores, se clasifican así, en diseño de efecto fijo; si los niveles de los factores son seleccionados a juicio del investigador, diseños de efectos al azar; si los niveles son seleccionados al azar de una población de niveles y diseños de efectos mixtos; que son compuestos por los dos anteriores

- Establecimiento del número de tratamientos

Se plantean de acuerdo al número de combinaciones de niveles por cada factor.

### **3.2.3.3. Conducción del experimento**

La conducción del experimento se lleva a cabo a través de la determinación de la muestra y el tratamiento que se le dará a esta durante la experimentación.

- Determinación de la muestra

Se define la unidad de análisis y cuales serán las características de la población. La muestra es en esencia, un subgrupo de la población en estudio y se determina como una muestra de tipo no probabilística ya que el proceso de selección del mismo es un poco informal y arbitraria.

- Diseño del instrumento de recolección de datos

Se determina buscando reunir los dos requisitos esenciales: confiabilidad y validez. La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto, produce iguales resultados. La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir.

Al ser utilizado un diseño factorial se planteara el instrumento a través de un arreglo matricial que depende directamente del numero de factores planteados y a su vez del tipo de función respuesta a ser utilizado en la experimentación.

- Descripción del método operacional y plan de muestreo

Se plantea a través del análisis de los manuales y procedimientos usados por los operarios en la línea de producción de ejes de acero cromados, a fin de obtener el método operacional a ser aplicado teniendo en cuenta que debe recrear lo más semejante posible al proceso original o industrial.

A continuación se presenta el método operacional aplicado:

### **MÉTODO OPERACIONAL EMPLEADO PARA LA REALIZACIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**

1. Preparar la solución para una concentración  $C_1 = 210$  g/L y  $T_1 = 0$  mL

Para esto:

- Agregar a la cuba 1239,0 g de Cromo y adicionar agua hasta completar 5,9 L de solución.
- Agitar.

2. Titular para comprobar la concentración de cromo en la solución. (Ver apéndice C)

3. Medir el diámetro del eje 1 en 3 puntos. ( $D_1$  Inicial)

4. Realizar la limpieza química y electrolítica del eje con un tiempo aproximado de 2 minutos cada uno.

5. Ensamblar el eje a la estructura de la cuba.

6. Conectar la salida positiva (+) a los ánodos y la negativa (-) al eje.

7. Fijar en el controlador la temperatura de 65°C.

8. Esperar a que el baño alcance la temperatura de 65°C.

9. Realizar la activación de la superficie del eje a ser cromada

Para esto:

- Colocar la intensidad de corriente en 1 Amp por un minuto.
- Aumentar cada minuto en 1 amp hasta llegar a los 6 Amp.

10. Cromar por 64 minutos.

11. Medir el diámetro en 3 puntos a los 64 min ( $D_1$  Final).

12. Preparar la solución a  $T_2 = 0,8$  mL; es decir, agregar tensoactivo.

13. Repetir los pasos del 2 al 11 con el eje 2.

14. Preparar la solución a  $T_3 = 1,5$  mL, es decir, agregar tensoactivo.

15. Repetir los pasos del 2 al 11 con el eje 3.

16. Preparar la solución a  $T_4 = 2,3$  mL, es decir, agregar tensoactivo.

17. Repetir los pasos del 2 al 11 con el eje 4.

18. Preparar la solución a  $T_5 = 3,0$  mL, es decir, agregar tensoactivo.

19. Repetir los pasos del 2 al 11 con el eje 5.

20. Vaciar el contenido de la cuba.

21. Preparar la solución para una concentración  $C_2 = 225$  g/L y  $T_1 = 0$  mL.

Para esto:

- Agregar a la cuba 1327,5 g Cr y adicionar agua hasta completar 5,9 L de solución.
- Agitar.

22. Repetir los pasos del 2 al 20.

23. Preparar la solución para una concentración  $C_3 = 240$  g/L y  $T_1 = 0$  mL.

Para esto:

- Agregar a la cuba 1416,0 g Cr y adicionar agua hasta completar 5,9 L de solución.
- Agitar.

24. Repetir los pasos del 2 al 20.

25. Preparar la solución para una concentración  $C_4 = 255$  g/L y  $T_1 = 0$  mL.

Para esto:

- Agregar a la cuba 1504,5 g Cr y adicionar agua hasta completar 5,9 L de solución
- Agitar

26. Repetir los pasos del 2 al 20.

27. Preparar la solución para una concentración  $C_5 = 270$  g/L y  $T_1 = 0$  mL.

Para esto:

- Agregar a la cuba 1593,0 g Cr y adicionar agua hasta completar 5,9 L de solución
- Agitar

28. Repetir los pasos del 2 al 20.

- Realización de las corridas preliminares

Se realiza el cromado de los ejes a escala piloto variando los niveles de concentración del catalizador y del tensoactivo, al mismo tiempo que se controlan las variables del proceso que se mantienen fijas durante el mismo o que serán consideradas como constantes de la experimentación.

- Toma de datos

Se realiza la toma de datos durante las corridas preliminares o a escala piloto a través del uso del instrumento de recolección de datos diseñado previamente.

- Realización del análisis lógico

Se analiza el valor obtenido de la función respuesta (espesor de la capa de cromo) aplicando el concepto de la medida de tendencia central. La cual consta de puntos de una distribución, los valores medidos o centrales de ésta y nos ayudan a ubicarla dentro de la escala de medición.

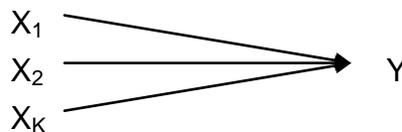
Adicionalmente, se determina la variabilidad de los datos, las medidas de variabilidad indican la dispersión de los datos en la escala de medición, responden a la pregunta: ¿en dónde están diseminadas las puntuaciones o valores obtenidos?. Las medidas de tendencia central son valores en un distribución y las medidas de

variabilidad son intervalos, designan distancia o un número de unidades en la escala de medición.

Cabe destacar que al describir los datos, se interpretan las medidas de tendencia central y la variabilidad en conjunto, no aisladamente.

- Realización del análisis de la varianza

Se aplica el ANOVA (Análisis de Varianza en K-direcciones), el cual es un método estadístico utilizado en la interpretación de los datos experimentales y en la toma de decisiones. En otras palabras, es una prueba estadística para evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.



Constituye una extensión del análisis de varianza unidireccional, solamente que incluye más de una variable independiente. Evalúa los efectos por separado de cada variable independiente y los efectos conjuntos de dos o más variables independientes.

El ANOVA es una herramienta de decisión basada en la estadística para detectar la variabilidad en la respuesta promedio de un grupo de experimento realizado, adicionalmente, permite determinar de manera cuantitativa cuales factores o interacciones contribuye en mayor proporción a esa respuesta promedio permitiendo además, la determinación de los niveles óptimos de estas y así obtener el valor de la respuesta para esta condición.

- Determinación de las fuentes de error

Se realiza a través de los análisis antes mencionados, verificando los datos obtenidos y determinando en que punto éstos varían aun más del valor medio o valor tomado como real, para de esta forma tomar el conjunto de factores presentes durante la obtención de dicho valor y deducir los errores cometidos en ese punto.

- Determinación del factor F

Se realiza el análisis de la varianza unidireccional el cual produce un valor conocido como "F" o razón "F", que se basa en una distribución muestral, conocida como distribución "F", que es otro miembro de la distribución muestral. La razón "F" compara

las variaciones en las puntuaciones debida a dos diferentes fuentes: variaciones entre los grupos que se comparan y variaciones dentro de los grupos.

La formula del factor “Fo” queda representado por:

$$F_o = \frac{CM_{FACTOR}}{CM_R}$$

En donde;  $CM_{FACTOR}$  es la media cuadrática entre los grupos, implica un promedio de varianza elevada al cuadrado. La media cuadrática entre los grupos se obtiene calculando la media de los puntuaciones de todos los grupos (media total), después se obtiene la desviación de la media de cada grupo respecto a la media total y se eleva al cuadrado cada una de estas desviaciones, después se suman. Finalmente, se sopesa el número de individuos en cada grupo y la media cuadrática se obtiene en base a los grados de libertad intergrupales (no se calcula en base al número de puntuaciones). Además,  $CM_R$  es la media cuadrática dentro de los grupos. La media cuadrática dentro de los grupos se calcula obteniendo primero la desviación de cada puntuación respecto a la media de su grupo, posteriormente esta fuente de variación se suma y combina para obtener una medida de la varianza intergrupala para toda la data, tomando en cuenta los grados de libertad totales.

La formula de la media cuadrática es:

$$\text{Media cuadrática entre grupos} = \frac{SC}{Gl}$$

Donde; SC es la suma de cuadrados entre grupos y Gl representa los grados de libertad entre grupos.

*Los grados de libertad entre grupos = K-1 (donde K es el numero de grupos)*

- Identificación de los factores más influyentes

Una vez realizado el análisis de los datos se determina el factor más influyente de todos los arreglos planteados entre los niveles, teniendo en cuenta aquel cuyo valor obtenido este más cercano o más próximo al valor fijado para la función respuesta del diseño factorial.

Es decir, aquellos factores que arrojen un valor cercano al valor definido para la función respuesta, que en este caso es el espesor de la capa de cromo en la superficie del eje de acero.

### **3.2.4. ESPECIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE TENSOACTIVO Y CATALIZADOR MEDIANTE UN DISEÑO EXPERIMENTAL**

Se realiza la especificación de la correlación mas idónea de concentración de tensoactivo y catalizador que permita garantizar un óptimo proceso de cromado de ejes de acero.

#### **3.2.4.1. Definir la alternativa para los niveles de concentración estándar**

Una vez hayan sido identificados los factores más influyentes de la experimentación, se toma aquel cuya respuesta sea la más favorable para el proceso de cromado en estudio, teniendo en cuenta los aspectos más importantes como lo son el costo de los reactivos, calidad del cromado, entre otros parámetro de calidad previamente establecidos.

#### **3.2.4.2. Realización de la corrida de confirmación de la evaluación piloto**

Se realiza el cromado de una nueva pieza bajo las condiciones de operación de la alternativa seleccionada a fin de comprobar que dicha alternativa arroja en realidad los resultados que se pretenden alcanzar en cuanto a diámetro de deposición y calidad del cromado de las pieza.

### **3.2.5. DISEÑO DE UN MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA DE CROMADO A ESCALA PILOTO**

Se realiza el diseño de un manual de operación que permita conocer el funcionamiento del equipo así como la forma de operar el mismo.

#### **3.2.5.1. Establecimiento de las distintas condiciones de operación**

Se parte de las condiciones obtenidas de la experimentación a escala piloto fijando aquellas que generen una calidad de cromado optima, es decir, una apariencia de brillo y uniformidad en la superficie del eje, y que a su vez le garantice las características de resistencia a la corrosión y al abuso mecánico a los que son expuestos los ejes de acero una vez ensamblados en el amortiguador

#### **3.2.5.2. Establecimiento de los objetivos**

Se plantean los objetivos que se desean alcanzar o comprobar durante la realización de la experimentación, o aquellos nuevos objetivos que se busquen alcanzar con el uso del equipo en el laboratorio.

### 3.2.5.3. Realización del diagrama de flujo del proceso y del equipo

Se realizan los diagramas de flujo del proceso y del equipo a fin de lograr entender de forma visual la manera y modo de funcionamiento del mismo.

La cuba a escala piloto a utilizar se obtiene mediante el escalamiento desde un diseño industrial utilizado por las empresas encargadas de realizar el cromado de ejes de acero para amortiguadores hasta una cuba donde se realiza el cromado de una pieza a la vez, a fin de lograr manipular y analizar las variables que intervienen en el proceso.

Para ello, se diseña una cuba en la cual la primera consideración a tener en cuenta es la dimensión del ánodo a utilizar a escala piloto, el ánodo es una pieza cilíndrica de seis pulgadas de diámetro y cincuenta centímetros de longitud, el cual debe ser rectificadado con relación a las dimensiones del eje de acero que va a ser utilizado en la experimentación. En base a ello, el diámetro que debe poseer el ánodo a escala piloto es el doble del diámetro del eje de acero, es decir un diámetro de una (1) pulgada. La longitud del ánodo debe ser ligeramente mayor a la del eje, ya que debe cubrir la superficie del mismo, por ello se fijo como longitud del ánodo en 25 cm.



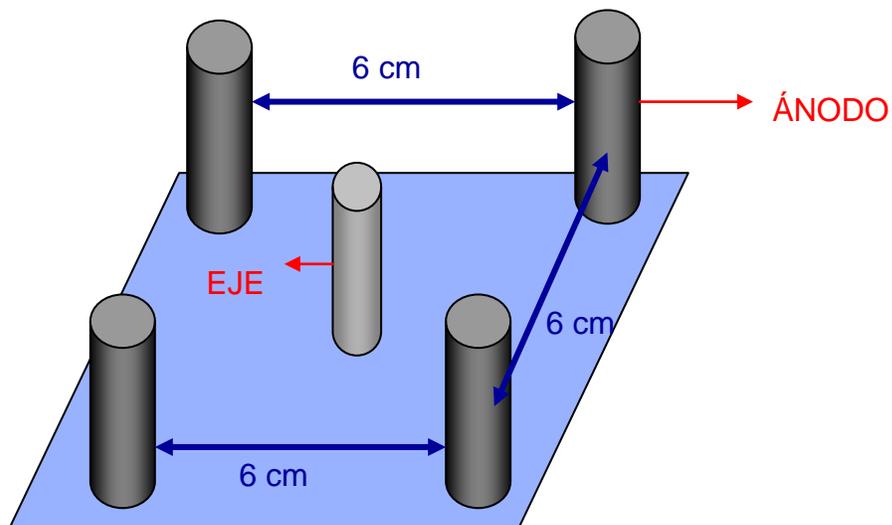
(a)

(b)

Figura 3.1

En la Fig (a) se observan los ánodos de plomo utilizados en el proceso con el eje en el centro y en la Fig (b) sin el eje en el centro.

La segunda consideración importante es la distancia que deben guardar los ánodos entre sí y a su vez la distancia mínima que deben tener con respecto al eje. Cada eje a ser cromado debe poseer cuatro (4) ánodos colocados en forma de cuadro, de manera que el campo electromagnético sea constante en toda el área de la pieza. La distancia mínima a ser colocados los ánodos se toma de los manuales que poseen las empresas encargadas del cromado de los ejes, en el cual se plantea una separación de seis (6) cm entre ánodos, ya que cada ánodo debe tener un área suficiente para hacer pasar la densidad de corriente requerida sin que ocurran recalentamientos, el eje es colocado en el centro del cuadro formado por los ánodos.



**Figura 3.2**  
**Distancia entre ánodos en una cuba a escala piloto**

La tercera consideración en el diseño de la cuba a escala piloto son las distancias que deben separar las paredes de todos los componentes del diseño final, para ello se analiza la separación que deben tener los ánodos con respecto a las paredes de la cuba a fin de evitar daños en las mismas y a su vez impedimentos para su fácil manipulación, la distancia entre las paredes de la cuba y los ánodos se planteo en un

(1) centímetro, entre el fondo de la cuba y los ánodos se fija en cinco (5) centímetros, además de considerar una distancia de precaución en el borde de la cuba de cinco (5) centímetros.

Es importante no olvidar que estas son distancias de seguridad para evitar daños o errores en la experimentación, pero también a su vez, es de suma importancia no exagerar dichas precauciones, ya que los materiales de construcción del modelo piloto poseen un costo elevado.

Tomando en cuenta estas medidas y consideraciones se plantean las dimensiones de la cuba a escala piloto como:

- Determinación del largo y ancho de la cuba

Distancia de separación entre pared y ánodo = 1 cm

Diámetro del ánodo = 2,5 cm (1")

Separación entre ánodos = 6 cm

Por lo tanto →  $LARGO = ANCHO = (1+2,5+6+2,5+1) \text{ cm} = 13 \text{ cm}$

Dicho valor fue llevado a una medida más manejable por el fabricante

$LARGO = ANCHO = 15 \text{ cm}$

- Determinación de la altura de la cuba

Distancia de precaución en el borde = 5cm

Longitud del ánodo = 25 cm

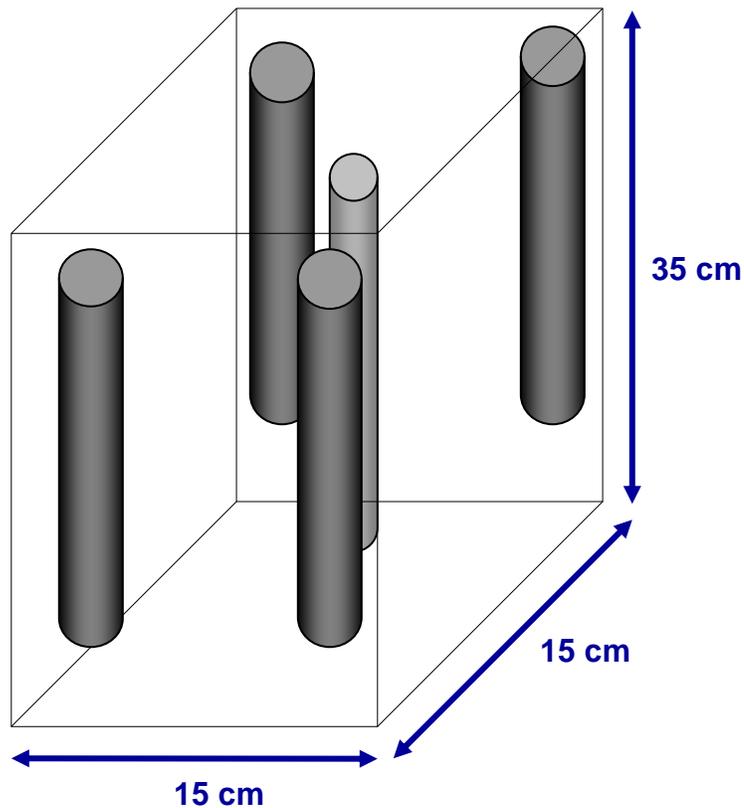
Separación entre el eje y el fondo de la cuba = 5 cm

Por lo tanto →  $ALTURA = (5+25+5) \text{ cm}$

$ALTURA = 35 \text{ cm}$

El material seleccionado para la construcción de la cuba se hizo en base a la resistencia del mismo a la corrosión del ácido crómico a una temperatura de 100°C (como medida de precaución, ya que el proceso de cromado se realiza a una temperatura de  $\pm 65^\circ\text{C}$ ), para ello se seleccionó una resina bifenólica con aditivos químicos para reforzar la composición de la misma, a fin de garantizar un tiempo de vida útil prolongado del equipo y evitar fracturas en la paredes de la cuba que puedan generar accidentes por intoxicación de los operarios del equipo. No se realizó la selección de un material metálico resistente al medio corrosivo (como lo es el acero al carbono con recubrimiento metálico) ya que al ser un estudio de electrodeposición donde intervienen los conceptos de corrosión, no puede existir la presencia de metales

ajenos al proceso, es decir el plomo, el cromo y el acero del eje son los únicos elementos metálicos que deberían estar involucrados en la experiencia práctica



**Figura 3.3**  
**Dimensiones de la cuba a escala piloto**

Es necesario la colocación de un controlador de temperatura a fin de lograr mantener la temperatura en  $\pm 65^{\circ}\text{C}$ , para lo cual se hace uso de una termocupla cuyo material sea resistente a la corrosión y que se encargue de realizar la medición de temperatura durante la experimentación, dicha termocupla registra la medición y la envía al controlador, el cual la compara con el valor fijado en el tablero, al recibir una medición menor o mayor a  $65^{\circ}\text{C}$ , envía la señal para encender o apagar la resistencia encargada de calentar la solución crómica contenida en la cuba.



**Figura 3.4**

**Vista frontal de la cuba a escala piloto con los ánodos sumergidos en la solución**



**Figura 3.5**

**Vista frontal de la cuba a escala piloto sin los ánodos**

#### 3.2.5.4. Realización del método operatorio

Se plantea a través de las experiencias y métodos ya aplicados en procesos similares a fin de garantizar un buen uso del equipo, que permita el funcionamiento óptimo del mismo, de manera de obtener datos confiables y en el tiempo establecido, haciendo uso de los conocimientos experimentales ya obtenidos luego de haber sido realizada la experiencia práctica

#### 3.2.5.5. Edición y publicación del manual de operación

Se edita y publica el manual con las condiciones de operación obtenidas y demás planteamientos generados, con los datos y resultados más importantes arrojados durante la realización de la experimentación con el fin de dejar una ayuda bibliográfica que sirva de apoyo en el uso del equipo diseñado durante la presente investigación.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante la realización de la investigación.

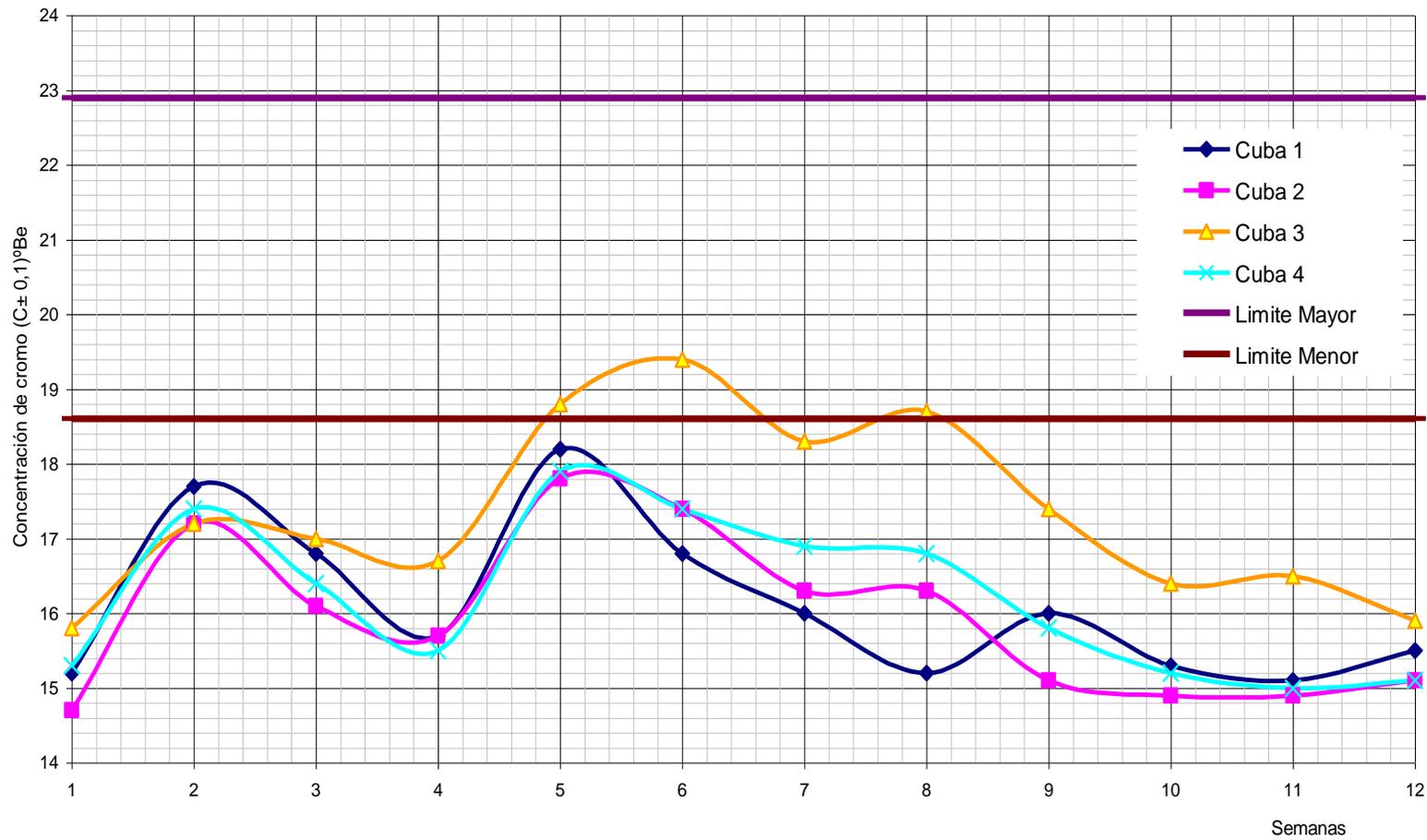
### 4.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN TÍPICAS DE UN PROCESO DE CROMADO

A continuación se presenta la identificación de aquellas variables que influyen de manera significativa en el proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores tomando como referencia datos y registros obtenidos de una empresa productora de amortiguadores.

Para lo cual, luego de la revisión de manuales, material bibliográfico, visitas guiadas a lo largo de una línea de producción, entrevistas con el personal involucrado en el proceso, observación directa y estudio de las actividades y procedimientos llevados a cabo por el personal que allí opera, se obtuvo que:

- La concentración de ácido crómico en las cubas, incluyendo el tanque de mordentado, es muy variable, en la mayoría de los casos se encuentra por debajo de la concentración establecida como parámetro en  $(18,6-22,9)^{\circ}\text{Be}$  o  $(240-260)\text{g/L}$  de cromo, tal como se muestra en la Figura 4.1, donde se puede observar como las cubas de cromado se encuentran por debajo de la concentración mínima del rango para llevar a cabo el proceso, lo cual ocasiona defectos en la calidad del cromado en la superficie del eje, tales como baja deposición de cromo a lo largo de la superficie y un cromado final opaco y/o rugoso; provocando así, pérdida del nivel de producción y tiempo.
- El uso del tensoactivo en las cubas se realiza de manera empírica y sin llevar a cabo ningún tipo de control sobre éste, ya que no se cuenta con un tensímetro (instrumento de medición de la tensión superficial), para lograr conocer el valor de esta variable y así controlarla. Este tipo de descontrol puede causar variaciones en el proceso ya que favorece la evaporación de la solución de cromado y crea un ambiente tóxico desfavorable para las personas que allí operan.

**Figura 4.1**  
**Gráfico de las condiciones de operación de un Proceso de Cromado de las Cubas de una empresa productora de amortiguadores**



- El control del catalizador se realiza con ayuda de agentes externos a las empresas que realizan el cromado de las piezas, teniendo que tomar muestras de las cubas y enviarlas a laboratorios fuera del país para que puedan medir la concentración del catalizador y entregar a la empresa las recomendaciones de dosificación necesarias a ser aplicadas en las cubas de acuerdo a los valores permisibles que garantizan la calidad del cromado, provocando a las empresas pérdidas de tiempo, materia prima y retrasos en la producción.
- La temperatura de las cubas se encuentra generalmente por encima del valor máximo permitido (Ver Apéndice D), dicho parámetro es establecido por la empresa proveedora de los químicos que intervienen en el proceso, indicando que la temperatura debe permanecer en  $\pm 65^{\circ}\text{C}$  a fin de evitar que se genere recalentamiento de los tanques y un deficiente cubrimiento de cromo en los ejes.
- Los valores de concentración en los tanques de desengrase químico y electrolítico se encuentra por lo general muy cercano al valor mínimo recomendado (Ver Apéndice D), ocasionando que los ejes presenten problemas en la limpieza, trasladando así grasas y residuos adheridos a ellos de procedimientos anteriores, al tanque de mordentado y posterior cromado.
- La concentración de sulfatos se encuentra dentro del rango establecido como requerido (Ver Apéndice D), siendo esta una de las pocas variables en control dentro del proceso, ello es importante ya que una elevada concentración de sulfatos podría generar deficiencias en la calidad del cromado de la pieza.
- La medición de los valores de temperatura y concentración de ácido crómico se realiza en cada una de las cubas diariamente mientras que la medición de los valores de concentración de sulfatos en cada tanque es semanalmente, al no realizar mediciones diarias de sulfatos no se tiene un real control sobre dicha variable, ya que podría aumentar en cualquier momento sin ser percibido por los encargados de la línea de cromado.
- Existen deficiencias de cromado en los ejes, tales como cromado opaco (sin brillo), espesor de cromo no uniforme a lo largo del eje y en algunos casos por debajo del

valor mínimo establecido como parámetro de calidad de  $14,5\mu$ , el cual es establecido de acuerdo a los requerimientos de diseño de la estructura final del amortiguador.

- La solución de cromado se prepara en un inicio con agua desionizada por recomendación del fabricante y con una sustancia en polvo llamada HEEF 25GS que contiene el cromo y el catalizador en un principio estándar para el arranque o la puesta en marcha de las cubas. A su vez la sustancia conocida como HEEF 25RS se usa para el mantenimiento periódico de las cubas, dicha sustancia contiene ácido crómico únicamente. La especificación de las sustancias no es conocida, la empresa proveedora de dichas sustancias se lo reserva como derecho de producción y distribución sobre el mismo.
- Se utilizan rectificadores de corriente con una capacidad de 5000 Amp generando una intensidad de corriente por debajo de la recomendada de 7000 Amp. La intensidad de corriente es importante ya que ella aporta la energía necesaria para llevar a cabo el proceso electrolítico de deposición del cromo duro.

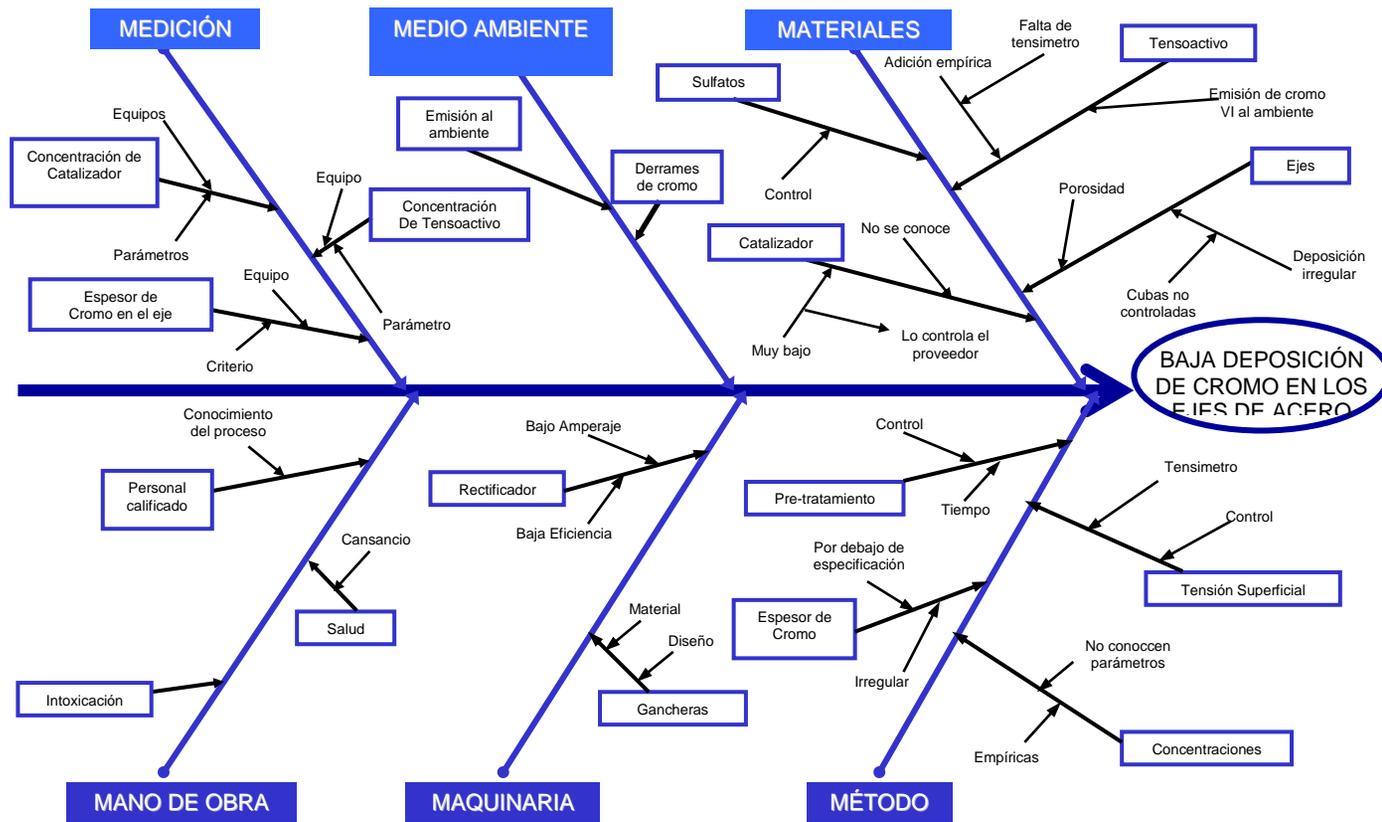
## **4.2. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN TÍPICAS DE UN PROCESO DE CROMADO**

A continuación se presenta el análisis de las variables identificadas como influyentes en el proceso de cromado de ejes de acero para amortiguadores, usando como base los datos obtenidos de una empresa productora de amortiguadores.

### **4.2.1. Identificación de todas las posibles variables que afectan al proceso de cromado**

Una vez realizada la revisión de los manuales de operación y visitas a lo largo de la línea de producción se lograron identificar las variables del proceso y cuales de ellas son controladas o no. En base a lo obtenido, se realiza el diagrama de Iskikawa o causa-efecto, como se observa en la Figura 4.2, con el fin de llevar a cabo el análisis detallado de las variables influyentes y como son manipuladas o controladas durante la puesta en marcha del proceso de cromado

**Figura 4.2**  
**Diagrama de Ishikawua del proceso de cromado de una empresa productora de amortiguadores**



A continuación, se realiza el análisis de las variables arrojadas por cada una de las categorías en el diagrama Causa-Efecto:

## ❖ MÉTODO

En esta categoría se plantean las variables que se relacionan a los métodos y procedimientos aplicados en el proceso de producción de los ejes de acero.

- *Tensión Superficial*

Esta variable no posee un sistema de control, es decir, existe un valor patrón que permite conocer si se encuentra fuera de especificación a la hora de realizar la medición el cual es de 30N/m, este es el valor máximo permitido, pero por otro lado cabe destacar que la mayoría de las empresas no cuentan con el instrumento adecuado para realizar dicha medición, siendo lo más recomendable el uso de un tensímetro.

Sin embargo, la tensión superficial es controlada a través del uso de un tensoactivo el cual es adicionado a las cubas de cromado a intervalos de tiempo irregulares y sin control sobre dicho procedimiento. La finalidad del tensoactivo es evitar la evaporación de la solución de cromado y las emisiones al ambiente debido a que el cromo es altamente tóxico. Adicionalmente al evitar la evaporación del líquido se impide el descontrol de otras variables que influyen en el cromado de los ejes.

- *Concentraciones*

Las concentraciones de los distintos componentes de la solución de cromado están especificadas por el proveedor, por lo cual existen mediciones que solo puede realizar la empresa proveedora de los reactivos.

Algunos de los valores específicos planteados por la empresa proveedora es la concentración del ácido crómico en las cubas, el cual debe mantenerse en un rango de (18,6-22,9)°Be o (240-260)g/L para garantizar la eficiencia en el proceso de cromado y minimizar el número de piezas defectuosas. Por su parte, la concentración de sulfatos se encuentra en un rango de (2,7-3,4)g/L, siendo la relación entre el ácido crómico y los sulfatos de 75:1, todo ello con la finalidad de garantizar un cromado de alta calidad.

Por otro lado, la concentración del catalizador es de suma importancia, ya que es él quien permite la activación efectiva del proceso como tal, pero el conocimiento de dicho

parámetro es reservado por la empresa proveedora y no es comunicado a sus clientes. Por lo tanto es necesario y obligatorio que sean ellos quienes realicen las mediciones del catalizador, lo cual provoca una pérdida de tiempo y una gran inversión para el envío de muestras a sus laboratorios y posterior aplicación de las recomendaciones de dosificación dada por ellos.

La adición del tensoactivo es de gran importancia debido a que evita la evaporación del líquido y las emisiones al ambiente, pero al ser realizado de forma empírica no se garantiza que cumpla con su función, provocando descontrol en las cubas de cromado y un alto grado de toxicidad en el ambiente, siendo perjudicial tanto para el personal que allí opera como para la comunidad aledaña a la zona de la empresa.

- *Espesor del cromado*

El espesor de la capa de cromo en la superficie del eje cambia dependiendo del tipo de pieza a ser cromado, existen seis (6) diferentes tipos de ejes, cada uno posee un rango específico de espesor de cromado que permite garantizar el tiempo de vida útil para el cual sea destinado y que a su vez se acople al resto de las piezas que conforman el amortiguador. Los ejes convencionales poseen un espesor promedio de 14,5 micras y para ejes de diámetro 20mm, 22mm y 25mm el espesor promedio es de 25 micras.

El espesor es controlado a través de un método estadístico; donde son tomados un número determinado de ejes, se les mide el diámetro de deposición y se aplica el concepto de la media de tendencia central, a fin de determinar si el lote de aproximadamente 60 ejes está en especificación. Un adecuado espesor de cromado garantiza al eje la resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico al cual son sometidos los amortiguadores una vez acoplados al vehículo.

Es importante establecer la influencia que posee la densidad de corriente sobre el espesor del cromado, ya que influye directamente en la velocidad de deposición del cromo en la superficie de la pieza a tratar, una baja densidad de corriente o por debajo del rango de 30–75 A/dm<sup>2</sup>, según lo establecido por especificaciones técnicas del proveedor de los productos químicos utilizados en el proceso, generaría un espesor de cromado por debajo de los parámetros de calidad implantados por la empresa

productora de amortiguadores, generando así piezas defectuosas o la pérdida total en el lote cromado.

El tiempo de cromado representa un parámetro de suma importancia, el operador debe conocer la velocidad de deposición aproximada del proceso para lograr un buen ajuste del tiempo que permita alcanzar el espesor de cromado especificado para los distintos ejes, debido a que al aplicar tiempos muy bajos o cortos se produce un diámetro de deposición por debajo de los valores requeridos según sea el tipo de eje que se desee cromar.

- *Temperatura*

La temperatura de los tanques de cromado debe mantenerse en un rango de (55-65) °C (según especificaciones del proveedor de los productos químicos del proceso), para obtener una buena calidad en la deposición del cromo, las variaciones por debajo del rango pueden generar depósitos de cromo deficientes en la superficie del eje, a su vez, un incremento por encima del rango genera depósitos quemados y opacos. Debido a la importancia del control de la temperatura, esta es medida directamente por los paneles de control que poseen cada una de las cubas que intervienen en el proceso de cromado, a fin de garantizar el mantenimiento de la temperatura por activación de las corrientes de agua fría o caliente según sea el caso, en base a ello se establece la temperatura como un parámetro fijo en el proceso y una variable controlada.

- *Pretratamientos*

Los pretratamientos a los cuales son sometidos los ejes antes de ser cromados constan de un enjuague químico, un enjuague electrolítico, un posterior enjuague y el mordentado. Estas etapas son importantes en el proceso de cromado debido a que la superficie del eje debe estar libre de cualquier impureza y debe ser activada antes de iniciar el proceso como tal.

El tiempo de aplicación de dichos tratamientos no depende del tipo de eje que se pretenda cromar, el mismo es independiente y permanece constante de eje a eje, los enjuagues aplicados efectúan la limpieza de forma rápida y efectiva, siendo innecesario una prolongada aplicación de los mismo y la realización de variaciones de tiempo de acuerdo al tipo de eje, por su parte el mordentado solo busca la activación de la

superficie a tratar, la activación consiste en preparar la superficie a ser cromada someténdola a una baja concentración de cromo con una baja intensidad de corriente por un tiempo muy corto, por ello no se realizan cambios de tiempo al variar el tipo de eje a ser cromado.

Los pretratamientos garantizan un proceso efectivo al preparar correctamente las superficies a ser sometidas al proceso de cromado, garantizando una correcta deposición del cromo en el eje y evitando la contaminación de las cubas de cromado, lo cual podría generar descontroles en la mismas, obteniendo depósitos opacos o no uniformes en la superficie tratada.

## ❖ MATERIALES

A continuación se hace referencia a las materias primas utilizadas en el proceso de cromado y el análisis de uso y control que se lleva sobre las mismas.

El catalizador es una de las materias primas más importantes del proceso de cromado, pero la composición del mismo es desconocida por la empresa productora de amortiguadores, debido al criterio de los proveedores del mismo, este producto posee una patente desconocida hasta los momentos, de igual forma los niveles a los cuales debe ser adicionado son desconocidos por el personal, impidiendo que sean controlados de manera interna en las empresas y siendo necesario recurrir a agentes externos los cuales generan costos muy altos y pérdidas de tiempo, ya que el proceso de determinación es sumamente protocolar y lleva mucho tiempo lograr estandarizar las concentraciones en las cubas de cromado, que garanticen un correcto funcionamiento del proceso electrolítico del cromo duro.

El tensoactivo es adicionado empíricamente a razón de 500mL cada vez que el personal lo considere necesario, teniendo en cuenta que los operarios, ya están acostumbrados al perceptible olor del cromo, no logran detectar a fidelidad cuando la evaporación es elevada, lo cual lleva a un descontrol en las cubas y a altas emanaciones de cromo al ambiente. Otro aspecto importante, es la falta de control, no se lleva un registro de la adición de tensoactivo en las cubas, por lo tanto no se logra determinar el momento exacto en el que sea necesario realizar la adición, teniendo como consecuencia, en algunos casos, que el tensoactivo se añada a razón de una o dos vez por cada dos día trabajado.

Los ejes están básicamente conformados por acero con cantidades muy pequeñas de aleaciones, este tipo de material no es resistente a la corrosión ni al abuso mecánico al cual serán sometidos una vez se incorporen a la estructura del amortiguador, siendo necesario mejorar sus propiedades físicas y químicas a través del tratamiento de cromado, para ello deben ser perfectamente pulidos y rectificadas con el fin evitar las porosidades en el eje, generando un depósito uniforme que permita la resistencia de toda la estructura por igual, sin dejar zonas donde pueda ser atacado fácilmente por el medio corrosivo.

#### ❖ MEDICIÓN

Las mediciones de las variables, consideradas fijas en el proceso, tales como la temperatura, intensidad de corriente y tiempo de cromado son medidas y controladas por los equipos especiales destinados para tal fin ubicados en un cuarto de control del proceso.

El resto de las mediciones tales como la concentración de sulfato por el método de Kocour y de cromo con el uso de un densímetro Baumé son realizadas con los procedimientos previamente fijados por los manuales de las empresas. Al igual que las mediciones de diámetro de deposición, dureza y rugosidad del eje una vez cromado, se realiza en la propia área donde se lleva a cabo el proceso.

Las mediciones de concentración de catalizador y tensoactivo son realizadas de manera empírica y por agentes externos a la empresa productora de amortiguadores, son tomadas muestras de las cubas de cromado y enviadas al exterior, a los laboratorios de la empresa que provee los productos químicos, ellos se encargan de determinar y enviar la respuesta de cómo deben ser controladas las concentraciones, generando elevados costos y grandes pérdidas de tiempo en la realización de dichas mediciones.

#### ❖ MEDIO AMBIENTE

En las cubas de cromado existen grandes cantidades de evaporación de la solución electrolítica debido a los problemas en el control del proceso, la dificultad de controlar la tensión de la superficie del líquido provoca grandes emanaciones de cromo al ambiente,

el cual es altamente tóxico y dañino para la salud tanto de los operarios de la línea de cromado como para las personas que se encuentran cercanas al proceso y la empresa. Adicionalmente, al producirse altas evaporaciones, el nivel del líquido disminuye siendo necesario la adición de agua a las cubas, esto se hace manualmente y sin la asignación de un encargado, por lo cual ocurren derrames del líquido, provocando la contaminación del área de cromado.

#### ❖ **MANO DE OBRA**

En esta categoría se ve reflejada la necesidad de la capacitación del personal ya que ellos desconocen la importancia del control de la concentración del catalizador y del tensoactivo en el proceso, adicionalmente no hacen uso del equipo de protección mientras se encuentran laborando en la zona de cromado y, al realizar las mediciones y controles de las cubas, sin tener por demás en cuenta y conocimiento, el alto grado de toxicidad del cromo en la sangre, el cromo es un agente cancerígeno y al entrar en el torrente sanguíneo es imposible realizar la desintoxicación de las personas.

Por otra parte, el ensamblaje de los ejes en las gancheras para ser cromados se hace manualmente produciendo lesiones en el personal que opera en la línea, además de un alto grado de cansancio en los operarios debido a que se encuentran de pie durante la duración del turno laboral de cada grupo.

#### ❖ **MAQUINARIA**

En esta categoría se trata todo lo referente a los equipos utilizados en la línea de cromado.

Los ánodos son estructuras cilíndricas de aproximadamente 25 cm de largo y 2 pulgadas de diámetro con una composición básicamente de plomo y aleación de 7% de estaño, son insolubles en la solución de cromado y actúan como el agente oxidante de la reacción electrolítica en las cubas. Los ánodos son pasivados a fin de evitar las reacciones que deben producirse en el proceso de electrodeposición.

Las gancheras son estructuras de acero con una capacidad de acoplar 60 ejes por vez permitiendo el cromado por lotes, poseen una estructura con rosca donde son instalados los ejes de forma manual y continua. Por ellas también pasa corriente eléctrica, la cual va a los ejes acoplados a ella con el fin de facilitar el proceso de deposición del cromo.

El rectificador es una fuente de poder que genera 5000 amperios y 6 voltios, este es de suma importancia para el proceso ya que genera la corriente eléctrica necesaria para iniciar la reacción de electrodeposición en las cubas. La capacidad del rectificador se ve afectada por pérdidas de corriente en el proceso por lo cual su capacidad, de 5000 Amperios, no es la mas apta, es decir, la cantidad de corriente aplicada al proceso esta por debajo de los requerimientos mínimos de 7000 Amperios generando así, problemas en el tiempo y calidad del cromado de los ejes.

#### **4.2.2. Selección de las variables críticas más influyentes**

A partir de análisis del diagrama de causa efecto o diagrama Ishikawa se obtiene que las variables críticas con mayor influencia en el proceso de cromado son las concentraciones del catalizador y del tensoactivo, debido a que son las que se presentan con mayor frecuencia como causas en las deficiencias de la calidad del cromado de los ejes de acero, siendo estas las variables que requieren de un estudio experimental a fin de plantear un método de control que garantice la calidad del cromado en la superficie del eje de acero para amortiguadores

La concentración del catalizador es una variable crítica desde el punto de vista de la eficiencia del proceso, una baja concentración del catalizador genera una baja deposición del cromo en el eje de acero, evitando así, que el mismo quede protegido contra los ambientes corrosivos y el abuso mecánico al cual son sometidos una vez son acoplados a la estructura del amortiguador.

De igual forma, la concentración del tensoactivo es una variable crítica desde el punto de vista de la eficiencia, pero a su vez influye en los factores ambientales que conlleva un proceso donde se ve involucrado el cromo como materia prima, siendo este un elemento toxico y perjudicial para la salud de quienes lo inhalan o consumen. El tensoactivo ayuda a evitar las emanaciones del cromo al ambiente y la evaporación del líquido electrolítico, lo cual genera alteraciones a las variables del proceso y daño al medio ambiente

Adicionalmente tanto desde el punto de vista productivo como ambiental son variables que deben ser controladas en el proceso para garantizar la calidad del

cromado, disminuir los problemas en la línea de producción y proporcionar un ambiente seguro y no tóxico para el personal que opera en la zona de cromado y alrededores.

### **4.3. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL TENSOACTIVADOR Y DEL CATALIZADOR EN EL PROCESO DE CROMADO**

A continuación se realiza la determinación del efecto de la concentración de las variables críticas seleccionadas a través del uso de un diseño de tipo bifactorial de tipo experimental.

#### **4.3.1. Planificación del experimento**

Se plantea la planificación del experimento fijando los factores que forman parte del diseño factorial planteado así como la identificación de la función respuesta que servirá posteriormente como indicativo para la selección de la mejor correlación arrojada por el estudio que garantice un proceso productivo efectivo y controlado

##### **4.3.1.1. Selección de las variables independientes (factores)**

La efectividad o confiabilidad del experimento recae fundamentalmente, en la selección de los factores que realmente permitan establecer la mejor correlación, que a su vez garantice la generación de una respuesta que asevere un proceso productivo eficiente y con el mínimo de fallas de calidad en el cromado de los ejes.

Por lo tanto, una vez seleccionadas las variables críticas más influyentes en el proceso de cromado, es decir, la concentración de tensoactivo y del catalizador, las mismas son establecidas como los factores o variables independientes del estudio realizado, debido a que en ellas recaen el mayor peso de las deficiencias en la calidad del cromado de los ejes y son las variables que deben ser analizadas para lograr la eliminación parcial o total de los problemas que existen en la línea de producción.

De esta manera, quedan establecidas la concentración de tensoactivo y de catalizador como los factores del experimento, ya que la correlación entre ellas permite el estudio de la función respuesta en base a los requerimientos de calidad preestablecidos por las empresas productoras de amortiguadores.

##### **4.3.1.2. Identificación de la función respuesta**

La función respuesta permite conocer si la correlación de concentración entre el tensoactivo y el catalizador planteada en la experimentación, es la mas adecuada o no, por ello es importante plantear una función que permita corroborar, si se ha alcanzado o no las condiciones de operación de la línea de cromado, que garanticen una alta confiabilidad de la deposición del cromo en la superficie del eje.

Por todo ello, la función respuesta más idónea para el análisis de las correlaciones establecidas será el espesor de deposición de la capa de cromo en la superficie del eje, ya que un espesor óptimo le proporciona al eje una vida útil prolongada protegiéndolo de los medios corrosivos a los que podría estar expuesto y a su vez le proporciona resistencia al esfuerzo mecánico, lo cual es de gran importancia, debido a que los ejes forman parte de la estructura final del amortiguador de los vehículos, siendo imperante que ellos resistan las diferentes situaciones que pueden presentarse durante el tiempo de vida útil que garantizan las empresas.

#### **4.3.2. Diseño del experimento**

El diseño del experimento se lleva acabo estableciendo los niveles que serán fijados a cada factor a fin de garantizar un amplio estudio del proceso, así como la determinación del arreglo matricial a utilizar y el número de tratamientos a aplicar en la experimentación

##### **4.3.2.1. Establecimiento de los niveles o valores de cada factor**

Los niveles o valores aplicados a cada factor deben ser establecidos de tal forma que garanticen el recorrido por el rango o valores parámetros planteados en el proceso. En base a ello, se plantean cinco (5) niveles para cada factor, cuyos valores son establecidos desde el valor máximo del rango base en el caso de la concentración del catalizador, o partiendo del valor parámetro establecido en el proceso, para la concentración del tensoactivo, de esta forma se garantiza un estudio robusto del proceso de cromado en estudio.

En el caso de los niveles establecidos para la concentración del catalizador el rango base del proceso está entre (230-270)g/L, según especificaciones del proveedor del mismo, en base a ello se plantea como primer valor del factor en 270 g/L, según especificaciones una concentración por encima de dicho valor podría generar un deposito de cromo irregular en la superficie del eje. Para el establecimiento del resto de

los valores se toma un intervalo de 15g/L entre los niveles del factor hasta la concentración de 210g/L.

Además, para el establecimiento de dichos valores de concentración del catalizador, se hace necesario realizar el cálculo de las masas requeridas, (ver Apéndice A), para lograr obtener cada una de las concentraciones planteadas. (Ver tabla4.1).

**Tabla 4.1**  
**Masas requeridas para cada concentración de catalizador**

Parámetros	Concentración de Catalizador (C ±0,1)g/L				
	210	225	240	255	270
Masa Requerida (m ± 0,1)g	1239,0	1327,5	1416,0	1504,5	1593,0

Volumen de la cuba = 5,9 L

Por otro lado, la adición del tensoactivo se realiza siguiendo como valor parámetro 500 mL del FUMETROL en un volumen de 2300 L, el cual es el volumen de la cuba a nivel industrial, partiendo de ello y considerando la experimentación a escala piloto con un volumen de 5,9L de la cuba piloto se fija como valor mayor 3,0mL variando en 0,7 o 0,8mL hasta llegar a un nivel de 0mL de concentración.

#### 4.3.2.2. Selección del arreglo matricial más adecuado al tipo de diseño factorial establecido

El diseño factorial seleccionado es de tipo bifactorial ya que se encuentran en análisis dos factores o variables independientes, el tipo de arreglo se selecciona a partir del numero de niveles establecido por cada factor involucrado en el diseño experimental, de acuerdo a ello se tiene un arreglo matricial de tipo 5X5, a fin de dar concordancia con el número de niveles establecidos ( ver tabla 4.2)

#### 4.3.2.3. Establecimiento del número de tratamientos

El número de tratamientos queda definido al fijar el arreglo matricial a aplicar en la experimentación, es decir, el número de tratamiento se establece por la combinación de los niveles fijados para cada factor, de tal manera dicho número se plantea en 25 tratamientos.

**Tabla 4.2**  
**Arreglo matricial de un diseño bifactorial 5X5**

Parámetros		Concentración de Catalizador (C±0,1)g/L				
		210, 0	225, 0	240, 0	255, 0	270, 0
Concentración de Tensoactivo (T±0,1)mL	0,0	T <sub>1</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>16</sub>	T <sub>21</sub>
	0,8	T <sub>2</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>17</sub>	T <sub>22</sub>
	1,5	T <sub>3</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>13</sub>	T <sub>18</sub>	T <sub>23</sub>
	2,3	T <sub>4</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>14</sub>	T <sub>19</sub>	T <sub>24</sub>
	3,0	T <sub>5</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>15</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>25</sub>

Función Respuesta: Diámetro de deposición ( $D_{DP} \pm 0,1$ )  $\mu$

#### 4.3.3. Conducción del experimento.

Se plantea la conducción del experimento a través de la determinación de la muestra a ser utilizada en el estudio así como la realización de las corridas experimentales y posterior análisis de los resultados obtenidos.

##### 4.3.3.1. Determinación de la muestra

Existen seis (6) tipos de ejes de aceros que son cromados en la línea de producción, de los cuales, los de mayor demanda son los ejes de ½" de diámetro, dichos ejes son ensamblados en los amortiguadores que tienen mayor requerimiento de producción debido a su alta demanda en el mercado comercial. (los valores de la demanda de dichos amortiguadores no es suministrado por las empresas)

Por ello, los ejes de ½" de diámetro son seleccionados como la muestra a la cual se le va a aplicar el diseño experimental ya que ellos son los ejes de mayor producción y en base a los cuales se realizan el mayor número de controles en la línea de cromado de la empresas productoras de amortiguadores.

#### 4.3.3.2. Diseño del instrumento de recolección de datos

Al plantear un diseño experimental de tipo bifactorial, el instrumento en el cual serán recolectados los datos queda directamente fijado como el arreglo matricial anteriormente establecido, facilitando de este modo el control y análisis de la interacción de las variables o factores.

En dicho instrumento se recolectaran los datos obtenidos a medida que él mismo, va indicando el tipo de tratamiento a aplicar en un momento determinado, facilitando así el control de la experimentación.

#### 4.3.3.3. Descripción del método operacional y plan de muestreo

El método operacional se estableció lo más semejante posible a los procedimientos utilizados por las empresas encargadas de cromar ejes de acero, con la salvedad que se realizaron modificaciones a fin de adaptar lo establecido al modelo a escala piloto, teniendo en cuenta los factores que varían entre una y otra situación, tal como lo es la pérdida o robo de corriente por las gancheras donde son acoplados 60 ejes por carga y en el modelo diseñado solo se trabaja con un eje por carga.

De acuerdo al escalamiento teórico realizado con respecto al modelo industrial se obtiene que es necesario la aplicación de 12 Amperios y un tiempo de 32 Minutos para lograr simular a semejanza el proceso llevado por las empresas, dichos cálculos no se lograron plantear como parámetro de operación, ya que durante la experimentación se comprobó que los ejes logran obtener una capa de cromo pero el mismo se deposita con una apariencia cobriza, lo cual indica que el depósito se ha quemado, en tales situaciones la solución a adoptar es la disminución del amperaje para evitar los daños en el proceso de cromado, la disminución se hizo de forma experimental probando con distintos amperajes hasta lograr obtener un valor donde se realice el proceso de cromado sin la presencia de depósitos quemados en la superficie del eje, teniendo como resultado que el proceso debe ser llevado a intensidad de corriente de seis (6) Amperios.

Entre otras consideraciones se tiene el tiempo, ya que al realizar una disminución del amperaje aplicado al eje y los ánodos, se debe aumentar el tiempo de cromado,

debido a que la variable tiempo y amperaje son inversamente proporcionales, en consecuencia a ello se tiene un tiempo de cromado de sesenta y cuatro (64) minutos.

A fin de garantizar las condiciones a las cuales se lleva a cabo la experiencia, se realiza la titulación de la solución de cromo (Ver Apéndice B), a ser utilizada en el proceso electrolítico, ya que a pesar de haber efectuado los cálculos de masa requerida para lograr obtener las concentraciones fijadas en los niveles de los factores, siempre existen errores de tipo humano que pueden afectar el análisis concreto del experimento, por todo ello al realizar la titulación se logra verificar la concentración de cromo contenida en la solución.

Ya que los ensayos a los que se sometieron los ejes de acero requerían de un tiempo prolongado, y su realización estaba limitada a la adquisición de la materia prima involucrada lo cual retardaba mucho más el proceso de experimentación, no fue posible la realización de replicas en las corridas por cada arreglo del diseño factorial debido a las limitaciones de tiempo a las cuales se encuentra ajustada la presente investigación.

Adicionalmente, la disposición del laboratorio en el cual se realiza la investigación estaba ajustada al periodo libre del mismo, ya que el cromo es un agente altamente tóxico y nocivo, y es necesario el uso de la debida protección para evitar el contacto directo con las soluciones o la inhalación de los gases tóxicos, por precaución, no podía haber estudiantes en clases en el laboratorio durante la realización de la experimentación.

#### 4.3.3.4. Realización de las corridas preliminares

Se realizan las corridas variando los niveles de concentración de cada uno de los factores de acuerdo a lo planteado en el método operacional, controlando aquellas variables que deben mantenerse fijas, tales como la temperatura, el tiempo de cromado y la intensidad de corriente aplicada tanto a los ejes como a los ánodos.

Al ir realizando las corridas por cada correlación planteada se observaba como el cromo se depositaba en la superficie del eje de acero, ya que el nivel del líquido no cubría a totalidad la superficie del mismo con el fin de verificar al momento la deposición del cromo en la superficie tratada.

La apariencia del eje al ser cromado cambia visiblemente, ya que pasa de una coloración gris metálica a una apariencia brillante uniforme. Entre mayor es la concentración de la solución electrolítica es más fácil notar el cambio visual en la superficie del eje, la apariencia brillante se hace más notoria al igual que la uniformidad de la superficie.

#### 4.3.3.5. Toma de datos

Los datos son recolectados durante el periodo de experimentación, midiendo el diámetro antes y después del cromado del eje con el tornillo micrométrico digital con el fin de determinar el aumento en el diámetro, por su parte para la determinación del espesor de la capa de cromo depositada se hizo uso de un elcometer digital. Los datos se ven reflejados en las tablas 4.3., 4.4. y 4.5.

De la tabla 4.3 a la tabla 4.4 se observa el incremento en el diámetro del eje al ser cromados, esto era usado como un indicador inicial utilizado, en el laboratorio donde se llevo a cabo la experimentación, para determinar que había ocurrido el proceso de electrodeposición del cromo en la superficie del eje de acero, ya que en las instalaciones del laboratorio no se cuenta con un elcometer (instrumento de medición del espesor de la capa de cromo)

**Tabla 4.3**

**Diámetros de los ejes de acero antes de ser sometidos al proceso de cromado**

Número de eje	Concentración de catalizador (C ± 0,1) g/L	Concentración de Tensoactivo (T ± 0,1) mL	Diámetro del eje (D ± 0,001) mm		
			Punta	Centro	Rosca
1	210,0	0,0	12,419	12,420	12,422
2		0,8	12,415	12,416	12,417
3		1,5	12,413	12,414	12,415
4		2,3	12,417	12,417	12,415
5		3,0	12,418	12,419	12,418
6	225,0	0,0	12,413	12,414	12,415

7		0,8	12,420	12,421	12,422
8		1,5	12,422	12,423	12,421
9		2,3	12,420	12,421	12,420
10		3,0	12,418	12,419	12,420
11		0,0	12,417	12,417	12,419
12		0,8	12,416	12,417	12,419
13	240,0	1,5	12,418	12,419	12,418
14		2,3	12,418	12,418	12,419
15		3,0	12,418	12,421	12,419
16		0,0	12,417	12,420	12,419
17		0,8	12,421	12,420	12,419
18	255,0	1,5	12,419	12,419	12,419
19		2,3	12,418	12,419	12,417
20		3,0	12,420	12,420	12,418
21		0,0	12,418	12,419	12,419
22		0,8	12,418	12,421	12,420
23	270,0	1,5	12,418	12,419	12,417
24		2,3	12,414	12,416	12,420
25		3,0	12,418	12,419	12,419

**Tabla 4.4**

**Diámetros de los ejes de acero luego de ser sometidos al proceso de cromado**

Nu mero de eje	Concentración de catalizador (C ± 0,1) g/L	Concentración de Tensoactivo (T ± 0,1) mL	Diámetro del eje (D ± 0,001) mm		
			Punta	Centro	Rosca
1	210,0	0,0	12,423	12,424	12,42 2
2		0,8	12,426	12,426	12,42 7
3		1,5	12,428	12,427	12,42 6
4		2,3	12,430	12,430	12,43 1
5		3,0	12,429	12,429	12,43 0
6	225,0	0,0	12,424	12,426	12,42 6
7		0,8	12,427	12,428	12,42 8
8		1,5	12,428	12,429	12,43 0
9		2,3	12,432	12,431	12,43 1
10		3,0	12,430	12,430	12,43 0
11	240,0	0,0	12,424	12,425	12,42 5
12		0,8	12,423	12,425	12,42 4
13		1,5	12,426	12,425	12,42 6
14		2,3	12,427	12,427	12,42 6
15		3,0	12,425	12,424	12,42 4
16	255,0	0,0	12,422	12,423	12,42 2
17		0,8	12,423	12,424	12,42 4
18		1,5	12,424	12,424	12,42 3
19		2,3	12,425	12,426	12,42 6
20		3,0	12,423	12,424	12,42 4
21	270,0	0,0	12,427	12,427	12,42 7
22		0,8	12,430	12,430	12,43 0
23		1,5	12,432	12,431	12,43 1
24		2,3	12,422	12,423	12,42 3
25		3,0	12,430	12,429	12,43 0

En la tabla 4.5 se ve refleja el espesor de la capa de cromo obtenido durante la experimentación, allí se observa la diferencia de los espesores al variar las correlaciones entre las variables del diseño experimental, dichos valores serán usados en la determinación posterior de la correlación fijada como la mas idónea para el proceso de cromado llevado a cabo por la empresa productora de amortiguadores.

**Tabla 4.5**

**Espesor experimental de la capa de cromo en los ejes de acero**

Parámetros		Concentración de Catalizador (C±0,1)g/L				
		210, 0	225, 0	240, 0	255, 0	270, 0
Concentración de Tensoactivo (T±0,1)mL	0,0	<b>9,9</b>	<b>11,6</b>	<b>13,2</b>	<b>15,1</b>	<b>17,2</b>
	0,8	<b>10,0</b>	<b>11,7</b>	<b>13,5</b>	<b>15,3</b>	<b>17,7</b>
	1,5	<b>10,7</b>	<b>11,8</b>	<b>13,8</b>	<b>15,6</b>	<b>17,9</b>
	2,3	<b>10,9</b>	<b>12,0</b>	<b>14,6</b>	<b>15,8</b>	<b>18,5</b>
	3,0	<b>10,8</b>	<b>11,5</b>	<b>13,6</b>	<b>15,3</b>	<b>17,8</b>

Función Respuesta: Espesor de la capa de cromo (e ± 0,1) μ.

#### 4.3.3.6. Realización del análisis lógico

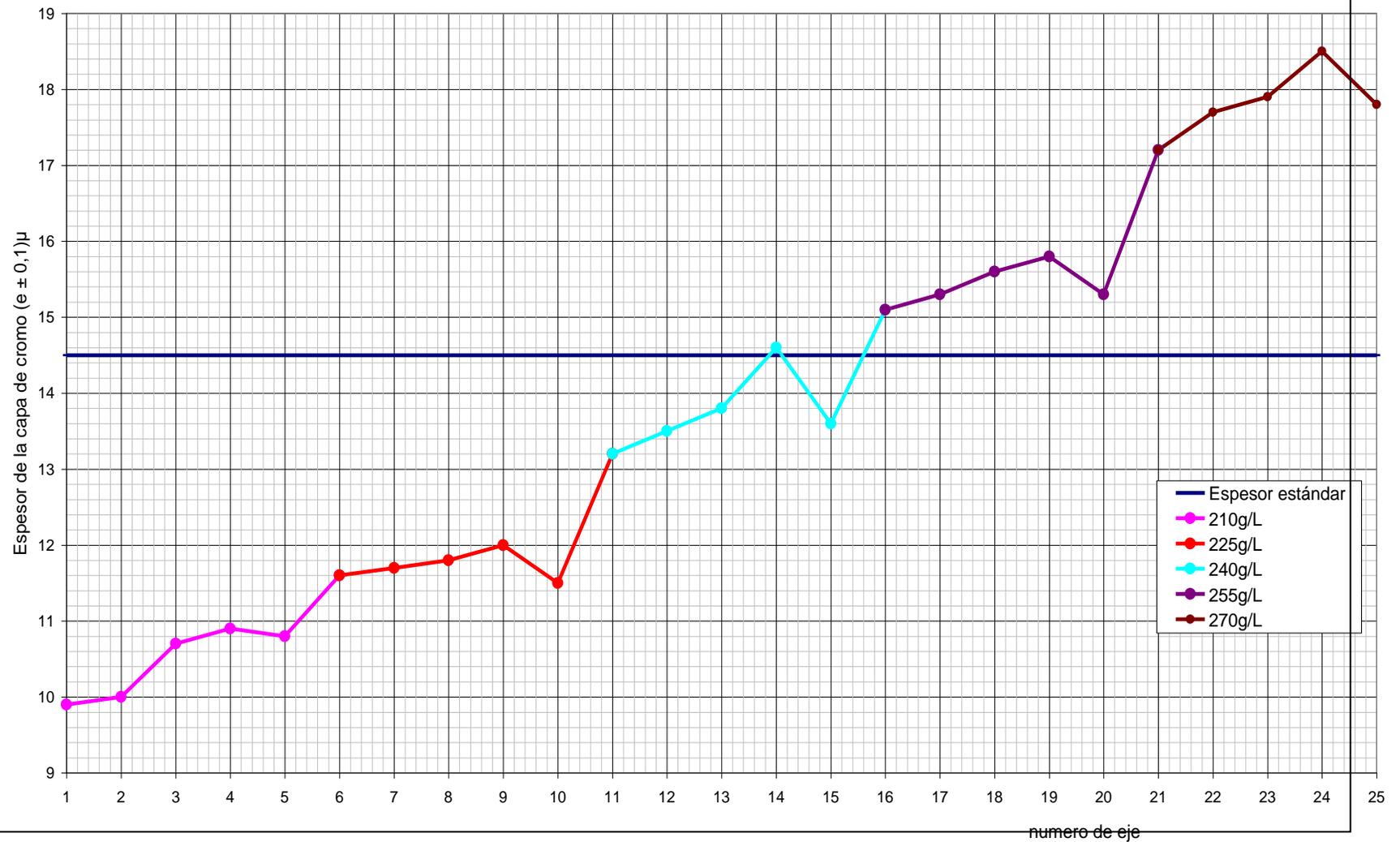
El análisis se realiza con la ayuda del concepto de línea de tendencia central, en el cual al graficar los valores de espesor de cromo obtenido durante la experimentación, se observa aquellos que estén cerca o desviados del valor planteado como parámetro de calidad por las empresas encargadas del cromado de los ejes de acero, como se puede observar en la Figura 4.3.

La tendencia de la curva de la Figura 4.3 es un aumento en el espesor de deposición a medida que la concentración de cromo-catalizador aumenta en un mismo intervalo de tiempo de aplicación de corriente, esto es debido a que a mayor concentración de cromo en la solución mayor es el numero de electrones que pueden depositarse en la superficie del mismo al ser reducidos a cromo metálico, al mismo

tiempo que aumenta la concentración del cromo en la solución también aumenta la concentración del catalizador, debido a que ellos se encuentran en una relación de 75:1 en la solución, el catalizador actúa como un facilitador del proceso electrolítico teniendo como consecuencia un aumento en el espesor de deposición en la superficie del eje, es decir a mayor concentración de catalizador mayor será el espesor de deposición obtenido

Figura 4.3

Tendencia central del espesor de la capa de cromo en los ejes de aceros cromados



Sin embargo, para una misma concentración de cromo-catalizador se observa como ocurre un descenso en el comportamiento de la curva en cada una de las correlaciones donde el tensoactivo se encuentra en el mayor valor del factor, esto es debido a que al existir una concentración elevada del tensoactivo este pasa a actuar como inhibidor o como un agente contaminante en la solución, impidiendo así la correcta deposición del cromo en la superficie del eje, ya que cualquier agente externo al proceso electrolítico actúa como un impedimento al correcto flujo de electrones entre los ánodos y los ejes a ser cromados.

Siendo el tensoactivo de tipo no iónico, la fase hidrofílica (cabeza) esta cargado parcialmente negativo y parcialmente positivo en la fase hidrofóbica (cola), quedando fijada a la superficie del eje (cátodo) la cabeza con carga parcialmente negativa y en la interfaz queda la cola cargada parcialmente positiva, facilitando así la correcta deposición de los iones de cromo en la superficie del eje ya que logra vencer la tensión superficial existente entre ellos. Pero al existir el tensoactivo en una concentración elevada, por encima del valor recomendado, se obtiene que el tensoactivo no solo vence la tensión superficial entre el ánodo y los iones de cromo, sino que también vence el efecto de la doble capa iónica, rompiendo las fuerzas de repulsión entre iones de igual carga provocando así que estos se unan hasta formar una molécula que luego precipitara formando lo que se conoce como “lodo” en el fondo de la cuba.

Es aquí donde radica la importancia de conocer la mejor correlación de concentración entre el cromo-catalizador y el tensoactivo, debido a que una elevada concentración de cromo-catalizador (Ver Figura 4.3) genera un diámetro de deposición por encima del valor parámetro de calidad implantado en las empresas generando así defectos al ser ensamblado el eje a la estructura final del amortiguador, ya que al poseer un espesor por encima del parámetro puede generar fracturas en el sello del mismo, teniendo como resultado un amortiguador defectuoso. Mientras que por su parte una elevada concentración de tensoactivo hace disminuir el espesor de la capa de cromo.

Otro aspecto importante al conocer la correlación idónea a ser aplicada como condición de operación en las líneas de cromado es el costo de operación y materia prima, el cromo-catalizador es un producto químico de valor elevado al igual que el tensoactivo, un uso indiscriminado y no controlado de ellos podría elevar los costos operativos de la empresa generando a su vez un elevado precio del amortiguador en el

mercado sin ser necesario y sin generar tantas piezas defectuosas en el proceso productivo de las mismas.

De la Figura 4.3 se puede deducir que la mejor correlación obtenida en la experimentación es la de 240g/L de cromo-catalizador y 2,3mL de tensoactivo, ya que el valor del espesor de deposición se encuentra cerca del valor parámetro, siendo este el único valor arrojado que se encuentra cerca del parámetro de calidad

#### 4.3.3.7. Realización del análisis de la varianza

El análisis de la varianza se realiza a partir de los valores de espesor de la capa de cromo obtenidos durante la realización de la experimentación haciendo uso de las formulas planteadas en el apéndice A. (Modelos matemáticos) dando como resultados los valores que se ven reflejados en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6**

**Análisis de varianza del experimento bifactorial cruzado y de efectos fijos**

Fuente de variación	Suma de cuadrados (Sc ± 0,01)	Grados de libertad (G <sub>L</sub> ± 1)	Varianzas (C <sub>M</sub> ± 0,01)	F <sub>0</sub> (F <sub>0</sub> ± 0,01)	Significación (F <sub>α</sub> ± 0,01)
Concentración de tensoactivo [T]	2,59	4	0,65	14,25	3,01
Concentración de catalizador [C]	171,33	4	42,83	939,29	3,01
Residual	0,73	16	0,05		
Total	174,65	24			

#### 4.3.3.8. Determinación del factor F

Tanto la concentración de cromo-catalizador como la de tensoactivo arrojan un valor de F por encima del valor tabulado indicando que ambos factores influyen en el proceso aunque no en la misma proporción. El factor F ayuda a conocer si los factores que intervienen en el diseño factorial son realmente significativos, ya que es importante

establecer dicho punto, con el fin de asegurar que las correlaciones establecidas en realidad sirven para el estudio del problema planteado en la investigación y a su vez que la solución arrojada es la más indicada para el proceso analizado.

#### 4.3.3.9. Identificación de los factores más influyentes

Para el cálculo del F experimental se hace uso de los valores obtenidos durante la realización de la experiencia práctica con ayuda de las ecuaciones planteadas en el apéndice A, por otra parte la determinación del valor de F tabulado se hace con apoyo en el Apéndice E

El factor más influyente es la concentración de catalizador en el proceso ya que como se observa en la tabla 4.6, el valor de F experimental es mucho mayor al tabulado para un nivel de confiabilidad del 95%, de igual forma se encuentra por encima, en una proporción elevada, del F experimental de tensoactivo.

Todo ello indica que el factor concentración de catalizador es el que debería ser objeto de las mayores medidas de control, ya que al influir en gran proporción sobre el proceso electrolítico, los cambios que se produzcan en el nivel de concentración afecta dramáticamente al mismo, generando defectos en las piezas tratadas a las condiciones de operación bajo las cuales se está llevando a cabo el cromado de los ejes de acero en las empresas de amortiguadores

### **4.4. ESPECIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE TENSOACTIVO Y CATALIZADOR MEDIANTE UN DISEÑO EXPERIMENTAL**

A continuación se presenta la especificación de la correlación determinada como la más idónea a ser fijada por la empresa productora de amortiguadores a fin de garantizar un buen funcionamiento del proceso de cromado que allí es llevado a cabo.

#### 4.4.1. Definir la alternativa para los niveles de concentración estándar

La alternativa seleccionada es la concentración de cromo-catalizador en 240g/L, cabe destacar que el valor parámetro actual en la empresa de amortiguadores es de 250g/L, no siendo necesaria una concentración tan elevada ya que con un valor menor se logra obtener el espesor de deposición requerido de  $\pm 14,5\mu$ . La sustancia cromo-catalizador tiene un costo muy elevado a pesar que posee un alto tiempo de vida útil, y

una disminución de 10g/L en las cubas hace una gran diferencia si se tiene en cuenta que las cubas a escala industrial poseen una capacidad de 1440L.

Para que las empresas logren alcanzar la concentración de 250g/L es necesario añadir a las cubas 8 cuñetes de la sustancia cromo-catalizador de 45,36 Kg c/u, por lo cual al realizar una disminución de 10g por cada litro de solución se plantea una reducción de la masa en un 4%, disminuyendo de igual forma el costo de materia prima.

La concentración de tensoactivo que acompaña la correlación seleccionada es de 2,3mL a escala piloto y 560mL a escala industrial, en este aspecto se encuentra que la concentración de tensoactivo aumenta con respecto a la utilizada actualmente por las empresas productoras de amortiguadores, esto ocurre debido a que la evaporación actualmente en las cubas es elevada, produciendo disminución en los niveles del líquido que a su vez generan defectos en el cromado, ya que la solución electrolítica no cubre en su totalidad al eje, dando como consecuencia un cromado no uniforme y total en la superficie del mismo.

Desde el punto de vista químico se da solución a la problemática planteada en la investigación, ya que se logra establecer el nivel de concentración idóneo para garantizar que los ejes alcancen un espesor de deposición óptimo, cumpliendo con los requerimientos a un menor costo de materia prima, así como también se plantea la disminución de la evaporación de la solución electrolítica fijando un nivel de concentración del tensoactivo que evita la ocurrencia de la misma sin llegar a interferir en el correcto proceso de cromado de los ejes de acero.

#### 4.4.2. Realización de la corrida de confirmación de la evaluación piloto

Se realiza el cromado de dos nuevas piezas bajo la correlación que ha sido detectada y planteada como la mas idónea en la investigación, observando una vez más el cambio visual de la pieza al ser cromada, obteniendo la superficie brillante y uniforme que caracteriza a los ejes que han sufrido el proceso de cromado.

Las piezas fueron tratadas de igual forma que se hizo en la experiencia previa al planteamiento de las condiciones de operación, sometiendo a las piezas a una limpieza química por el aproximado de dos minutos, luego a una limpieza electrolítica por el aproximado de un minuto y finalmente realizando un enjuague con agua desionizada a

fin de evitar contaminación de la solución electrolítica con alguno de los desengrases utilizados, ya que una vez más es importante destacar la necesidad de obtener una solución lo más libre posible de impurezas y agentes que puedan actuar como inhibidores del proceso en sí.

A las piezas utilizadas se les realizo de igual manera las mediciones de diámetro antes y después de ser cromadas a fin de comprobar el aumento del diámetro dentro de lo establecido como parámetro de calidad, también se realiza la medición del espesor de cromo depositado en la superficie del eje a fin de corroborar que la solución planteada en realidad es la mas idónea a ser utilizada por las empresas fabricantes de amortiguadores.

Los datos obtenidos durante la realización de dicha experiencia se ven reflejados en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7**  
**Datos experimentales de los ejes durante la corrida de confirmación**

Numero de eje	Diámetro de deposición (D ± 0,0001) mm						Espesor de la capa de cromo (e ± 0,1)μ
	Sin Cromar			Cromado			
	Punta Superior	Centro	Punta Inferior	Punta Superior	Centro	Punta Inferior	
1	12,4	12,	12,	12,4	12,4	12,	14,6
	21	423	422	25	26	425	
2	12,4	12,	12,	12,4	12,4	12,	14,7
	25	426	425	29	30	429	

Al analizar los valores obtenidos se verifica que los niveles de concentración planteados como condiciones de operación cumplen con los requerimientos establecidos, teniendo así una respuesta satisfactoria a la problemática que aquí ha sido planteada, garantizando así un proceso mucho más controlado y efectivo desde el punto de vista de operatividad en la empresa.

#### **4.5. DISEÑO DE UN MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA DE CROMADO A ESCALA PILOTO**

A continuación se realiza el diseño de un manual de operación de la cuba a escala piloto a fin facilitar a los usuarios el conocimiento sobre el funcionamiento del equipo.

#### 4.5.1. Establecimiento de las distintas condiciones de operación

Las variables consideradas como fijas del proceso son la temperatura, el tiempo de cromado y la densidad de corriente.

La temperatura a la cual debe permanecer un baño a escala industrial para garantizar una buena deposición del cromo en la superficie del eje se encuentra en un rango de (60-70)<sup>o</sup>C por lo tanto durante la experimentación se estableció una temperatura de 65<sup>o</sup>C la cual permaneció prácticamente invariable durante el tiempo de cromado por cada eje. La temperatura se mantiene fija a través del uso de una termocupla encargada de registrar la temperatura del baño de cromo en la cuba a escala piloto y de transmitirla a un sensor que mide y envía la respuesta a la resistencia de cuando debe encender y apagar dependiendo del valor fijado en el mismo.

El tiempo de cromado se establece en 62 minutos, ya que experimentalmente se comprobó que la intensidad de corriente a ser aplicada es de 6 amperios y no de 12 amperios como se determinó matemáticamente, generando así una duplicación del tiempo de cromado previamente calculado.

Las concentraciones a ser utilizadas son; 240g/L de la solución cromo-catalizador y 2,3mL de tensoactivo, siendo estas las obtenidas como idóneas del diseño experimental planteado. Cabe destacar, que es posible el uso de distintas concentraciones de catalizador y tensoactivo, si el propósito es determinar otro tipo de interacción y condiciones a las que se pueda trabajar la cuba a escala piloto, todo ello depende de que se desee comprobar en otra situación en la que se haga uso del equipo aquí diseñado.

Siendo necesario plantear que la temperatura de la solución, establecida en  $\pm 65^{\circ}\text{C}$  y la intensidad de corriente fijada en 6 Amperios, no pueden ser modificadas en ninguna circunstancia.

#### 4.5.2. Establecimiento de los objetivos.

Como ya se mencionó anteriormente, las condiciones a las cuales trabaja la cuba pueden variar dependiendo del tipo de estudio que se quiera realizar con la ayuda del equipo diseñado. Con la salvedad que existen dos variables que deben permanecer

indiscutiblemente fijas en el proceso, como lo son; la temperatura y la intensidad de corriente.

En el caso del tiempo de cromado, se pueden realizar modificaciones, a fin de lograr determinar un tiempo experimental que permita garantizar un diámetro de deposición de  $\pm 14,5\mu$ , ya que al lograr disminuir el tiempo de cromado se logra disminuir de igual manera los gastos eléctricos que genera llevar a cabo dicho procedimiento y a su vez permitiría el cromado de más piezas por día, aumentando así la producción de las empresas fabricantes de amortiguadores

Por su parte, las concentraciones de tensoactivo-catalizador también pueden variar conjuntamente con el tiempo, estableciendo así un nuevo tipo de diseño factorial conformado por tres factores, en el cual se lograría optimizar aun más el proceso de cromado.

Partiendo de ello, se establecen posibles objetivos que se podrían buscar comprobar a partir del uso de la cuba escala piloto diseñada en la presente investigación. Tales objetivos se exponen a continuación:

- 1) Determinar la influencia del tiempo en el proceso de cromado de ejes de acero con el fin de conocer el tiempo óptimo de cromado.
- 2) Establecer la mejor relación tiempo-concentración de catalizador con el fin de lograr disminuir los costos operativos del proceso de cromado de ejes de acero.
- 3) Determinar la concentración de catalizador con el fin de lograr obtener un proceso de cromado eficiente disminuyendo el número de piezas defectuosas

#### 4.5.3. Realización del diagrama del proceso y del equipo

Los diagramas de flujo son diseñados a fin de facilitar al usuario de la cuba a escala piloto, la comprensión del proceso que es llevado a cabo en el equipo, a su vez que permite la fácil manipulación de las piezas que conforman el mismo y la rápida implementación del método operatorio planteado, según sea el caso para el cual será empleada la cuba.

#### 4.5.4. Realización del método operatorio

El método operatorio se plantea a partir del utilizado durante la experiencia práctica, siendo necesario seguir la secuencia establecida a fin de evitar errores o una mala manipulación del equipo que pueda llevar a datos erróneos y sin base química, y en el peor de los casos el daño total o parcial del equipo

#### 4.5.5. Edición y publicación del manual de operación

Se publica el manual de operación con el fin de dar a conocer el funcionamiento del equipo, método operatorio y demás aspectos que se consideran como importantes para el usuario, ya que se plantea el uso en un futuro de la cuba a escala piloto por los estudiantes de la escuela de química de la facultad de ingeniería.

Es importante dejar una guía donde se den a conocer los resultados mas resaltantes obtenidos durante la puesta en marcha de la cuba, que se logro con el uso de ella y dejar planteado otros tantos aspectos que se pueden determinar a través de distintos enfoques de investigación, que podrían plantearse como parte de un nuevo trabajo especial de grado o como un tema de practica de los conocimientos de las celdas electroquímicas, a fin de legar un equipo que sea realmente usado y que sirva como apoyo para futuras investigaciones que se deseen realizar en la materia del proceso de deposición del cromo duro.

Igualmente se adicionan aspectos como medidas de prevención, riesgos de contaminación, daños al organismo producto del cromo en la sangre. Todos ellos son aspectos importantes ya que el cromo es un agente altamente toxico y cancerigeno, y debe ser usado con precaución y conciencia, debido a ello es importante la inclusión dicha información en el manual para que el usuario tome conocimiento de los riesgos a los que se somete y las precauciones que debe tener consigo mismo y con el resto de las personas que estén cercanas al equipo.

El manual queda publicado en físico conjuntamente con la cuba a escala piloto en la facultad de ingeniería y en la presente investigación queda referido al Apéndice G.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CEDEÑO, L y RAMOS, A. (2004). Evaluación de la línea de cromado de ejes de acero para amortiguadores en una empresa fabricante de autopartes. Gabriel de Venezuela C.A., Universidad de Carabobo.
2. CORONA, R y LAU, C. (2004). Rediseño de la línea de tratamiento químico de los perfiles de aluminio de la I.V.I.V Group, C.A. Universidad de Carabobo.
3. BAEZ, Tito y CRESPO, Leidiany. (2004). Determinación de la cantidad adecuada de tensoactivos y fragancias para desinfectantes y detergentes líquidos elaborados por La Envasadora P.A., C.A. La Envasadora P.A., C.A, Universidad de Carabobo.
4. BELISARIO, Y y BLASCO, M. (2002). Evaluación de la extracción de aceite esencial de albahaca mediante CO<sub>2</sub> supercrítico. Universidad de Carabobo.
5. APONTE, Yira (2001). Evaluación de catalizadores para el mejoramiento de la calidad de naftas de craqueo. PDVSA – INTEVEP, Universidad de Carabobo.
6. JIMÉNEZ, Héctor (1999). Disminución del tiempo de atemperamiento de las laminas litografiadas en el proceso de elaboración de tapas para la industria embotelladora.
7. [http:// www.Monografias.com/trabajos/croma](http://www.Monografias.com/trabajos/croma).
8. ABUIN, G y VALENTINI, C. (1998). “Tecnología del proceso de cromo duro”. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Centro de investigación y desarrollo sobre electrodeposición y procesos superficiales (CIEPS). Buenos Aires, Argentina.
9. GRUPO KAIZEN. (2000). “Guía de trabajo de planta de cromado- Gabriel”. Venezuela.
10. <http://www.procesa.com/>.
11. GABRIEL DE VENEZUELA. (1999). “Manual de procedimiento y comentarios sobre cromado”. Valencia, Carabobo.
12. GABRIEL DE VENEZUELA. (2002). “Proceso de Cromado”. Valencia, Carabobo.

13. UNDA, T (2004). "Fenómenos de superficie y equilibrio de interfases". UNAM. Facultad de Química. Ciudad Universitaria D.F. México.
14. <http://home.t-online.de/home/udo.plante/anode.htm>.
15. [http://www.google.co.ve/search/22+heef+25rs/Dlang\\_es](http://www.google.co.ve/search/22+heef+25rs/Dlang_es).
16. ATOTECH. (1990). "Standart Test Methods". Research Laboratory. New Jersey.
17. GABRIEL DE VENEZUELA. (2002). "Instructivo de chequeo diario de parámetros en planta de cromado". Valencia, Carabobo.
18. <http://www.cimas.eurosur.org/global/fichas/ficha.php/Herramientas>.
19. [http://www.club.telepolis.com/ohcop/espina\\_d.html](http://www.club.telepolis.com/ohcop/espina_d.html).
20. [http://www.cmpl.inp.mx/area\\_tecnica/pdf](http://www.cmpl.inp.mx/area_tecnica/pdf).
21. BAPTISTA, L. FERNÁNDEZ, C Y HERNÁNDEZ, R. (1991). "Metodología de la investigación". Ediciones McGraw Hill. 2º Edición. Caracas.
22. KOLARIK, W. (1995). "Creating Quality: Concepts, Systems, Strategies and Tools. Ediciones McGraw Hill. USA.
23. KUEHL, Robert. (2002). "Diseño de experimentos". International Thomson Learning Editores, S.A. 2º Edición. México.
24. LUGO, Franklin Chacín. (2000). "Diseño y análisis de experimentos". Universidad Central de Venezuela. Ediciones del Vicerrectorado Académico. 1º Edición. Caracas.
25. RODRÍGUEZ, Nacarid. (1978): "Introducción al diseño de experimentos". Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Facultad de Humanidades y Educación. Caracas.
26. ATOTECH USA INC. (2000). "Material Safety data Sheet". USA.



## PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

### CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/ Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	
1.Realizar el desengrase químico de la pieza a ser cromada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plancha de calentamiento</li> <li>Cilindro graduado</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>En un beaker calentar el desengrase químico.</li> <li>Medir la temperatura hasta alcanzar los 60°C.</li> <li>Agregar el desengrase en un cilindro graduado de 100mL</li> <li>Sumergir el eje previamente medido su diámetro</li> <li>Dejarlo sumergido por dos minutos</li> <li>Sacarlo del baño</li> </ol>	Hasta lograr una superficie libre de sustancias químicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beaker de 100mL</li> <li>Termómetro</li> <li>Agitador</li> <li>Pinza de madera</li> <li>Guantes</li> <li>Mascara protectora.</li> </ul>	<p><u>Físico:</u> Quemaduras</p> <p><u>Eléctrico:</u> Shock eléctrico</p> <p><u>Químico:</u> Inhalación de los vapores.</p>	<p>Contacto con la plancha de calentamiento o con la solución de desengrase</p> <p>Contacto con la plancha de calentamiento</p> <p>Inhalación directa de los vapores que se desprenden al ser calentado el baño de desengrase</p>	<p>Evitar el uso de guantes de envase</p> <p>Evitar el contacto con la plancha de calentamiento</p> <p>Usar mascarilla para evitar la inhalación de los vapores</p>



## PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

### CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/ Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	
2.Realizar el desengrase electrolítico de la pieza a ser cromada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plancha de calentamiento</li> <li>• Cilindro graduado</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.En un beaker calentar el desengrase electrolítico.</li> <li>2.Medir la temperatura hasta alcanzar los 60°C.</li> <li>3.Agregar el desengrase en un cilindro graduado de 100mL</li> <li>4.Sumergir el eje</li> <li>5.Dejarlo sumergido por un minuto.</li> <li>4.Sacarlo del baño</li> </ol>	Hasta lograr una superficie libre de sustancias residuales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beaker de 100mL</li> <li>• Termómetro</li> <li>• Agitador</li> <li>• Pinza de madera</li> <li>• Guantes</li> <li>• Mascara protectora.</li> </ul>	<u>Físico:</u> Quemaduras  <u>Eléctrico:</u> Shock eléctrico  <u>Químico:</u> Inhalación de los vapores.	Contacto con la plancha de calentamiento o con la solución de desengrase  Contacto con la plancha de calentamiento  Inhalación directa de los vapores que se desprenden al ser calentado el baño de desengrase	Evitar el uso de guantes  Evitar el contacto con la plancha de calentamiento  Usar mascarilla para evitar la inhalación



## PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

### CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/ Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	
3.Realizar el enjuague de la pieza a cromar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plancha de calentamiento</li> <li>• Cilindro graduado</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.En un beaker calentar agua desionizada.</li> <li>2.Medir la temperatura hasta alcanzar los 60°C.</li> </ol>	Hasta lograr una superficie libre de los desengrases previamente utilizados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beaker de 100mL</li> <li>• Termómetro</li> <li>• Agitador</li> <li>• Pinza de madera</li> <li>• Guantes</li> </ul>	<u>Físico:</u> Quemaduras  <u>Eléctrico:</u>	Contacto con la plancha de calentamiento o con el agua desionizada.  Contacto con la	Evitar el uso de guantes  Evitar

		3. Agregar el agua desionizada en un cilindro graduado de 100mL 4. Sumergir el eje 5. Dejarlo sumergido por un minuto. 4. Sacarlo del baño		<ul style="list-style-type: none"> <li>Mascara protectora.</li> </ul>	Shock eléctrico	plancha de calentamiento	del e
--	--	---	--	---	-----------------	--------------------------	-------



## PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

### CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/ Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	
4. Realizar la activación de la superficie a cromar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuba a escala piloto</li> <li>Controlador de temperatura</li> <li>Fuente de poder de 20 amperios.</li> </ul>	1. Ensamblar el eje en la estructura de la cuba. 2. Realizar la conexión de las terminales. 3. Fijar el controlador de temperatura en 65°C 4. Esperar a alcanzar los 65°C 5. Iniciar en 1 amperio por 1 minutos 6. Aumentar gradualmente el	Hasta lograr una intensidad de 6 Amperios y activar la superficie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cronometro</li> <li>Termómetro</li> <li>Agitador</li> <li>Pinza de madera</li> <li>Solución cromo-catalizador</li> <li>Tensoactivo</li> <li>Guantes</li> <li>Mascara protectora.</li> </ul>	<u>Físico:</u> Quemaduras  <u>Eléctrico:</u> Shock eléctrico  <u>Químico:</u> Inhalación de los vapores.	Contacto con las paredes de la cuba o con la solución electrolítica.  Contacto con la fuente de poder	Evitar guantes envueltos  Evitar el uso de...  Usar... evite...

		amperaje cada minuto en un amperio				
--	--	------------------------------------	--	--	--	--



## PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

### CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	
5.Realizar cromado del eje de acero	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuba a escala piloto</li> <li>Controlador de temperatura</li> <li>Fuente de poder de 20 amperios.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Colocar el regulador de la fuente de poder en 6 Amperios</li> <li>Iniciar el contador de tiempo.</li> <li>Verificar la temperatura</li> </ol>	Hasta un tiempo de 64 minutos y una superficie cromada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cronometro</li> <li>Termómetro</li> <li>Agitador</li> <li>Solución cromo-catalizador</li> <li>Tensoactivo.</li> <li>Guantes</li> <li>Mascara protectora.</li> </ul>	<u>Físico:</u> Quemaduras  <u>Eléctrico:</u> Shock eléctrico  <u>Químico:</u> Inhalación de los vapores.	Contacto con las paredes de la cuba o con la solución electrolítica  Contacto con la fuente de poder  Inhalación directa de los vapores que se desprenden al ser calentado el baño electrolítico.	Evitar quemaduras Evitar el contacto con la fuente de poder Usar mascarilla para evitar la inhalación



# PROCEDIMIENTO DE CROMADO DE EJES DE ACERO AMORTIGUADORES

## CUBA A ESCALA PILOTO

Operación principal	Equipos	Tareas	Condición de operación	Productos/Implementos	Aspectos de Seguridad		
					Riesgo / Lesión	Agente causante	Medidas de Control
6. Realizar el desmontaje del eje de acero cromado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuba a escala piloto</li> <li>Controlador de temperatura</li> <li>Fuente de poder de 20 amperios.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Colocar el regulador de la fuente de poder en 0 Amperios</li> <li>Apagar la fuente de poder</li> <li>Apagar el controlador de temperatura</li> <li>Levantar la cubierta de la cuba.</li> <li>Lavar el eje con agua desionizada.</li> <li>Medir diámetro y capa de espesor de cromo</li> </ol>	Hasta quedar sin restos de la solución de cromo-catalizador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guantes</li> <li>Pizeta</li> <li>Agua desionizada</li> <li>Mascara protectora.</li> </ul>	<p><u>Físico:</u> Quemaduras</p> <p><u>Eléctrico:</u> Shock eléctrico</p> <p><u>Químico:</u> Inhalación de los vapores.</p>	<p>Contacto con las paredes de la cuba o con la solución electrolítica.</p> <p>Contacto con la fuente de poder</p> <p>Inhalación directa de los vapores que se desprenden al ser calentado el baño electrolítico.</p>	<p>Evitar el contacto con las paredes de la cuba o con la solución electrolítica.</p> <p>Evitar el contacto con la fuente de poder</p> <p>Usar mascarilla protectora y evitar la inhalación de los vapores.</p>

### TABLA DE TOXICOLOGÍA

COMPUESTO	CONTACTO CON LOS OJOS	CONTACTO CON LA PIEL	INHALACIÓN	INGESTIÓN
<b>ÁCIDO CRÓMICO</b>	Corrosivo. Puede causar severas quemaduras y posible daño permanente a los ojos.  <b>En caso de contacto lavar inmediatamente los ojos con abundante agua por espacio de 15 minutos.</b>	Toxico. Corrosivo. Puede ser dañino si es absorbido a través de la piel. Su contacto puede causar severas quemaduras.  En caso de contacto lavar inmediatamente las áreas expuestas con jabón y abundante agua. Incluyendo ropa y zapatos que hayan sido contaminados.	Puede causar severa irritación y quemaduras al tracto respiratorio, incluyendo nariz, vías respiratorias y pulmones.  Evitar el contacto con la fuente de exposición si se dificulta la respiración, si es necesario, irrigue las fosas nasales con agua.	Toxico. Corrosivo. Puede ser dañino si es ingerido causando severa destrucción al hígado y riñón.  En caso de ingestión: No inducir el vomito. Debe ingerir grandes cantidades de agua o leche. Si ocurre el vomito espontáneamente, resguarde las vías respiratorias y suministre mas agua. Buscar atención medica inmediata.

Fuente: ATOTECH USA INC.

Nombre usado comercialmente: HEEF 25 GS

## TABLA DE TOXICOLOGÍA

COMPUESTO	CONTACTO CON LOS OJOS	CONTACTO CON LA PIEL	INHALACIÓN	INGESTIÓN
<b>ETER GLYCOL</b> (TENSOACTIVO)	<b>Causa irritación a los ojos y áreas circundantes.</b>  <b>En caso de contacto lavar inmediatamente los ojos con abundante agua por espacio de 15 minutos.</b>	Irritante.  En caso de contacto lavar inmediatamente las áreas expuestas con jabón y abundante agua. Incluyendo ropa y zapatos que hayan sido contaminados.	Puede causar irritación al tracto respiratorio, incluyendo nariz y pulmones.  Evitar el contacto con la fuente de exposición si se dificulta la respiración.	Causa irritación a la boca, garganta y estomago.  En caso de ingestión: No inducir el vomito. Debe ingerir grandes cantidades de agua o leche. Buscar atención medica inmediata.

Fuente: ATOTECH USA INC.

Nombre usado comercialmente: FUMETROL 108

**Nota:** Los experimentadores y/o personas expuestas de forma cercana al lugar de exposición deben utilizar mascarillas con cartuchos para volátiles orgánicos, además de la protección personal de ropa y calzado adecuada y lentes de seguridad.

## APÉNDICES

APÉNDICE A  
MODELOS MATEMÁTICOS

## MODELOS MATEMÁTICOS

A continuación, se presentan los modelos matemáticos involucrados en el desarrollo del estudio.

### A.1. Cálculo de la masa requerida

$$m = D * V \quad \text{(I) ABUIN, G y VALENTÍN, C}$$

Donde:

m: Masa de cromo requerida, (g)

D: densidad de la solución de cromo, (g/L)

V: Volumen de líquido ocupado por la solución, (L)

### A.2. Cálculo de la densidad de corriente

$$J = \frac{A}{(\pi * d * L)} \quad \text{(II) ABUIN, G y VALENTÍN, C}$$

Donde:

J: Densidad de corriente, (A/dm<sup>2</sup>)

A: Intensidad de corriente a aplicar, (A)

d: Diámetro del eje de acero, (dm)

L: Longitud del eje de acero, (dm)

### A.3. Cálculo de tiempo de cromado

$$T = \frac{1}{V_{deposición}} * 16\mu \quad \text{(III) ABUIN, G y VALENTÍN, C}$$

Donde:

T: Tiempo de cromado, (min)

V<sub>deposición</sub>: Velocidad de deposición, (μ/h)

### A.4. Cálculo para el análisis de varianza de un arreglo factorial de dos factores A y B, con a niveles del factor A y b niveles del factor B

#### A.4.1. Suma de Cuadrados (SC)

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i.}^2}{b} - \frac{Y_{..}^2}{a * b} \quad \text{(IV) KUEHL, Robert}$$

Donde:

a: *i*-ésimos niveles del factor A

b: *j*-ésimos niveles del factor B

Y<sub>i.</sub>: sumatoria de la respuesta cuando se ha combinado el *i*-ésimo nivel del factor A con cada nivel del factor B

Y<sub>..</sub>: sumatoria de la respuesta cuando se ha combinado cada nivel del factor A con cada nivel del factor B

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j}^2}{a} - \frac{Y_{..}^2}{a * b} \quad \text{(V) KUEHL, Robert}$$

Y<sub>.j</sub>: sumatoria de la respuesta cuando se ha combinado el *j*-ésimo nivel del factor B con cada nivel del factor A.

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{a * b} \quad \text{(VI) KUEHL, Robert}$$

$Y_{ij}$ : Combinación de tratamientos a cada nivel del factor A con cada nivel del factor B.

$$SC_R = SC_{AB} = SC_T - SC_A - SC_B \quad \text{(VII) KUEHL, Robert}$$

A.4..2. Grados de Libertad (GL)

$$GL_A = a - 1 \quad \text{(VIII) KUEHL, Robert}$$

$$GL_B = b - 1 \quad \text{(IX) KUEHL, Robert}$$

$$GL_R = GL_{AB} = (a - 1) * (b - 1) * 1 \quad \text{(X) KUEHL, Robert}$$

$$GL_T = (a * b) - 1 \quad \text{(XI) KUEHL, Robert}$$

A.4.3. Cuadrados Medios (CM)

$$CM_A = \frac{SC_A}{(a - 1)} \quad \text{(XII) KUEHL, Robert}$$

$$CM_R = \frac{SC_R}{(b - 1)} \quad \text{(XIII) KUEHL, Robert}$$

$$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a - 1) * (b - 1)} \quad \text{(XIV) KUEHL, Robert}$$

A.4.4. Distribución de Fisher (Fo)

$$Fo = \frac{CM_{FACTOR}}{CM_R} \quad \text{(XV) KUEHL, Robert}$$

APÉNDICE B  
CÁLCULOS TÍPICOS

## CÁLCULOS TÍPICOS

A continuación, se presentan los cálculos típicos involucrados en el desarrollo del estudio.

### B.1. Cálculo de la masa requerida:

Mediante la ecuación (I) del apéndice A, y sustituyendo para un valor de concentración de cromocatalizador de 210g/L, el cual es el primer nivel para el diseño factorial planteado y un volumen de la cuba a escla piloto de 5,9L, determinado experimentalmente.

$$D = 210 \text{ g/L}$$

$$V = 5,9 \text{ L}$$

Se tiene que:

$$m = 210 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 5,9\text{L} = 1239 \text{ g}$$

Los valores de masa calculados para cada concentración se encuentran reportados en la tabla 4.1.

### B.2. Cálculo de la densidad de corriente:

Mediante la ecuación (II) del apéndice A, y sustituyendo para:

$$A = 12 \text{ amp}$$

$$D = 0,12 \text{ dm}$$

$$L = 2,20 \text{ dm}$$

Se tiene que:

$$J = \frac{12 \text{ amp}}{3,1416 * 0,12 \text{ dm} * 2,20 \text{ dm}} = 14,5 \frac{\text{amp}}{\text{dm}^2}$$

### B.3. Cálculo de la velocidad de deposición:

Mediante la grafica Velocidad de deposición Vs Densidad de corriente, del apéndice F, se obtiene que:

$$\text{Para } J = 14,5 \frac{\text{amp}}{\text{dm}^2} \Rightarrow V_{\text{Deposición}} = 28 \frac{\mu}{\text{h}}$$

### B.4. Cálculo de tiempo de cromado:

Mediante la ecuación (III) del apéndice A, y sustituyendo los valores para:

$$V_{\text{Deposición}} = 28 \frac{\mu}{\text{h}}$$

Espesor de cromo = 14,5 (Eje de 1/2" de diametro)

Se tiene que:

$$T = \frac{1}{28 \frac{\mu}{\text{h}}} * 14,5 \mu = 0,52 \text{ h} \cong 31,2 \text{ min} \Rightarrow T = 32 \text{ min}$$

## B.5. Cálculo para el análisis de varianza de un arreglo factorial de dos factores A y B, con a niveles del factor A y b niveles del factor B

A continuación se presenta el cálculo del análisis de varianza del diseño experimental realizado en la presente investigación.

### B.5.1 Suma de cuadrados:

Se realiza la suma de cuadrados para la concentración del factor A, B y sus combinaciones

**B.5.1.1. Suma de Cuadrados del factor A (SC<sub>A</sub>), Siendo el factor A la concentración de tensoactivo:**

Mediante la ecuación (IV) del apéndice A, y sustituyendo los valores de la tabla 4.5 para cada nivel del factor A se tiene que:

Para nivel 1 de A combinado con cada nivel de B:

$$Y_1 = \sum (9,9 + 11,6 + 13,2 + 15,1 + 17,2) = 67,0$$

De igual forma, se realiza para cada nivel de A combinado con cada nivel de B.

Por otra parte, se tiene que:

$$Y_{..} = \sum Y_1 + Y_2 + \dots + Y_5 = 67 + 68,2 + 69,8 + 71,8 + 69 = 345,8$$

Por lo tanto:

$$SC_A = \sum_{i=1}^5 \left[ \frac{(67^2 + 68,2^2 + 69,8^2 + 71,8^2 + 69^2)}{5} - \frac{(345,8)^2}{25} \right] = 2,5984 = 2,59$$

**B.5.1.2 Suma de Cuadrados del factor B (SC<sub>B</sub>), Siendo el factor B la concentración de catalizador:**

Mediante la ecuación (V) del apéndice A, y sustituyendo los valores de la tabla 4.5 para cada nivel del factor B se tiene que:

Para nivel 1 de B combinado con cada nivel de A:

$$Y_1 = \sum (9,9 + 10,0 + 10,7 + 10,9 + 10,8) = 52,3$$

De igual forma, se realiza para cada nivel de B combinado con cada nivel de A.

Por lo tanto:

$$SC_B = \sum_{i=1}^5 \left[ \frac{(52,3^2 + 58,6^2 + 68,7^2 + 77,1^2 + 89,1^2)}{5} - \frac{(345,8)^2}{25} \right] = 171,3264 = 171,33$$

**B.5.1.3 Suma de cuadrados totales:**

Mediante la ecuación (VI) del apéndice A, y sustituyendo los valores de la tabla 4.5 se tiene que:

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (9,9)^2 + (10,0)^2 + (10,7)^2 + \dots + (17,2)^2 - \frac{[(345,8)^2]}{25} = 174,6544 = 174,65$$

**B.5.1.4 Combinación de tratamientos a cada nivel del factor A con cada nivel del factor B:**

Mediante la ecuación (VII) del apéndice A, y sustituyendo los valores calculados previamente, se tiene que:

$$SC_{AB} = 174,65 - 2,59 - 171,33 = 0,73$$

**B.6. Cálculo de los grados de Libertad (GL):**

A través de las ecuaciones (VIII), (IX), (X) y (XI) del apéndice A, y sustituyendo para:

a =5

b =5

Se tiene que:

$$GL_A = 5 - 1 = 4$$

$$GL_B = 5 - 1 = 4$$

$$GL_{AB} = (5 - 1) * (5 - 1) * 1 = 16$$

$$GL_T = (5 * 5) - 1 = 24$$

**B.7. Cálculo de los cuadrados medios (CM) o varianzas:**

Mediante las ecuaciones (XII),(XIII) y (XIV) del apéndice A, y sustituyendo los valores de suma de cuadrados obtenidos anteriormente para cada factor y su combinación se tiene que:

$$CM_A = \frac{2,59}{4} = 0,65$$

$$CM_R = \frac{171,33}{4} = 42,83$$

$$CM_{AB} = \frac{0,73}{16} = 0,045$$

#### **B.8. Cálculo de la distribución de Fisher (Fo):**

Mediante la ecuación (XV), y sustituyendo los valores de varianzas obtenidos previamente, se tiene que:

$$FO_A = \frac{CM_A}{CM_{AB}} = \frac{0,65}{0,045} = 14,25$$

Este cálculo se realiza igualmente para el factor B. Los resultados obtenidos a través del análisis de varianza se encuentran reportados en la tabla 4.6.

#### **B.9. Cálculo de la significancia de cada factor:**

Para esto, se compara el valor de F calculado experimentalmente con el valor de F tabulado.

Mediante la tabla de distribución de Fisher ubicada en el apéndice F, se obtiene la significancia de cada factor en estudio. Donde, para la tabla se tiene que:

$$v_1 = \text{GL Factor en estudio}$$

$$v_2 = \text{GL Interacción}$$

Entonces para el factor A:

$$v_1 = 4$$

$$v_2 = 16$$

$$F \text{ Tabulado} = 3,01$$

Por lo tanto como  $FO_{A\text{exp}} > F_{\text{tab}}$ , el factor A es significativo en el estudio.

APÉNDICE C  
MÉTODO DE TITULACIÓN

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO  
MÉTODO DE TITULACIÓN

A continuación se presenta el método de titulación utilizado en la determinación de la concentración del ácido crómico experimentalmente a fin de verificar la concentración de la solución preparada en el laboratorio.

1. Tomar una muestra de 10 mL en una pipeta volumétrica y diluirlo en un matraz aforado de 500 mL o en uno de 250 mL.
2. Tomar 10 mL (si fue diluido en uno de 500 mL) ó 5 mL (si fue diluido en uno de 250 mL) con una pipeta volumétrica y vaciarlo en un erlenmeyer de 250 mL
3. Adicionar:
  - 1 mL de bifluoruro de amonio al 1,55 %.
  - 10 mL de ácido clorhídrico puro.
  - 10 mL de yoduro de potasio al 10 %.
4. Titular con tiosulfato de sodio 0,1 N hasta que desaparezca el color oscuro del yodo, adicionar luego 5 mL de almidón al 0,4 % y continuar titulación hasta que desaparezca el color azul.

### RESULTADOS:

mL de tiosulfato gastados \* 16,67 = g/L de Ácido Crómico

APÉNDICE D  
REPORTE DE CONTROL DE LAS VARIABLES DE LA LINEA DE CROMADO EN UNA  
EMPRESA FABRICANTE DE AMORTIGUADORES

**Tabla AP.1**  
**Reporte de control de la línea de cromado de una empresa fabricante de amortiguadores**

Cuba	Parámetros	Requerido	Semanas de estudio											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Desengrase Químico	Concentración	(30-80)g/L	32,4	33,5	33,2	30,1	33,9	35,1	32,8	33,1	34,0	31,6	34,0	31,9
	Temperatura	(40-70)°C	48,0	50,2	48,8	52,8	53,5	51,0	52,9	49,8	52,0	52,2	51,4	56,4
Desengrase Electrolítico	Concentración	(30-60)g/L	35,5	37,1	35,2	32,5	34,0	33,6	31,6	48,9	44,5	38,4	40,4	35,1
	Temperatura	(40-60)°C	49,8	52,0	53,6	55,4	55,3	53,6	54,5	54,3	50,2	52,0	53,2	52,0
Proceso de Mordentado	Concentración	(18,6-22,9)°Be	10,6	10,3	10,3	7,9	7,0	7,4	7,0	6,4	7,4	7,3	7,0	17,4
	Temperatura	(54-65)°C	55,3	58,8	60,0	63,6	64,8	63,6	64,8	64,4	59,0	61,2	61,8	61,8
Cromado Tanque1	Concentración	(18,6-22,9)°Be	<b>15,2</b>	<b>17,7</b>	<b>16,8</b>	<b>15,7</b>	<b>18,2</b>	<b>16,8</b>	<b>16,0</b>	<b>15,2</b>	<b>16,0</b>	<b>15,3</b>	<b>15,1</b>	<b>15,5</b>
	Temperatura	(54-65)°C	<b>63,5</b>	<b>61,2</b>	<b>63,2</b>	<b>62,2</b>	<b>64,0</b>	<b>59,6</b>	<b>61,4</b>	<b>62,2</b>	<b>59,8</b>	<b>59,6</b>	<b>64,4</b>	<b>58,4</b>
Cromado Tanque 2	Concentración	(18,6-22,9)°Be	14,7	17,2	16,1	15,7	17,8	17,4	16,3	16,3	15,1	14,9	14,9	15,1
	Temperatura	(54-65)°C	63,8	51,2	62,8	65,6	65,5	60,0	60,4	60,0	62,0	61,8	66,4	59,0
Cromado Tanque 3	Concentración	(18,6-22,9)°Be	15,8	17,2	17,0	16,7	18,8	19,4	18,7	18,3	17,4	16,4	16,5	15,9
	Temperatura	(54-65)°C	62,5	60,8	63,8	65,0	68,3	60,2	62,6	59,8	61,8	58,2	62,8	66,0
Cromado Tanque 4	Concentración	(18,6-22,9)°Be	<b>15,3</b>	<b>17,4</b>	<b>16,4</b>	<b>15,5</b>	<b>17,9</b>	<b>17,4</b>	<b>16,9</b>	<b>16,8</b>	<b>15,8</b>	<b>15,2</b>	<b>15,0</b>	<b>15,1</b>
	Temperatura	(54-65)°C	<b>60,75</b>	<b>62,4</b>	<b>61,8</b>	<b>62,2</b>	<b>63,0</b>	<b>59,8</b>	<b>59,4</b>	<b>61,6</b>	<b>61,2</b>	<b>61,2</b>	<b>59,2</b>	<b>60,8</b>

**Leyenda:**

**Semanas de estudio: Semanas del 06/03/06 al 22/05/06 en las que se realizó las tomas de datos.**

**Requerido: Son las condiciones mínimas planteadas por la empresa proveedora de los químicos para garantizar el funcionamiento de las cubas de cromado.**

APÉNDICE E  
TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FISHER

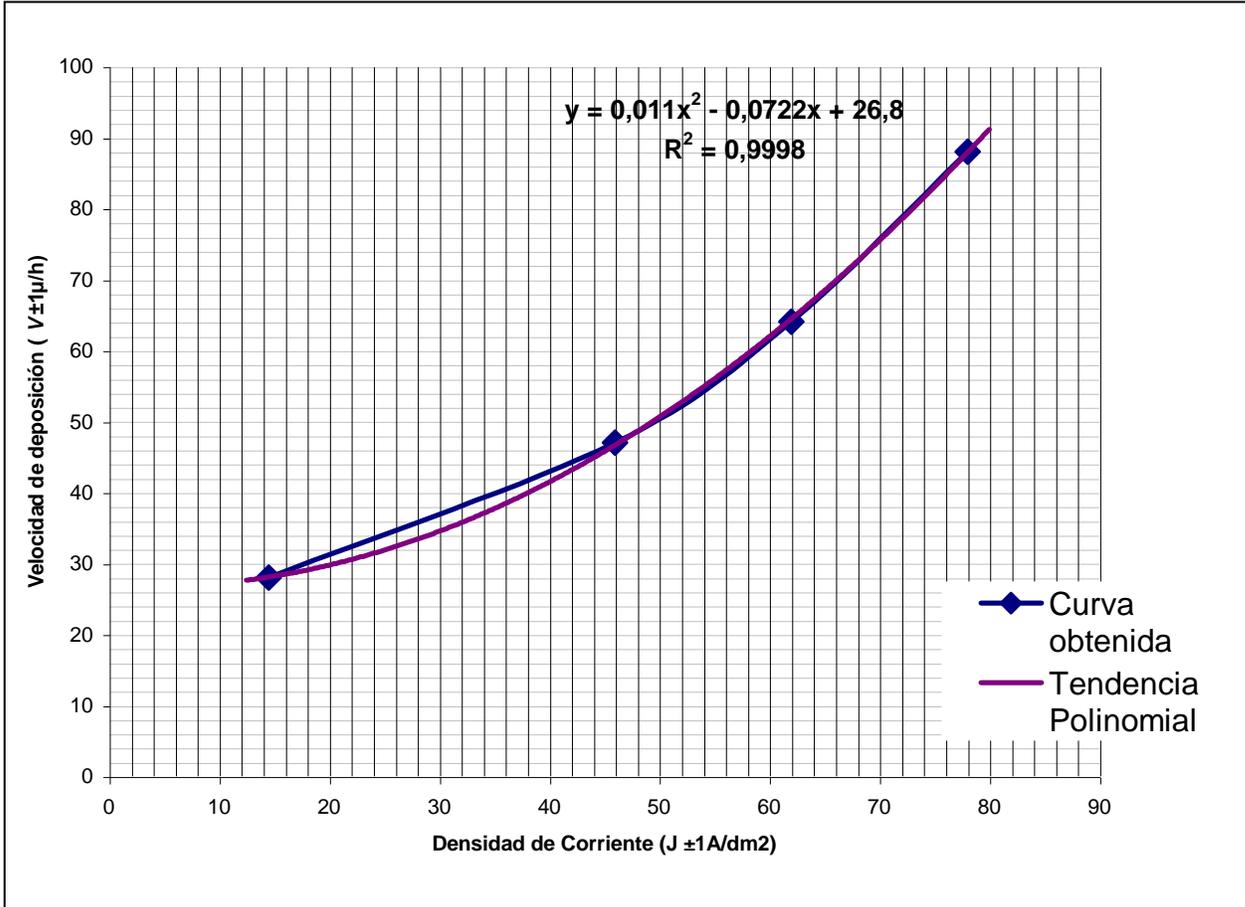
**DISTRIBUCIÓN DE FISHER TABULADO ( $F_{\alpha}$ )**

$\infty = 0.05$																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

APÉNDICE F  
CURVA DE VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE CROMO

**Figura AP.1**

GRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CROMADO EN UN PROCESO DE CROMO DURO





APÉNDICE G  
MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA A ESCALA PILOTO PARA EL CROMADO DE  
EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA A ESCALA PILOTO PARA EL CROMADO  
DE EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES**

Autores:

Lara B. Mayra V.

Glemnys K. Velazquez M.

Valencia, Noviembre de 2006

**INTRODUCCIÓN**

**El proceso de cromo duro es llevado a cabo por las empresas productoras de amortiguadores para vehículos con el fin de mejorar las propiedades físicas y químicas de los ejes de acero que conforman la estructura del amortiguador, el proceso electrolítico llevado a cabo por dichas empresas presentan un gran numero de**

**irregularidades que conllevan a la producción de piezas defectuosas y retardos en el proceso productivo de las mismas, por todo ello se plantea la posibilidad de aumentar la producción de ejes cromados para amortiguadores, por lo que se requiere el estudio de las variables influyentes en el proceso a fin de identificar y controlar dichas variables para garantizar de este modo un incremento en la productividad y capacidad de producción de la línea de cromado manteniendo los parámetros de calidad exigidos por el mercado.**

**Para llevar a cabo el estudio del proceso electrolítico se obtiene el diseño de una cuba a escala piloto por lo cual se publica un manual de operación con el fin de dar a conocer el funcionamiento del equipo, método operatorio y demás aspectos que se consideran como importantes para el usuario, ya que se plantea el uso en un futuro de la cuba a escala piloto por los estudiantes de la escuela de química de la facultad de ingeniería.**

Igualmente se adicionan aspectos como medidas de prevención, riesgos de contaminación, daños al organismo producto del cromo en la sangre. Todos ellos son aspectos importantes ya que el cromo es un agente altamente toxico y cancerigeno, y debe ser usado con precaución y conciencia, debido a ello es importante la inclusión dicha información en el manual para que el usuario tome conocimiento de los riesgos a los que se somete y las precauciones que debe tener consigo mismo y con el resto de las personas que estén cercanas al equipo.

## **CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CUBA A ESCALA PILOTO**

Las variables que influyen en el proceso son la temperatura, el tiempo de cromado, la concentración de cromo-catalizador, la concentración de tensoactivo y la intensidad de corriente aplicada tanto a los ejes de acero como a los ánodos de plomos que conforman la celda electrolítica.

- *LA TEMPERATURA*

La temperatura del baño de cromo en la cuba a escala industrial se plantea en un rango de (60-70)°C, siendo esta considerada como constante en el proceso, ya que una disminución de la temperatura por debajo del rango podría ocasionar que el proceso de electrodeposición no se lleve a cabo, por otra parte un aumento exagerado de la temperatura del baño ocasiona un recalentamiento de las piezas involucradas en el proceso generando así depósitos quemados y defectos en la capa de deposición en la superficie del eje.

Por medidas de seguridad se plantea la temperatura como un parámetro invariable y se estable en 65°C, la cual es posible mantener fijar con ayuda del controlador de temperatura instalado en el equipo, el cual se encarga de medir y registrar durante el proceso de cromado, a fin de enviar la orden a la resistencia de el momento en que debe encender o apagar, manteniendo la temperatura relativamente fija el tiempo que dure el cromado de la pieza.

- *LA INTENSIDAD DE CORRIENTE*

Esta es determinada haciendo uso de las graficas de velocidad de deposición para el proceso del cromo duro, teóricamente la intensidad de corriente a ser aplicada es de 12 Amperios pero a partir de la experiencia practica se estable en 6 amperios a fin de evitar que el deposito de la superficie se queme quedando una apariencia opaca y produciendo un cromado defectuoso

- *LA CONCENTRACIÓN CROMO-CATALIZADOR*

La concentración de la solución cromo-catalizador, la cual se encuentra en una relación 75:1, queda establecida en 240g/L, siendo esta la concentración estándar para el logro de un cromado optimo a lo largo de la superficie del eje y que cumple con los parámetros de calidad implementados por las empresas productoras de amortiguadores Dicha concentración podría variar dependiendo de los estudios que se deseen plantear a partir del uso de la cuba diseñada.

- *LA CONCENTRACIÓN DE TENSOACTIVO*

La concentración del tensoactivo queda establecida en 560mL, dicha concentración podría variar en los estudios posteriores a fin de analizar aun mas la influencia del mismo sobre el proceso, pero cabe destacar que una adición exagerada del tensoactivo puede ocasionar impedimentos en el proceso electrolítico ya que pasaría a actuar como un inhibidor del proceso o como un agente contaminante de la solución electrolítica.

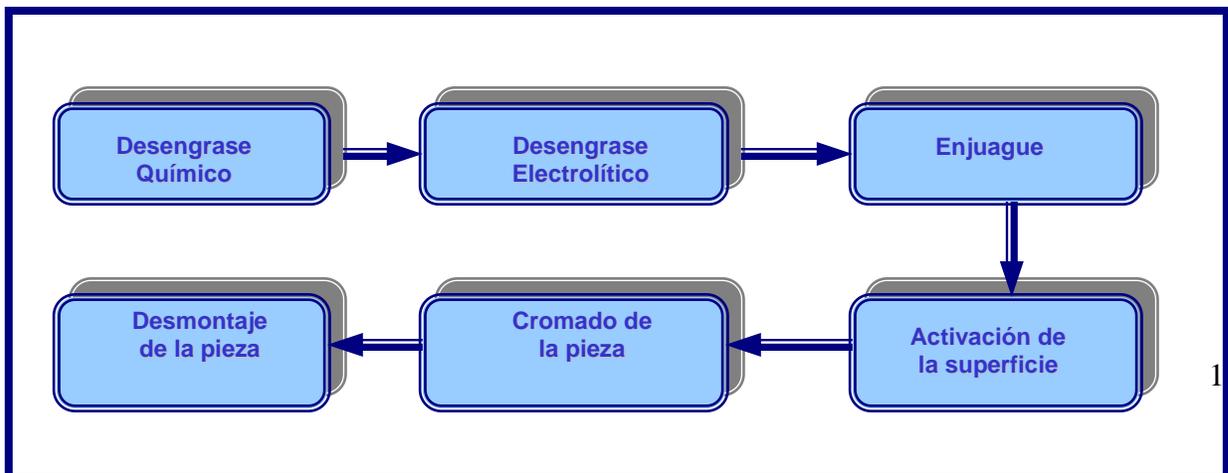
- **TIEMPO DE CROMADO**

El tiempo de cromado a partir de los cálculos de la velocidad de deposición inicialmente queda establecido en 32 minutos, pero al ocurrir una disminución de la intensidad de corriente este debe aumentar en la misma proporción, es decir al reducir el amperaje a la mitad, es necesario duplicar el tiempo de cromado a 64 minutos.

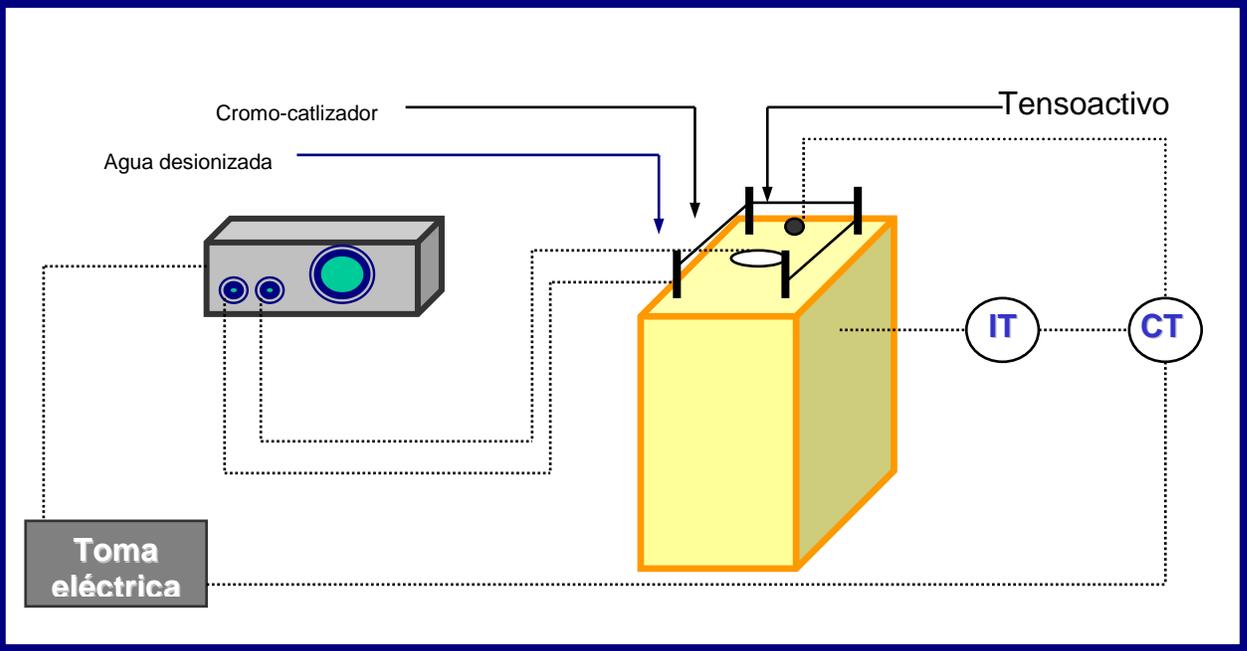
El tiempo es una variable que puede sufrir alteraciones pasando a formar parte de nuevos estudios que involucren la optimización del proceso en el tiempo, a fin de aumentar las piezas cromadas sin disminuir la calidad del depósito de cromo en la superficie del eje de acero.

### DIAGRAMAS DE LA CUBA A ESCALA PILOTO

A continuación se presentan los diagramas de flujo del proceso y del equipo que representan el diseño y secuencia de uso de la cuba a escala piloto



**Figura AP.2**  
**Diagrama de flujo del proceso de cromado a escala piloto**



**Figura AP.3**  
**Diagrama del equipo de cromado a escala piloto**

**AQUÍ VA EL PROCEDIMIENTO, SE ENCUENTRA EN EL ARCHIVO  
PROCEDIMIENTO DE CROMADO A ESCALA PILOTO**

## MEDIDAS PREVENTIVAS

- Al realizar la preparación de la solución cromo-catalizador es necesario el uso de guantes y mascarar para evitar la contaminación por contacto o inhalación de la solución, ya que el cromo es una agente altamente contaminante.
- No deben existir personas ajenas a la experiencia practica que puedan ser contaminadas por contacto o inhalación, todo aquel que se encuentre cerca de la sustancia sólida o líquida debe poseer guantes y mascarar protectoras.
- De existir contacto directo con la sustancia cromo-catalizador se debe realizar un lavado con detergente y posteriormente con desengrase químico a unos 20°C de temperatura.
- En caso de ingestión de la solución electrolítica no provocar el vómito, ingerir grandes cantidades de agua o leche, y acudir rápidamente a un sitio de asistencia médica urgente.
- La experiencia práctica debe ser llevada a cabo en una campana extractora disponible en los laboratorios de la universidad a fin de minimizar la contaminación por inhalación de las personas cercanas a la cuba.
- Se debe usar ropa y zapatos que cubran la mayor parte de la superficie de la piel a fin de evitar la contaminación al derrame accidental durante la puesta en marcha y realización del experimento.
- No se deben exceder los rangos de temperatura de la solución electrolítica, porque aunque el equipo soporte temperaturas mayores no es aconsejable, ya que se podrían producir fracturas en las paredes de la cuba.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A**

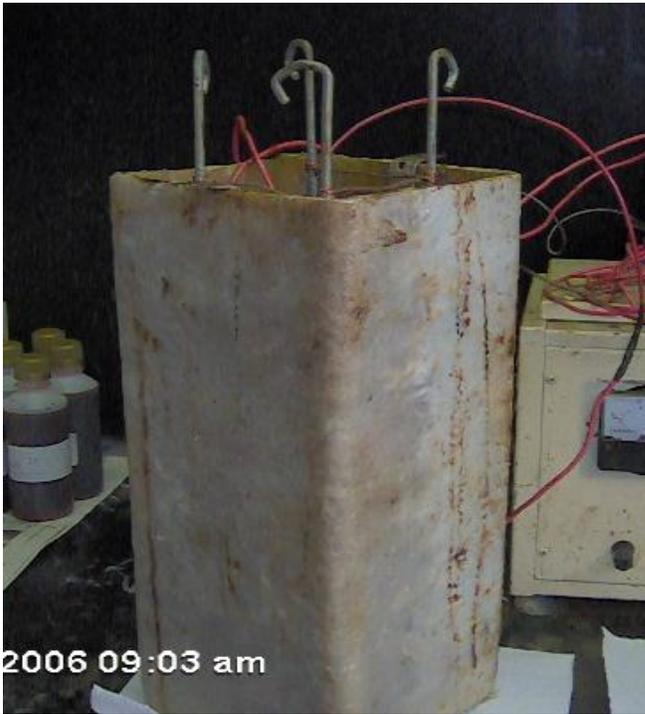
**EQUIPOS QUE CONFORMAN LA CUBA A ESCALA PILOTO PARA EL PROCESO DE CROMADO DE EJES DE ACERO PARA AMORTIGUADORES**



**Figura AN.1**  
**Controlador e Indicador de**  
**Temperatura**

**Figura AN.2**  
**Fuente de poder utilizada en la cuba de**  
**la escala piloto**





**Figura AN.3**  
**Cuba a escala piloto del proceso de cromado de ejes de acero**

**Figura AN.4**  
**Vista desde arriba de la cuba a escala piloto del proceso de cromado de ejes de acero**





**Figura AN.5**

**Ánodos de plomo de la cuba de cromado de ejes de acero para amortiguadores**

**Figura AN.6**

**Tornillo micrométrico utilizado en la medición de los diámetros de los ejes de acero para amortiguadores**





**Figura ANA.7**

**Tester utilizado en la medición del Amperaje aplicado a los ánodos y eje de acero durante el proceso de cromado**

**Figura AN.8**

**Ejes de acero una vez sometidos al proceso de cromado bajo las condiciones estándar**



**ANEXO B**

**SOLUCIONES UTILIZADAS EN EL PROCESO DE CROMADO A ESCALA PILOTO**



**Figura AN.9**

**Sustancia sólida cromo-catalizador**

**Figura AN.10**

**Baños de limpieza de la superficie  
del eje antes de ser sometidos al  
proceso de cromado**





**Figura AN.11**  
**Preparación de la solución**  
**chromo-catalizador**

**Figura AN.12**  
**Titulación de la solución de chromo-**  
**catalizador**

