

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

**“DISEÑO DE UNA PLANTA PARA EL ESMALTADO  
PORCELÁNICO DE PIEZAS DE ACERO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
QUÍMICA**

**ANDREA ALEJANDRA VACA VILLACIS  
andreina.vaca@gmail.com**

**DIRECTOR: VÍCTOR H. GUERRERO, Ph.D.  
victor.guerrero@epn.edu.ec**

**CODIRECTORA: LORENA JARAMILLO, M.Sc.  
lorena.jaramillo@epn.edu.ec**

**Quito, Julio 2015**

©Escuela Politécnica Nacional 2015  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Andrea Alejandra Vaca Villacis, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado todas las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Andrea Alejandra Vaca Villacis

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrea Alejandra Vaca Villacis, bajo nuestra supervisión.

---

Víctor H. Guerrero, Ph.D  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Lorena Jaramillo, M.Sc.  
**CODIRECTORA DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi mami Cecilia por ser una mujer integra y luchadora que me acompaño en toda esta etapa, brindándome su cariño; sin su apoyo y comprensión no lo hubiera logrado.

A mi hermana Kary y mi abuelita Lola por ser parte de mi vida, por su apoyo, por haberme brindado su amor, comprensión y compañía en todos los momentos de mi vida.

Al Ing. Luis Mera por ser el mentor del presente proyecto y aunque no pude culminar con su dirección, siempre conté con su apoyo, amistad y colaboración en el desarrollo del presente proyecto.

Al Dr. Víctor Hugo Guerrero y a la Ing. Lorena Jaramillo por haber compartido sus conocimientos, así como también por la excelente dirección en el presente proyecto.

A mis amigos Gaby, Vero, Adry, Dany, Raúl, Alex, Chente, Mary, Ely gracias amigos por su compañía y ayuda en los momentos de dificultades. Edison gracias por estar ahí apoyándome con tus conocimientos y amistad en todo momento. Además agradezco a todos los miembros de la FEPON por su amistad y apoyo, que aunque no los nombre, siempre los llevaré en mi corazón, sin duda he aprendido mucho de todos ustedes y marcan un antes y un después en mi vida.

## **DEDICATORIA**

*Dedico el presente trabajo a mi mami Cecilia por ser una mujer integra, trabajadora y luchadora que siempre supo con su fortaleza sacarme adelante a pesar de las vicisitudes que se presentaron. Gracias por estar conmigo siempre, tus valores me han forjado como persona y es el más grande regalo que me pudiste dar.*

*A mi hermana Kary y mi abuelita Lola por brindarme su amor día con día.*

*A mis amigos Gaby, Vero, Dany, Edison y Raúl por estar siempre conmigo en los momentos de dificultad, gracias por escucharme, aconsejarme, brindarme su amistad y sacarme una sonrisa día a día, cuenten conmigo, porque más que amigos son mis hermanos de corazón.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

		PÁGINA
	RESUMEN	xiii
	INTRODUCCIÓN	xvi
1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1	Esmaltado de piezas de acero	3
	1.1.1 Esmalte porcelánico	4
	1.1.2 Procesos de esmaltación	6
1.2	Diseño de equipos para el esmaltado de piezas	13
	1.2.1 Conceptos preliminares	13
	1.2.1.1 Esfuerzo cortante	13
	1.2.1.2 Viscosidad	14
	1.2.1.3 Fluidos no newtonianos y viscosidad aparente	15
	1.2.1.4 Fluidos pseudoplásticos	16
	1.2.1.5 Tanques agitados	17
	1.2.1.6 Impulsores o agitadores	18
	1.2.1.7 Consumo de potencia	19
	1.2.2 Sistema de aspersion y recolección	19
	1.2.2.1 Aspersion con aire	20
	1.2.2.2 Compresores	21
	1.2.2.3 Ciclo de compresión	22
	1.2.3 Secado y diseño de un secador	24
	1.2.3.1 Humedad de equilibrio y libre	25
	1.2.3.2 Humedad ligada y humedad no ligada	26
	1.2.3.3 Cinética del secado	26
	1.2.3.4 Mecanismo y método del secado	29
	1.2.3.5 Equipo para secado	29
	1.2.3.5.1 Secadores de bandejas	30
	1.2.3.5.2 Secadores indirectos al vacío con anaqueles	30
	1.2.3.5.3 Secadores continuos de túnel	31
	1.2.3.5.4 Secador rotatorio	31
	1.2.3.5.5 Secador de tambor	32
	1.2.3.5.6 Secador por aspersion	33
	1.2.4 Diseño de hornos	33
	1.2.4.1 Funcionamiento de un horno	34
	1.2.4.1.1 Combustión	36
	1.2.4.1.2 Poder calorífico	36
	1.2.4.2 Consideraciones básicas para el dimensionamiento de un horno	37
	1.2.4.2.1 Método Lobo y Evans	38
	1.2.4.2.2 Métodos Wilson, Lobo y Hottel	38
	1.2.4.2.3 Métodos Orrok-Hudson	39

1.2.4.3	Tipos de hornos	39
1.2.4.3.1	Horno cilíndrico vertical	39
1.2.4.3.2	Horno de sección recta	40
<b>2</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>41</b>
2.1	Dimensionamiento del equipo utilizado en la preparación de la suspensión del esmalte	43
2.2	Dimensionamiento del equipo utilizado en la aplicación de la suspensión del esmalte por el método de aspersion	46
2.3	Diseño del proceso de secado de las piezas recubiertas con esmalte crudo	47
2.3.1	Determinación de la curva de secado	48
2.3.1.1	Preparación de la suspensión porcelánica	48
2.3.1.2	Determinación de la estabilidad de la suspensión porcelánica	50
2.3.1.3	Aplicación de la suspensión por aspersion, secado de las piezas esmaltadas	52
2.3.1.4	Diseño del secador	53
2.4	Dimensionamiento del horno para la cocción del esmalte y que se caliente por combustión de cascarilla de arroz	54
2.4.1	Cálculo de la transferencia de calor en la sección radiante	55
2.4.2	Cálculo de la transferencia de calor en la sección convectiva	56
2.4.3	Cálculo del poder calorífico de la cascarilla de arroz	57
2.5	Evaluación preliminar del costo del proceso de esmaltado	58
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>59</b>
3.1	Dimensionamiento del tanque agitado para la preparación de la suspensión porcelanica	60
3.2	Dimensionamiento del equipo utilizado en la aplicación de la suspensión del esmalte por el método de aspersion	63
3.3	Diseño del proceso de secado de las piezas recubiertas con esmalte crudo	71
3.3.1	Estudios de sedimentación de la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47	71
3.3.2	Diseño del proceso de secado a temperatura ambiente	73
3.3.3	Diseño del proceso de secado a temperatura de 110°C	81
3.3.3.1	Determinación de la velocidad de secado	87
3.3.3.2	Dimensionamiento de la cabina de secado controlada	90
3.4	Dimensionamiento del horno para la cocción del esmalte y que se caliente por combustión de cascarilla de arroz	92
3.4.1	Determinación del poder calorífico	92
3.4.2	Balance térmico en el horno de cocción de las piezas de acero	98



3.4.3	Dimensionamiento de la cámara de combustión	100
3.5	Evaluación preliminar del costo del proceso de esmaltado	108
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>124</b>
4.1	Conclusiones	124
4.2	Recomendaciones	127
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>129</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>139</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.1.</b> Aplicaciones del acero esmaltado	1
<b>Figura 1.2.</b> Etapas de la preparación de las piezas metálicas	6
<b>Figura 1.3.</b> Etapas de la cocción de las piezas esmaltadas	8
<b>Figura 1.4.</b> Diagrama de flujo de bloques (BFD) del proceso de producción de las piezas metálicas esmaltadas	11
<b>Figura 1.5.</b> Flujo de capas de un fluido	15
<b>Figura 1.6.</b> Clasificación de los fluidos según la relación $\tau = f(\gamma)$	17
<b>Figura 1.7.</b> Partes de un tanque agitado	18
<b>Figura 1.8.</b> Patrón de flujo en un tanque agitado sin deflectores	19
<b>Figura 1.9.</b> Sistema de aspersion	21
<b>Figura 1.10.</b> Compresores típicos: a) compresor de desplazamiento positivo bilobular; b) compresor centrifugo de succión simple	22
<b>Figura 1.11.</b> Ciclo de compresión ideal	23
<b>Figura 1.12.</b> Ciclo de compresión teórico	23
<b>Figura 1.13.</b> Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases	25
<b>Figura 1.14.</b> Humedad libre en función del tiempo	27
<b>Figura 1.15.</b> Curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre a condiciones constantes	28
<b>Figura 1.16.</b> Secador de bandejas	30
<b>Figura 1.17.</b> Secador continuo de túnel: a) secador de carretillas con flujo de aire a contracorriente, b) secador de banda transportadora con circulación cruzada	31
<b>Figura 1.18.</b> Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo	32
<b>Figura 1.19.</b> Secador de tambor rotatorio	32
<b>Figura 1.20.</b> Diagrama de flujo para una unidad de secado por aspersion	33

<b>Figura 1.21.</b>	Esquema de funcionamiento de un horno	34
<b>Figura 1.22.</b>	Zonas principales de un horno	35
<b>Figura 1.23.</b>	Principales tipos de hornos	40
<b>Figura 2.1.</b>	Dimensiones de la turbina y el tanque agitado	44
<b>Figura 2.2.</b>	Cálculo del número de potencia mediante el gráfico de $N_p$ vs $N_{Re}$ para líquidos pseudoplástico	45
<b>Figura 2.3.</b>	Homogenización de las materias primas para la preparación de la suspensión porcelánica S/L: 53/47	50
<b>Figura 2.4.</b>	Columna de sedimentación de vidrio para las pruebas de estabilidad de la suspensión porcelánica S/L: 53/47	51
<b>Figura 2.5.</b>	a) Piezas metálicas limpias en el soporte para el esmaltado, b) Piezas metálicas esmaltadas	53
<b>Figura 3.1.</b>	Diagrama del tanque agitado	63
<b>Figura 3.2.</b>	Cámara de aplicación y base giratoria	65
<b>Figura 3.3.</b>	Cuarto de esmaltado	66
<b>Figura 3.4.</b>	Compresor	70
<b>Figura 3.5.</b>	Curva de sedimentación de la suspensión porcelánica S/L: 53:47	72
<b>Figura 3.6.</b>	Ensayo de secado para las tres piezas esmaltadas a temperatura ambiente	77
<b>Figura 3.7.</b>	Ensayo de secado a temperatura ambiente	77
<b>Figura 3.8.</b>	Carrito transportador	79
<b>Figura 3.9.</b>	Cámara de secado a temperatura ambiente	80
<b>Figura 3.10.</b>	Ensayo de secado para las tres piezas esmaltadas a 110°C	84
<b>Figura 3.11.</b>	Ensayo de secado a 110°C	86
<b>Figura 3.12.</b>	Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el ensayo a 110 °C	88
<b>Figura 3.13.</b>	Proceso de secado de las piezas esmaltadas	89

<b>Figura 3.14.</b> Horno	102
<b>Figura 3.15.</b> PFD (Process Flow Diagram) de la planta de esmaltado de piezas de acero	103
<b>Figura 3.16.</b> Costos de producción de las piezas esmaltadas	109
<b>Figura AI.1.</b> Piezas metálicas cilíndricas	140
<b>Figura AI.2.</b> Variación de la densidad con respecto a la concentración de suspensiones de material vítreo tamaño -200+325	142
<b>Figura AI.3.</b> Cálculo del número de potencia mediante el gráfico de $N_p$ vs. $N_{Re}$ para líquidos pseudoplástico	148
<b>Figura AII.1.</b> Monograma para el cálculo del diámetro de tuberías	153
<b>Figura AII.2.</b> Nomograma para la determinación de pérdidas de carga localizadas	154
<b>Figura AII.3.</b> Catálogo de la tubería	155
<b>Figura AII.4.</b> Eficiencias típicas de compresores recíprocos	156
<b>Figura AIV.1.</b> Catálogo secador tipo cabina	165
<b>Figura AV.1.</b> TGA muestra cascarilla de arroz de Agrocomexport Cía. Ltda.	167
<b>Figura AV.2.</b> Flujo de calor en la sección radiante	169
<b>Figura AV.3.</b> Radiación entre un plano y una o más hileras de tubos paralelas al plano	175
<b>Figura AVI.1.</b> Preparación de materias primas	178
<b>Figura AVI.2.</b> Preparación de botellas	179
<b>Figura AVI.3.</b> Preparación de esmalte porcelánico	180
<b>Figura AVI.4.</b> Preparación de piezas de acero	180
<b>Figura AVI.5.</b> Proceso de Esmaltado	181
<b>Figura AVI.6.</b> Metodología del dimensionamiento del tanque y agitador	182
<b>Figura AVI.7.</b> Metodología del dimensionamiento de los equipos utilizados en la aplicación del esmalte	183
<b>Figura AVI.8.</b> Metodología del diseño del proceso de secado	184

<b>Figura AVI.9.</b> Metodología de la caracterización de la cascarilla de arroz y obtención de la masa requerida en el proceso de la cocción	185
<b>Figura AVI.10.</b> Metodología del dimensionamiento del horno tipo caja	185

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.1.</b>	Especificaciones de la planta de esmaltado de piezas de acero	2
<b>Tabla 1.2.</b>	Importación total de ollas y artículos similares durante el año 2014	3
<b>Tabla 1.3.</b>	Escala de producción de ollas esmaltadas	3
<b>Tabla 1.4.</b>	Componentes básicos de un esmalte porcelánico	4
<b>Tabla 1.5.</b>	Porcentaje de los diferentes componentes de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47	5
<b>Tabla 1.6.</b>	Propiedades fisicoquímicas de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47	6
<b>Tabla 1.7.</b>	Ventajas y desventajas de los métodos de aplicación de la suspensión porcelánica	7
<b>Tabla 1.8.</b>	Parámetros y normas empleados para el control de calidad comúnmente de piezas esmaltadas	10
<b>Tabla 1.9.</b>	Composición de la cascarilla de arroz	13
<b>Tabla 2.1.</b>	Valores típicos de $\gamma$	47
<b>Tabla 3.1.</b>	Alternativa tecnológica de los procesos de la planta de esmaltado	59
<b>Tabla 3.2.</b>	Peso de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47 requerido para la capacidad de la planta	60
<b>Tabla 3.3.</b>	Pesos de cada uno de los componentes para la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47 requeridos para la capacidad de la planta	61
<b>Tabla 3.4.</b>	Dimensiones del tanque agitado para la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47	61
<b>Tabla 3.5.</b>	Especificaciones del agitador o impulsor	62
<b>Tabla 3.6.</b>	Datos generales sobre las condiciones de aplicación de la suspensión porcelánica S/L 53:47	64
<b>Tabla 3.7.</b>	Dimensiones de la cámara de aplicación	64
<b>Tabla 3.8.</b>	Consideraciones de diseño para cálculo de tuberías	67

<b>Tabla 3.9.</b>	Caudal de aire comprimido requerido	67
<b>Tabla 3.10.</b>	Dimensiones de la tubería utilizada en el sistema de distribución de aire comprimido	67
<b>Tabla 3.11.</b>	Características de compresor y depósito acumulador	68
<b>Tabla 3.12.</b>	Características técnicas de compresor y depósito de aire comprimido	69
<b>Tabla 3.13.</b>	Resultados ensayo de sedimentación de la suspensión S/L: 53: 47	71
<b>Tabla 3.14.</b>	Pesos registrados de las piezas esmaltadas	73
<b>Tabla 3.15.</b>	Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura ambiente	74
<b>Tabla 3.16.</b>	Contenido de humedad de los ensayos de secado a temperatura ambiente	75
<b>Tabla 3.17.</b>	Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura ambiente	76
<b>Tabla 3.18.</b>	Condiciones del proceso de secado de piezas esmaltadas a temperatura y presión ambiental	78
<b>Tabla 3.19.</b>	Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura de 110°C	81
<b>Tabla 3.20.</b>	Contenido de humedad de los ensayos de secado a temperatura de 110°C	82
<b>Tabla 3.21.</b>	Peso del sólido seco obtenido en el ensayo de secado a temperatura de 110°C	83
<b>Tabla 3.22.</b>	Humedad de equilibrio $X^*$ obtenido en el ensayo de secado a temperatura de 110°C	83
<b>Tabla 3.23.</b>	Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura de 110°C	85
<b>Tabla 3.24.</b>	Condiciones del proceso de Secado de piezas esmaltadas a temperatura de 110°C	86
<b>Tabla 3.25.</b>	Condiciones del proceso de secado de piezas esmaltadas a temperatura de 110°C	87
<b>Tabla 3.26.</b>	Parámetros del aire seco que circula en el secador	90

<b>Tabla 3.27.</b>	Parámetros de la transferencia de calor calculados	91
<b>Tabla 3.28.</b>	Especificaciones del alambre de ignición Ni-Cr	92
<b>Tabla 3.29.</b>	Resultados de los ensayo para la determinación del poder calórico del ácido benzoico en la bomba calorimétrica	93
<b>Tabla 3.30.</b>	Poder calorífico del ácido benzoico	94
<b>Tabla 3.31.</b>	Resultados de los ensayo para la determinación del poder calórico de la cascarilla de arroz en la bomba calorimétrica	96
<b>Tabla 3.32.</b>	Poder calorífico experimental de la cascarilla de arroz	97
<b>Tabla 3.33.</b>	Caracterización cascarilla de arroz	97
<b>Tabla 3.34.</b>	Consideraciones de cálculo para el dimensionamiento del horno tipo caja	98
<b>Tabla 3.35.</b>	Resultados balance energético en el horno tipo caja	100
<b>Tabla 3.36.</b>	Consideraciones sobre la tubería de la sección radiante del horno tipo caja	101
<b>Tabla 3.37.</b>	Nomenclatura y simbología de los equipos utilizados en el PFD	104
<b>Tabla 3.38.</b>	Nomenclatura de líneas en el recorrido del producto en el plano layout	108
<b>Tabla 3.39.</b>	Costos totales por piezas	110
<b>Tabla 3.40.</b>	Tiempos de operación en cada uno de los procesos y actividades	111
<b>Tabla 3.41.</b>	Simbología de acciones	112
<b>Tabla 3.42.</b>	Cronograma de actividades en la planta de esmaltado de piezas de acero	112
<b>Tabla 3.43.</b>	Disponibilidad de los equipos	114
<b>Tabla 3.44.</b>	Costo de los equipos principales utilizados en los procesos de esmaltado de las piezas de acero	115
<b>Tabla 3.45.</b>	Requerimientos de materia prima para el proceso de preparación de la suspensión porcelánica con S/L 53:47	116
<b>Tabla 3.46.</b>	Agua requerida para el proceso de producción de a suspensión porcelánica con relación S/L 53:47	116



<b>Tabla 3.47.</b>	Costo de piezas de acero previo esmaltado	117
<b>Tabla 3.48.</b>	Precio de consumo de energía eléctrica en el proceso de producción	117
<b>Tabla 3.49.</b>	Precio de diésel consumido en los procesos de secado a temperatura de 110°C y cocción	118
<b>Tabla 3.50.</b>	Costo anual de la fuerza de trabajo requerida en el proceso de esmaltado de piezas de acero	118
<b>Tabla 3.51.</b>	Tiempo de las actividades de los operarios	119
<b>Tabla 3.52.</b>	Costos anuales de producción de la planta de esmaltado de piezas de acero	120
<b>Tabla 3.53.</b>	Producción de las piezas esmaltadas y precio de venta	121
<b>Tabla 3.54.</b>	Datos generales empleados para el análisis económico de la planta a escala piloto	121
<b>Tabla 3.55.</b>	Flujo de caja del proyecto para 10 años	122
<b>Tabla 3.56.</b>	Parámetros financieros del análisis económico de la planta de esmaltado de piezas de acero	123
<b>Tabla AI.1.</b>	Variación de la densidad de la suspensión porcelánica S/L: 53:47 de acuerdo al tamaño de partícula	143
<b>Tabla AII.1.</b>	Longitud equivalente de los accesorios	153
<b>Tabla AIII.1.</b>	Resultados ensayo de sedimentación de la suspensión S/L 53:47	160
<b>Tabla AV.1.</b>	Valores típicos de la densidad promedio de flujo de calor en la zona radiante	168
<b>Tabla AV.2.</b>	Propiedades de la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47	170
<b>Tabla AV.3.</b>	Propiedades de las piezas metálicas	170

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Dimensionamiento del tanque agitado	140
<b>ANEXO II</b> Dimensionamiento del equipo usado en la aplicación del esmalte	150
<b>ANEXO III</b> Pruebas de estabilidad del esmalte	159
<b>ANEXO I</b> Diseño del proceso de secado de las piezas esmaltadas	161
<b>ANEXO V</b> Dimensionamiento del horno	166
<b>ANEXO VI</b> Esquemas	178
<b>ANEXO VII</b> Catálogos	186

## RESUMEN

El esmaltado es uno de los procesos más utilizados en el recubrimiento de piezas metálicas. El producto resultante (metal-esmalte) posee numerosas ventajas como: alta resistencia a: la corrosión, sustancias químicas y altas temperaturas. A nivel mundial se lo emplea principalmente en la elaboración de electrodomésticos, paneles utilizados en construcciones, recipientes a nivel doméstico e industrial, etc. En el Ecuador el uso es limitado y no existe una industria que realice este proceso, por lo cual artículos como electrodomésticos y cacerolas, que contienen partes metálicas esmaltadas, son importados. Es por eso que el presente trabajo tuvo como objetivo el diseño de una planta de esmaltado de piezas de acero, cuya producción podría reemplazar en gran parte las importaciones, disminuyendo la salida de capital del país.

En el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, se han realizado varios estudios sobre esmaltes porcelánicos, de los cuales se obtuvieron varias de las propiedades fisicoquímicas importantes en los cálculos realizados en el diseño de la planta. Se puede mencionar dos trabajos en primer lugar el “Estudio de la compatibilidad de suspensiones de esmalte porcelánico crudo con la superficie de piezas de acero” (Ibaza, 2013) del cual se obtuvo la relación sólido-líquido (S/L) que presentó la mejor compatibilidad con la superficie metálica y una estabilidad mayor al 80% en 5 h, además, en cuanto a las propiedades, se determinó la adherencia, captación y viscosidad. En segundo lugar el “Estudio del efecto de la presencia de arcillas y defloculantes en esmaltes porcelánicos en suspensión para recubrimientos de piezas de acero” (Santamaría Ortiz, 2009), del cual se obtuvo la densidad según el tamaño de partícula de los componentes de la suspensión porcelánica.

Entre los factores que fueron analizados para el diseño de la planta estuvieron el tipo de pieza a producir, la capacidad de producción, la formulación del esmalte, la dosificación de materias primas y los procesos de producción para el esmaltado de las piezas. En la planta se esmaltarán piezas de acero cilíndricas de 0,3 m de diámetro por 0,4 m de altura, con un área de 0,45 m<sup>2</sup>. Este tipo de pieza fue

seleccionada debido a sus características similares con los recipientes que se utilizan en laboratorios, industrias y en especial con los que son utilizados para la cocción de alimentos en las cocinas de inducción, que debido al cambio de la matriz energética se están reemplazando a las cocinas que utilizan GLP. La capacidad total de la planta será de procesar 100 m<sup>2</sup> por día, es decir 222 piezas. Esta producción corresponde a una a pequeña escala, debido a que es una propuesta nueva en el país.

Los procesos que intervienen en el esmaltado de las piezas de acero son la preparación de la suspensión porcelánica, la aplicación de la suspensión porcelánica en las piezas, secado de las piezas esmaltadas a temperatura ambiente y a 110 °C y finalmente la cocción de las piezas esmaltadas. Para el diseño de la planta de esmaltado fue necesario dimensionar los equipos que intervienen en los diferentes procesos de la planta para luego seleccionarlos mediante catálogos.

Se empleó un balance de masa para determinar la dosificación de las materias primas y las dimensiones del tanque agitado con un volumen de 0,2 m<sup>3</sup>; en el que se preparará el esmalte. Debido a que el esmalte utilizado es un fluido pseudoplástico, se encontró que el mejor tipo de agitador es de cuatro deflectores inclinados con un ángulo de 45°.

La aplicación del esmalte sobre las piezas metálicas se realizará mediante aspersión. Para esto se dimensionó un compresor con una potencia de 216,71 kW y un depósito de aire de 1,6 m<sup>3</sup>. Cabe recalcar que en el mercado se adquirirá un compresor de 220 kW y un depósito de aire de 2 m<sup>3</sup>. A partir de la capacidad de la planta y las dimensiones de cada pieza se dimensionó la cámara de esmaltado y el cuarto de esmaltado.

Para diseñar el proceso de secado de las piezas esmaltadas, se realizaron pruebas de secado a temperatura ambiente y a 110 °C. Con los datos registrados de dichas pruebas se calculó la humedad total y humedad libre, así como también la humedad a las condiciones de equilibrio y peso del sólido seco. Con los

mejores resultados de humedad en el proceso a temperatura de 110 °C se obtuvo la velocidad de secado en el punto crítico cuyo valor fue de 5,212 g H<sub>2</sub>O/min m<sup>2</sup>.

Se determinó que la capacidad de producción fue igual a 20 piezas esmaltadas por hora. Para este fin se dimensionaron dos cámaras de secado y dos secadores tipo cabina de 2,7 m de largo por 3,5 m ancho cada uno. Dichos equipos operarán en paralelo.

En el proceso de cocción de las piezas de acero se dimensionó un horno de 5,93 m de ancho por 5,30 m de largo que operará a 900 °C. Se calculó la longitud y diámetro de los tubos que serán colocados en la sección radiante del horno.

Para disminuir el costo de operación de la planta, se planteó usar cascarilla de arroz como combustible, ya que es un material considerado como desecho. Se calculó que se requerirá de 12,23 kg/h de cascarilla para la operación del horno. En el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria se determinó el poder calorífico de la cascarilla de arroz cuyo valor fue de 15 485,14 J/g. Con estos resultados se verificó que hay una disminución del 49 % en los costos de operación del horno, en comparación con el resultado de que si el equipo utilizará diesel como combustible.

Finalmente, se determinó que los costos totales de operación de la planta diseñada tienen un valor anual de 1 043 786,51 dólares, con un precio al público de 21,74 dólares por pieza esmaltada. Esto corresponde al costo de producción más un 20 % de ganancia. Además, se determinó que este proyecto tendrá una tasa interna de retorno (TIR) del 26% y un valor de \$211 065,59 correspondiente al valor actual neto (VAN). Por estas razones se concluyó que el presente proyecto es económicamente factible.

## INTRODUCCIÓN

El gobierno ecuatoriano ha impulsado proyectos para generación eléctrica a partir de fuentes renovables (Poveda-Bonilla, Espín-Tobar, y Tapia, 2013, pp. 3,4). Uno de estos proyectos es la construcción de centrales hidroeléctricas. Por lo que, en los últimos años se ha iniciado la implementación de las cocinas de inducción, equipos que utilizan recipientes con materiales ferromagnéticos (acero y hierro) para la cocción de los alimentos (Indurama, 2015). Este tipo de recipientes, ollas esmaltadas, entre otros como cocinas son importadas, según los datos del Banco Central.

El acero esmaltado tiene diversas aplicaciones, en el sector industrial en equipos como tanques, reactores, silos, calderas, etc., o en la vida cotidiana con la aplicación en superficies de trabajo de electrodomésticos como cocinas, cacerolas, refrigeradoras, etc. Este material compuesto es apreciado por ser químicamente inerte y de fácil limpieza por su escasez de porosidad, además que ofrece superficies inocuas y libres de microorganismos con una resistencia a la corrosión y a altas temperaturas (Arcelor Mittal, 2008, p. 5 y Vitrispan, 2014).

En el área de investigación del Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Química se han realizado diversas investigaciones sobre suspensiones porcelánicas que se aplican por vía húmeda. De dichas investigaciones se han obtenido como resultado varias propiedades y características no sólo del esmalte sino también del proceso de esmaltado. Debido a esto y a la importancia en el presente documento se realizará el diseño de la planta de esmaltado de piezas de acero.

En el Ecuador no existen plantas de esmaltado o procesos similares que se hayan diseñado o puesto en marcha. La mayoría de productos que contengan material esmaltado como el acero son importados. Por esta razón, en este trabajo se siguió un proceso de diseño en el que se determinan los requerimientos de diseño y se formularon las especificaciones de los principales equipos en cada uno de las unidades del proceso.

Una vez diseñada la planta, se evaluó económicamente la solución propuesta con una de capacidad de producción de 20 piezas esmaltadas por hora, los costos totales de implementación y la rentabilidad de la planta. Se evidenció que los procesos que más energía consumían, y por lo tanto con mayor costo de operación, son los del secado y el de cocción. Por lo que se planteó el uso de cascarilla de arroz como combustible del horno para el proceso de la cocción, debido a su bajo costo, disminución de los gases invernaderos y alta eficiencia energética (Urquiza, Acero, y Rodríguez, 2011, p. 4).

# 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la actualidad, el acero esmaltado se lo puede encontrar como parte de diversos productos que son utilizados tanto en la vida cotidiana como: electrodomésticos, cacerolas esmaltadas, cuartos de baño, paneles, señalética, así como también en equipos industriales como: tanques, silos, calderas, calentadores de agua entre otras aplicaciones (ArcelorMittal, 2008, p. 5; Vitrispan, 2014).



**Figura 1.1.** Aplicaciones del acero esmaltado  
(ArcelorMittal, 2008; VITREX, 2009)

El acero esmaltado tiene numerosas características que son resultado de la unión de las propiedades de los dos materiales que lo constituyen, de esta manera el acero contribuye con su resistencia mecánica, y el esmalte contribuye con su inalterabilidad. El esmalte presenta una superficie que no contiene poros por lo que convierte al material en inocuo y de fácil limpieza, además de brindar un excelente acabado estético de la superficie de la pieza (ArcelorMittal, 2008, p. 6).

Según sea la forma de la pieza a esmaltar, se escoge el método de aplicación, es así que, para piezas de forma muy compleja se aplicará la suspensión porcelánica mediante inmersión. Para piezas de menor complejidad como recipientes cilíndricos, una forma eficaz de aplicar el esmalte es mediante aspersion.



El Gobierno ecuatoriano ha venido impulsando el cambio de la matriz energética en el país, el objetivo es que el país utilice al menos un 90 % de las fuentes renovables de la matriz de generación eléctrica (Poveda-Bonilla, Espín-Tobar, y Tapia, 2013, pp. 3,4). Por lo que se han impulsado varios proyectos como la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas con el fin de reemplazar el uso de combustibles de origen fósil. En el sector residencial y comercial del país, este cambio se lo verá principalmente en el reemplazo de las cocinas que utilizan GLP por las cocinas de inducción. Este electrodoméstico genera un campo electromagnético para producir la cocción de los alimentos por lo que se necesita de recipientes con materiales ferromagnéticos (acero y hierro) (Indurama, 2015). Dichos recipientes por sus características y exposición continua a la humedad y diversos productos se deterioran a mayor velocidad, debido a esto se debe pensar en un tipo de recubrimiento que alargue su vida útil.

El presente proyecto se enfocará a tomar como producto tipo y para efectos de comparar la producción en términos de viabilidad económica, a piezas de acero cilíndricas que pueden ser utilizadas en varios ámbitos ya sea en el laboratorio, industria, vida doméstica, etc. Ya que este tipo de recipiente normalmente se los puede encontrar en el mercado. En la Tabla 1.1 se muestra las dimensiones del producto tipo y capacidad de la planta, con las cuales más adelante se definirán y detallarán las diferentes unidades que intervienen en el proceso y número de operarios.

**Tabla 1.1.** Especificaciones de la planta de esmaltado de piezas de acero

Dimensiones piezas cilíndricas	Diámetro = 0,3 m, altura = 0,4 m
Capacidad de la planta	100 m <sup>2</sup> de acero esmaltado por día
Total piezas esmaltadas	222 piezas por día
Horas de producción por día	16 h por día
Turnos de producción	2 de 8 h cada uno

Según el Banco Central del Ecuador, y como se muestra en la Tabla 1.2, el total de importaciones de ollas es de 1 049,15 ton/año y de cocinas es de 204,94 ton/año respectivamente. Además, en la Tabla 1.3 se muestra la escala de

producción de ollas que se puede lograr. Los procesos ya sea a pequeña o gran escala industrial, no presentan grandes diferencias en sí, excepto en los equipos e instalaciones (capacidad y automatización del proceso) con los que se cuenta. De manera preliminar se puede decir que la capacidad impuesta para el diseño de la planta, se encuentra en el rango de microempresa a pequeña empresa, es decir se tiene una producción a pequeña escala.

**Tabla 1.2.** Importación total de ollas y artículos similares durante el año 2014

<b>SUBPARTIDA NANDINA</b>	<b>Descripción</b>	<b>Toneladas</b>	<b>FOB – dólar</b>	<b>CIF - dólar</b>	<b>% Total FOB - dólar</b>
7615102000	Las demás ollas, sartenes y artículos similares	1 049,15	7 628,07	7 919,28	100,00
	<b>TOTAL GENERAL:</b>	<b>1 049,15</b>	<b>7 628,07</b>	<b>7 919,28</b>	<b>100,00</b>
8516602000	COCINAS	204,94	2 108,41	2 203,18	100,00
	<b>TOTAL GENERAL:</b>	<b>204,94</b>	<b>2 108,41</b>	<b>2 203,18</b>	<b>100,00</b>

\* (Banco Central del Ecuador, 2014)

**Tabla 1.3.** Escala de producción de ollas esmaltadas

Microempresa/artesanal	Menor de 31 200 piezas/anuales
Pequeña empresa	De 31 200 a 33 600 piezas/anuales
Mediana empresa	De 336 000 a 720 000 piezas/ anuales
Gran empresa	Más de 720 000 piezas/anuales

(Instituto Nacional del Emprendedor, 2015)

## 1.1 ESMALTADO DE PIEZAS DE ACERO

El esmalte es una masa vítrea solidificada sobre una superficie metálica por diferentes procesos: fusión o sinterización (Vielhaber, 2002, p. 3), y es precisamente a ese proceso de adhesión esmalte-metal a lo que se denomina esmaltado. Se cree que el esmaltado de chapa de acero inició en la primera

década del siglo XIX, y se encuentra presente principalmente en joyería u orfebrería y en general en artículos de decoración (Vielhaber, 2002, p. 5). La ciencia de los materiales ha desarrollado diversos tipos de recubrimientos metálicos entre los que se puede mencionar recubrimientos poliméricos, galvanizado, pinturas, geles, suspensiones porcelánicas, etc. El tipo de recubrimiento aplicado es según sea el uso y el tipo de protección que se le quiera dar a la pieza (Lira, Gonzáles y Rodulfo, 2011, p. 3).

### 1.1.1 ESMALTE PORCELÁNICO

El esmalte o suspensión porcelánica es una composición inorgánica integrada por óxidos, principalmente óxidos-silicatos ( $\text{SiO}_2$ ), que son característicos de los materiales vítreos (Gómez y Barrera, 2002, p. 525), entre otros óxidos metálicos tal como se puede observar en la Tabla 1.4 y una serie de aditivos como carboximetilcelulosa y cloruro de amonio que le dan las propiedades reológicas y fisicoquímicas adecuadas a la suspensión en el proceso de esmaltado como: estabilidad, opacidad, viscosidad y adherencia (Ibaza p. xvii).

**Tabla 1.4.** Componentes básicos de un esmalte porcelánico

	Hierro fundido	Acero
$\text{SiO}_2$	30-40 %	65-70 %
$\text{B}_2\text{O}_3$	12-20 %	3-5 %
Óxidos alcalinos	12-20 %	20 %
Óxidos alcalinos de tierra	2-6 %	3-5 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3-5 %	4-5 %
Ti-, ZnO	15-30 %	5-15 %

(Behler y Nose, 2007, p. 7)

El esmaltado es usado en procesos en los que el estrés físico y químico puede dañar la pieza metálica sin ningún recubrimiento (Behler y Nose, 2007, p. 5). Entre las múltiples propiedades del esmalte, se pueden citar las siguientes (Reves Consult, 2012; Wang, 2009 p. 4640):

- Alta resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia a las agresiones químicas (ácidos y bases), agentes oxidantes y gases corrosivos.
- Resistencia mecánica de las superficies esmaltadas.
- Resistencia a los choques térmicos (al calor y al frío), a altas temperaturas por encima de los 200 °C.
- Resistencia al fuego.
- Comportamiento estéril ante agentes biológicos, lo cual aporta propiedades de higiene y lavabilidad, superficie acristalada.
- Resistencia a la radiación ultravioleta e infrarroja.
- La constante dieléctrica incrementa de 6 a 12, en el rango de temperatura de 120 °C a 150 °C.

En el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, se han realizado varios estudios para determinar la mejor formulación que se ajuste a las propiedades fisicoquímicas requeridas. En la Tabla 1.5 se muestra la formulación de la suspensión porcelánica con relación sólido-líquido (S/L) 53:47 que presenta la mayor estabilidad, adherencia y viscosidad según (Ibaza, 2013, pp. 35,99,100,101).

**Tabla 1.5.** Porcentaje de los diferentes componentes de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje en la suspensión porcelánica (%)</b>
Vidrio	96,4
Bentonita	3
Tripolifosfato de sodio puro	0,5
Carboximetilcelulosa pura	0,1
Agua (g)	47

\*La formulación del esmalte se basa en los estudios y análisis realizados en (Ibaza, 2013, pp. 35,99,100,101)

En la Tabla 1.6 se muestran las propiedades fisicoquímicas de viscosidad y velocidad de la suspensión porcelánica. La densidad se determinó del promedio de varias suspensiones porcelánicas que presentaban diferentes tamaños de partícula (Santamaría Ortiz, 2009, pp. 114, 115). Los cálculos de la densidad se muestran en el ANEXO I y los resultados se muestran en la Tabla AI. 1.

**Tabla 1.6.** Propiedades fisicoquímicas de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47

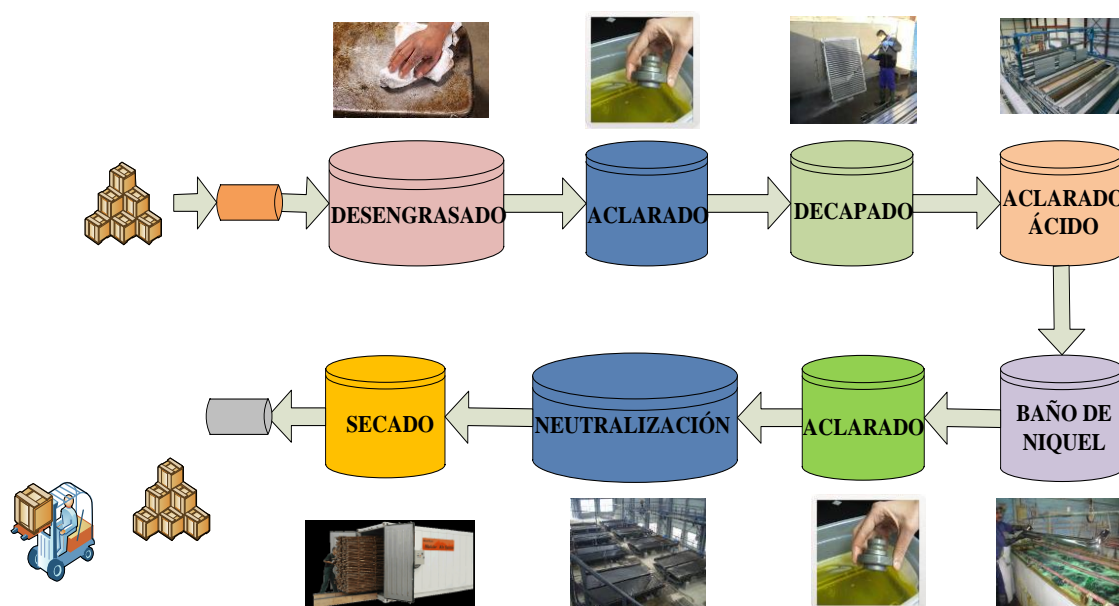
Propiedades de la Suspensión Porcelánica	
*Viscosidad (mPa.s)	292
*Velocidad de corte (rpm)	100
**Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1500

\*Según (Ibaza, 2013, pp. 74,101)

\*\*Calculado de (Santamaría Ortiz, 2009, pp. 114,115)

### 1.1.2 PROCESOS DE ESMALTACIÓN

La esmaltación de las piezas metálicas comprende múltiples procesos como son (ArcelorMittal, 2008, p. 14):



**Figura 1.2.** Etapas de la preparación de las piezas metálicas

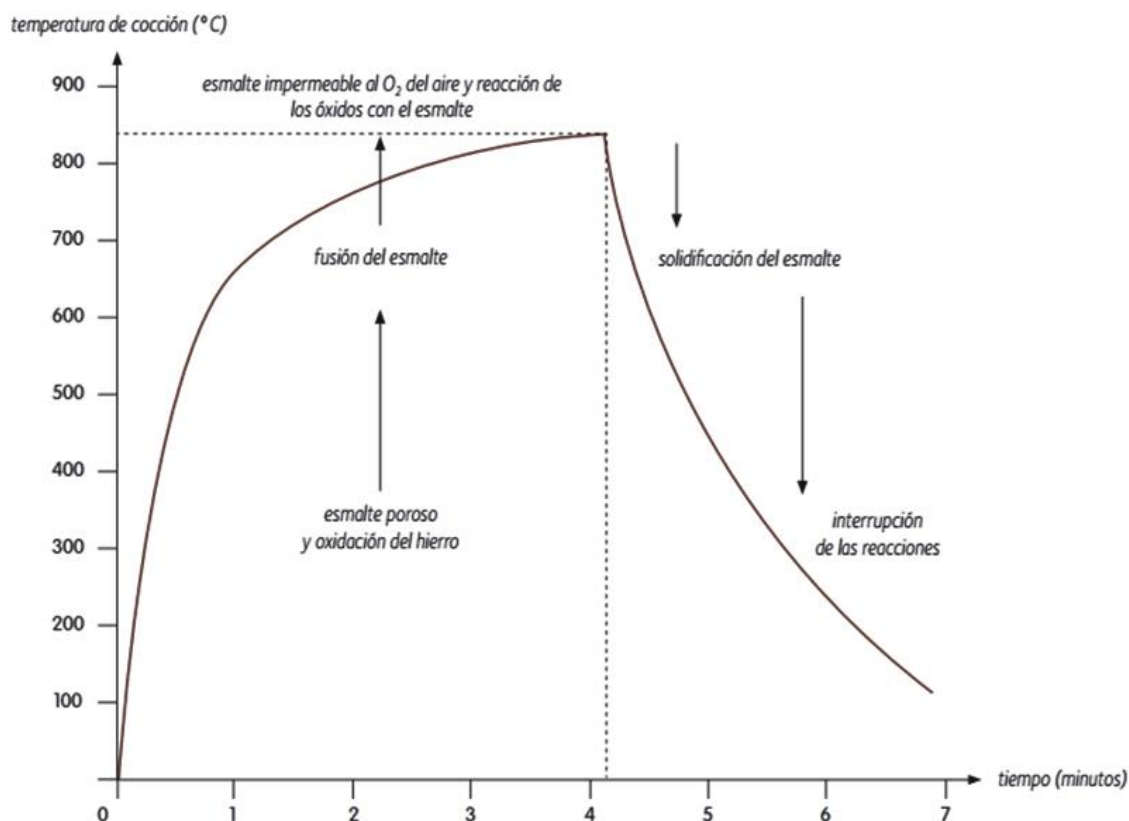
- **Preparación superficial de la pieza**, este tratamiento tiene el fin de obtener una superficie limpia óptima para la aplicación de la suspensión porcelánica.
- **Preparación del esmalte**, esta etapa consiste en el pesado, dosificación y mezcla de las materias primas previamente reducidas a un mismo tamaño de partícula.
- **Esmaltado de la pieza metálica**, esta etapa consiste en la aplicación de la suspensión porcelánica sobre la pieza metálica limpia y seca. Existen diversos métodos de aplicación del esmalte por vía húmeda. En la Tabla 1.7 se muestra los diferentes métodos, sus ventajas y desventajas.

**Tabla 1.7.** Ventajas y desventajas de los métodos de aplicación de la suspensión porcelánica

MÉTODO	VENTAJA	DESVENTAJA
Aplicación por inmersión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor de esmalte regular.</li> <li>- Para piezas de geometría compleja.</li> </ul>	El esmalte se puede escurrir y producir sobre espesores.
Flow coating	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor de esmalte regular.</li> </ul>	
Aplicación por aspersión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para piezas de geometría compleja</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	El esmalte se puede escurrir y producir sobre espesores.
Aplicación electrostática	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor de esmalte regular.</li> <li>- No se produce desperdicios</li> </ul>	Método costoso

(ArcelorMittal, 2008)

- **Secado de piezas esmaltadas**, en esta etapa se produce la eliminación de la humedad que se encuentra en la pieza esmaltada, esta humedad se encuentra entre el 40 % al 50 % de la composición de la suspensión porcelánica. Este proceso es necesario realizar previo a la cocción de las piezas, dado que el cambio brusco de temperatura puede ocasionar fallas en la pieza como el golpe de uña o retracción del esmalte.
- **Cocción a alta temperatura**, este proceso se lleva a cabo a temperaturas de entre los 750 °C y 950 °C (Behler y Nose, 2007, p. 7). La cocción de las piezas esmaltadas comprende varias etapas como se puede observar en la Figura 1.3 en las que mediante varias reacciones químicas se da la adherencia entre el esmalte y la pieza metálica.



**Figura 1.3** Etapas de la cocción de las piezas esmaltadas  
(ArcelorMittal, 2008, p. 20)

La calidad de los productos esmaltados depende en mayor proporción de la adhesión entre el esmalte sobre un sustrato de acero no recubierto. Esta adhesión se da gracias a múltiples reacciones químicas que se producen durante la etapa de la cocción y el enfriamiento. Este proceso puede dividirse en cuatro etapas como se puede observar en la Figura 1.3 (ArcelorMittal, 2008, p. 20; Baldwin C., y Feldman S., 2007, pp. 6,7):

- **1ª etapa:** hasta 550 °C. El hierro contenido en el acero se oxida por el ingreso de H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub> del aire al esmalte poroso. Se forma una capa de óxido de hierro en la interfaz entre el esmalte y el acero. Se difunde el hidrógeno atómico y se recombina para formar hidrógeno molecular, que ocupa los intersticios existentes en el acero.
- **2ª etapa:** entre 550 °C y 830 °C. Se ablanda el esmalte y se produce la fusión del esmalte. Se forma una capa semipermeable, que limita los

intercambios de gases con la atmósfera. El esmalte disuelve el óxido de hierro que se encuentra en la interfaz de esmalte-acero.

- **3ª etapa:** en torno a 830 °C. Se producen reacciones químicas de oxidación-reducción entre la capa de óxido de hierro, los óxidos metálicos del esmalte y el acero. Precipita la aleación de Fe-Ni-Co en la interfaz esmalte-acero, esto da lugar a la adherencia del esmalte sobre el acero, cuya rugosidad aumenta la adherencia. El oxígeno disuelto se recombina con el carbono del acero generando la liberación de gases (CO, CO<sub>2</sub>).
- **4ª etapa:** enfriamiento. Se solidifica el esmalte y se detiene el intercambio de gases. Como la solubilidad del hidrógeno decrece con la disminución de la temperatura, el H<sub>2</sub> se sobresatura en el acero, ubicándose bajo la capa del esmalte. Si no se controla la cantidad de H<sub>2</sub> puede ocurrir la aparición de defectos de golpe de uña.

El proceso tecnológico del esmaltado no solo debe tener en cuenta la formulación y el tipo de suspensión porcelánica, sino también los procesos de producción. Estos procesos determinan la estructura interna del acero esmaltado y por lo tanto las características de la superficie (Fu y Faust, 2000, p. 25). Es por eso que sobre el producto terminado, es importante llevar un control de calidad, proceso en el que se debe medir ciertos parámetros como adherencia, resistencia a la abrasión y a choques térmicos, etc. En la Tabla 1.8 se puede observar tanto la norma usada, así como un extracto del método utilizado.

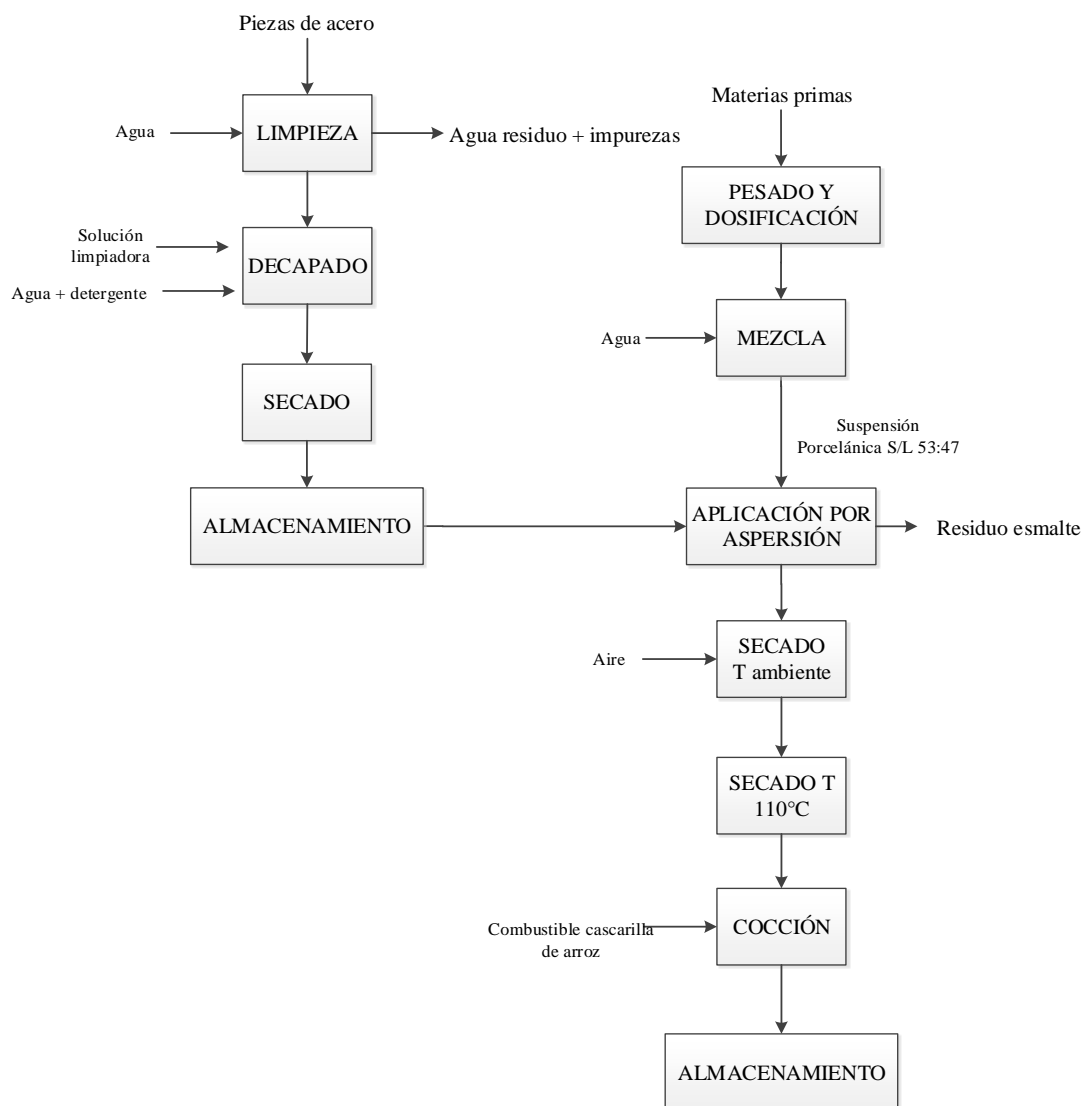


**Tabla 1.8.** Parámetros y normas empleados para el control de calidad comúnmente de piezas esmaltadas

Parámetro	Norma	Método
Resistencia al agua	ASTM C282. "Acid Resistance of Porcelain Enamels (Citric Acid Spot Test)"	Se verifica si la pieza no presenta corrosión debida a la humedad del ambiente. Se sumerge la pieza esmaltada en un baño de ácido cítrico al 10% durante 15 minutos, se lava, y se ve el efecto.
Adherencia	ASTM C313-53T. "Standard Test Method for Adherence of Porcelain Enamel and Ceramic Coatings to Sheet Metal"	Se mide las fracturas o la deformación de la superficie esmaltada provocadas por la aplicación de una fuerza.
Espesor de esmaltado	ASTM C664. "Standard Test Method for Thickness of Diffusion Coating"	Se mide el cambio de inductancia de la bobina con la proximidad de la superficie metálica y la capa de esmalte
Color	ASTM D 2244 "Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates"	Se mide la longitud de onda que refleja el esmalte.
Resistencia a la abrasión	ASTM C448. "Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Porcelain Enamels"	Primero determinar la resistencia a la abrasión de esmaltes porcelánicos sin abrasión (el 45° brillo especular es más de 30 unidades de brillo). Segundo determinar la resistencia a la abrasión de esmaltes porcelánicos (el 45° sin abrasión brillo especular es 30 unidades de brillo o menos). Tercero, medir la resistencia de esmaltes porcelánicos con abrasión.
Choques térmicos	ASTM C 385. "Standard Test Method for Thermal Shock Resistance of Porcelain-Enameled Utensils"	Se somete a la pieza esmaltada a choques térmicos que van desde los 205°C o 605°C hasta 0 °C y se verifica si existen fallos en la pieza.

(The ceramic coating company, 2012)

Las operaciones que intervienen en la producción de las piezas metálicas esmaltadas en el presente trabajo son: preparación de la superficie metálica, preparación del esmalte, aplicación del esmalte por el método de aspersión (debido al costo y forma de la pieza), secado a temperatura ambiente, secado a temperatura de 110 °C y la cocción a alta temperatura (Ibaza, 2013, pp. 33-49). En el diagrama de flujo de bloque (BFD por sus siglas en inglés) de la Figura 1.4 se muestra a mayor detalle los procesos que no sólo intervienen en el esmaltado, sino también en los procesos de preparación de las materias primas suspensión porcelánica y piezas metálicas.



**Figura 1.4.** Diagrama de flujo de bloques (BFD) del proceso de producción de las piezas metálicas esmaltadas

Dentro de los procesos de producción de las piezas esmaltadas, un factor importante es la temperatura ya que es la que regula la cinética del proceso de el secado y la cocción (Gómez y Barrera, 2002, p. 525). Es por eso que el diseño del proceso de secado es fundamental para obtener piezas esmaltadas con las características estéticas requeridas y que éstas no presenten fallas al momento de ingresar al siguiente proceso que es la cocción. En el proceso de la cocción de las piezas esmaltadas es donde se da la fusión esmalte-metal. Se considera que para llevar adecuadamente este proceso el horno debe tener una temperatura entre los 800 °C y 900 °C para los esmaltes de fondo y entre los 750 °C y 850 °C para los esmaltes de cubierta (Vielhaber, 2002, p. 29).

El proceso de la cocción es el de mayor demanda energética dentro de la planta de esmaltado de piezas de acero. Para disminuir los costos de operación del horno se plantea como alternativa de combustible, el uso de cascarilla de arroz. La cascarilla de arroz es uno de los subproductos considerados como desechos de la agricultura que son difíciles de eliminar, por lo que existen varias alternativas para su uso (Urquizo, Acero, y Rodriguez, 2011, p. 2).

La cascarilla de arroz utilizada como biocombustible tiene varias ventajas para la industria dentro de las que se puede mencionar:

- Al reutilizar los residuos del cultivo de arroz significa la disminución de la emisión de gases contaminantes como: CO<sub>2</sub>, compuestos sulfurados o nitrogenados (Urquizo, Acero, y Rodriguez, 2011, p. 4).
- Al reemplazar el uso de los combustibles de origen fósil por los biocombustibles existe una reducción considerable en los costos de operación, debido al bajo costo de este tipo de residuos. Además, la cascarilla de arroz aportará con la energía necesaria para llegar a la temperatura requerida por el proceso ya que posee una eficiencia muy similar a la de los combustibles de origen fósil esto en base a los valores de poder calorífico de un combustible como el diesel y la cascarilla de arros (Quiceno Villada y Mosquera Gutierrez, 2010, pp. 68,69,70).

En la Tabla 1.9 se muestra la composición química de la cascarilla de arroz entre otros parámetros como humedad, % cenizas, % volátiles, poder calorífico inferior y superior.

**Tabla 1.9.**Composición de la cascarilla de arroz

C (%)	39,60
H (%)	4,94
N (%)	1,83
S (%)	0,40
O (%)	37,52
K (%)	0,25
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	0,10
Humedad (%)	7,41
Ceniza (%)	19,39
Volátiles (%)	57,09
Carbono Fijo (%)	16,11
PCS MJ/Kg	15,58
PCI MJ/Kg	14,42

(Echeverria. y López , 2010, pp. 63,67,73)

## **1.2 DISEÑO DE EQUIPOS PARA EL ESMALTADO DE PIEZAS**

Con el fin de realizar el diseño la planta de esmaltado de piezas metálicas es necesario dimensionar los equipos que intervienen en las diferentes operaciones unitarias del proceso, para posteriormente seleccionar de catálogos los equipos que mejor se ajusten al proceso. A continuación se presentará los principales elementos que se requieren para tal efecto.

### **1.2.1 CONCEPTOS PRELIMINARES**

#### **1.2.1.1 ESFUERZO CORTANTE**

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de esfuerzos cortantes, por pequeño que sea este esfuerzo (Duarte y Niño, 2004, pp. 1-7). La fuerza por unidad de área necesaria para mover un fluido se denomina

esfuerzo cortante y es proporcional a la gradiente de velocidad (Ramírez Navas, 2006, p. 11).

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{dv}{dy} \quad [ 1.1 ]$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad [ 1.2 ]$$

Donde:

$\tau$ , es el esfuerzo cortante (N/m<sup>2</sup>)

$\dot{\gamma}$ , es la velocidad de deformación (s<sup>-1</sup>)

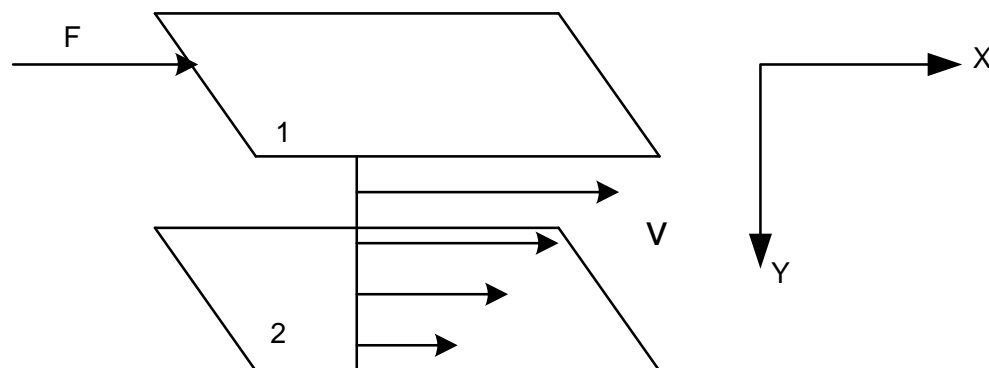
$F$ , es la fuerza (N)

$A$ , es el área (m<sup>2</sup>)

$\mu$ , es la viscosidad absoluta o dinámica (Pa.s)

### 1.2.1.2 VISCOSIDAD

Es la propiedad de los fluidos en movimiento que da lugar a fuerzas que se oponen al flujo relativo de capas contiguas en el fluido. Esta propiedad disminuye a medida que se incrementa la temperatura y decrece la presión. La velocidad con la que las capas de un líquido fluyen aumenta a medida que crecen las distancias de las capas del líquido en dirección normal a las paredes de una tubería (Ramírez Navas, 2006, p. 17).



**Figura 1.5.** Flujo de capas de un fluido

Cuando una capa infinitesimal del líquido fluye con velocidad uniforme en relación a una capa adyacente, como se puede observar en la Figura 1.5 se origina una fuerza tangencial  $F$ , que es proporcional al área  $A$  de la capa y de la gradiente  $\frac{dv}{dx}$ , medida en dirección normal a la del flujo del líquido (Ramírez Navas, 2006, p. 17).

$$F = A\mu \frac{dv}{dx} \quad [ 1.3 ]$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de proporcionalidad o viscosidad.

### 1.2.1.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS Y VISCOSIDAD APARENTE

La viscosidad aparente  $\eta$  es el término usado hablar de fluidos no newtonianos. Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

$$\mu = \frac{\dot{\gamma}}{\tau} \quad [ 1.4 ]$$

Se denominan fluidos no newtonianos a aquellos que no siguen la ley de Newton, ya que su viscosidad, a cierta temperatura y presión, es función del gradiente de la velocidad de deformación. Para este tipo de fluidos la velocidad de deformación no es proporcional al esfuerzo cortante (Ramírez Navas, 2006, p. 33).

Los fluidos no-newtonianos independientes del tiempo, se caracterizan porque los esfuerzos tangenciales dependen únicamente de la velocidad de deformación. Estos fluidos necesitan de un valor mínimo de esfuerzo cortante para entrar en movimiento (Ramírez Navas, 2006, p. 34).

$$\tau=f(\dot{\gamma}) \quad [ 1.5 ]$$

#### 1.2.1.4 FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS

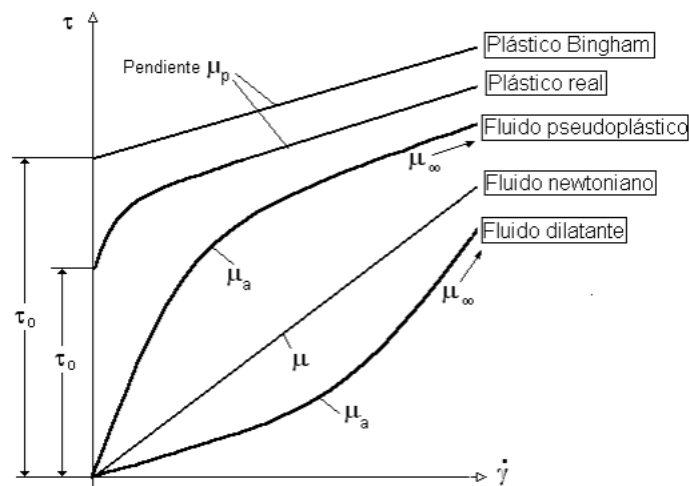
Los fluidos pseudoplásticos son un tipo de fluidos no newtonianos que no requieren de un esfuerzo cortante para que comiencen a deformarse. En estos fluidos el valor de la viscosidad está dado por la pendiente de la curva  $\tau=f(\dot{\gamma})$ , la cual es mayor para bajas  $\dot{\gamma}$  y menor con altas  $\dot{\gamma}$  hasta alcanzar un valor asintótico de  $\mu_{\infty}$  constante (Ibarrola, 2009, p. 5). Como se puede observar en la Figura 1.6. La ley potencial o de Ostwald es la relación que describe el comportamiento de este tipo de fluidos y está dada por la expresión:

$$\tau=K' \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad [ 1.6 ]$$

o

$$\tau=k\dot{\gamma}^n \quad [ 1.7 ]$$

La constante k es el índice de consistencia y el exponente n mide la desviación respecto al fluido con comportamiento newtoniano. A n se lo suele llamar índice de comportamiento, este valor siempre será menor a 1 (Ibarrola, 2009, p. 11).

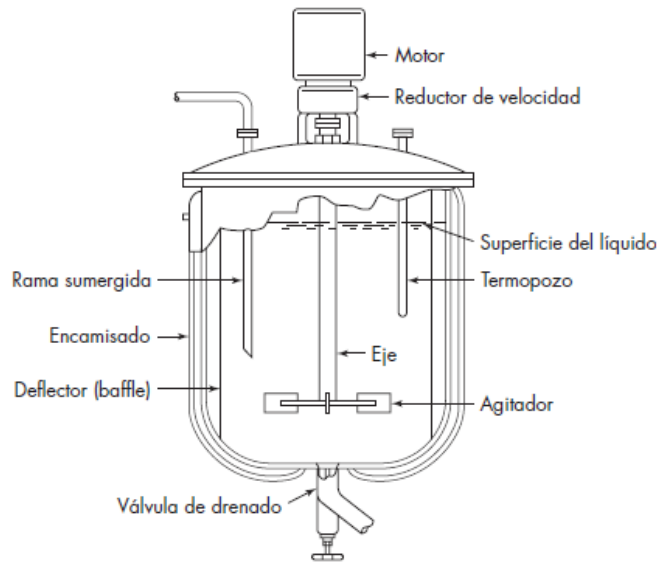


**Figura 1.6.** Clasificación de los fluidos según la relación  $\tau=f(\dot{\gamma})$   
(Ibarrola, 2009, p. 4)

### 1.2.1.5 TANQUES AGITADOS

Los tanques agitados son recipientes, por lo general de forma cilíndrica (cerrado o abierto), provistos de un agitador mecánico acoplado en un eje vertical accionado por un motor eléctrico. En la Figura 1.7 se muestra el diseño estándar, en el cual, el fondo del recipiente debe ser redondeado, para evitar que el fluido no ingrese en las esquinas o regiones agudas. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del recipiente. Este tipo de equipos puede llevar acoplados accesorios como: líneas de entrada y salida, serpentines, chaquetas con dispositivos de medición de la temperatura (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 260).





**Figura 1.7.** Partes de un tanque agitado  
(McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 260)

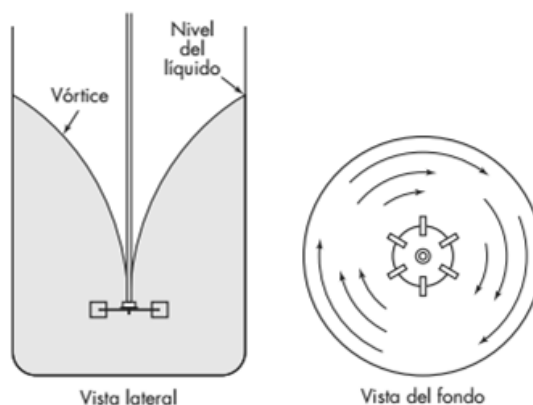
### 1.2.1.6 IMPULSORES O AGITADORES

Este tipo de dispositivos se utilizan para crear un patrón de flujo dentro del sistema, el fluido circula por todo el recipiente. El fluido dentro de un tanque agitado puede generar diferentes patrones de flujo los mismos que dependen de varios factores:

- Tipo de impulsor
- Características del líquido: viscosidad
- Tamaño y las proporciones del recipiente: deflectores y el agitador

En recipientes de gran tamaño que poseen agitadores verticales, el método más conveniente para disminuir el vórtice, como se puede observar en la Figura 1.8, es instalar deflectores verticales perpendiculares en la pared del tanque. Este tipo de dispositivo impide que el flujo rotacional interfiera con el flujo radial o longitudinal lo que causa turbulencia. En la industria existe una gran diversidad de agitadores, que dependen del tipo de producto que se quiera obtener. Estos dispositivos se dividen en dos clases: los que producen corrientes paralelas al eje del impulsor denominados impulsores de flujo axial y los que producen corrientes

en dirección radial o tangencial denominados impulsores de flujo radial. Para los fluidos muy viscosos, los impulsores más utilizados son los de hélice y agitadores de anclaje (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 261).



**Figura 1.8.** Patrón de flujo en un tanque agitado sin deflectores  
(McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 265)

### 1.2.1.7 CONSUMO DE POTENCIA

Un factor importante en el diseño de este tipo de equipos es el consumo de energía, el mismo que no puede predecirse teóricamente dado que depende de las variables del sistema como las variables geométricas la composición, características del fluido (densidad, viscosidad, etc.) y el tipo de flujo. Por ejemplo cuando el tipo de flujo es turbulento, la potencia se calcula a partir del producto del flujo producido por el impulsor y la energía cinética por unidad de volumen. Se han determinado expresiones empíricas basadas en el análisis dimensional (Gelmi, 2006, p. 93).

### 1.2.2 SISTEMA DE ASPERSIÓN Y RECOLECCIÓN

La aplicación del esmalte en la superficie metálica involucra varias operaciones, las mismas que tienen por objeto colocar y transformar una fina película en estado

líquido a un estado sólido por medio de la operación de secado y cocción de las piezas ya esmaltadas (Giundice y Pereyra, p. 1). Cabe recalcar que en la fase de aplicación es importante manejar las temperaturas adecuadas de operación adecuadas, que se encuentran en un rango de entre 15 °C – 32 °C (EL NERVION, S.A., p. 1).

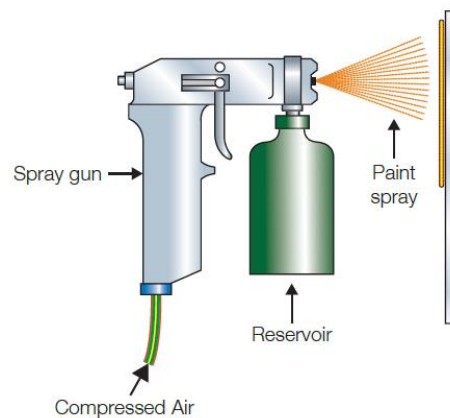
El sistema de aplicación depende de las propiedades fisicoquímicas de la suspensión porcelánica y de su compatibilidad con la superficie metálica, previamente preparada (limpia y seca). En la actualidad, existen una gran diversidad de métodos para la aplicación de los recubrimientos, por su gran eficiencia el más utilizado es el método de aspersion de aire (EL NERVION, S.A., p. 1). Este método asegura que el esmalte será aplicado en toda el área de la pieza con la menor pérdida posible de la suspensión porcelánica (EISENMANN, 2015, p. 6).

### **1.2.2.1 ASPERSIÓN CON AIRE**

Este método consiste del uso y la combinación de una pistola de aspersion, boquillas y un compresor de aire, lo que lo hace versátil. La adecuada combinación de presiones y boquillas, permite la aplicación de fluidos de diferentes densidades y viscosidades. Al aplicar la suspensión porcelánica por este método se debe considerar la distancia entre la pistola y la superficie la cual oscilará entre los 15 cm y 20 cm. Además, se debe emplear la mínima presión capaz de atomizar la suspensión de manera uniforme. La pistola en el momento de la aplicación debe mantenerse siempre perpendicular a la superficie a esmaltar. Se considera que la pérdida de la sustancia aplicada por aspersion con aire es de 25 % a 35 % (EL NERVION, S.A., p. 1), cuyo espesor por capa varía entre 80 mm y 150 mm (Giundice y Pereyra, p. 12). El método de aspersion con aire utiliza:

- Soplete o pistola atomizadora
- Compresor

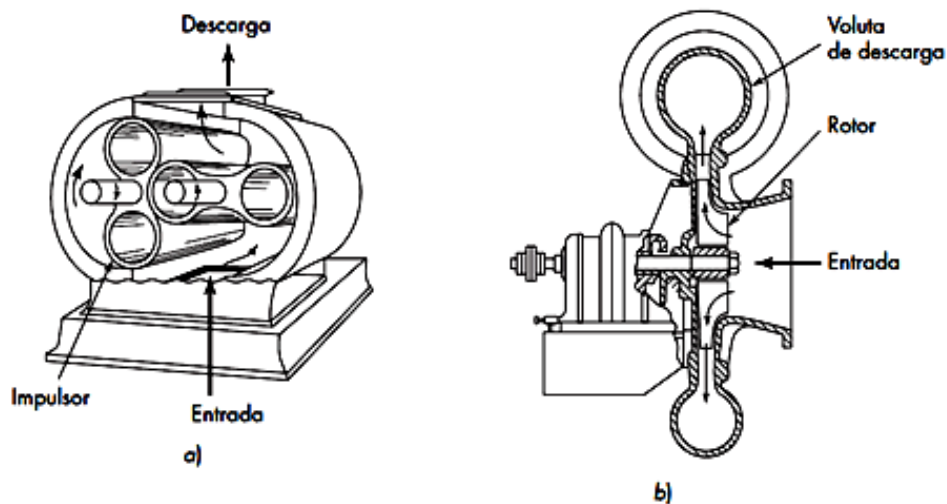
La pistola atomizadora se utiliza para la pulverización a baja presión, emplea aire comprimido el mismo que produce un efecto de arrastre y transporta el esmalte hacia la superficie metálica. La relación cuantitativa entre el esmalte y el aire varía según la presión empleada. El caudal del esmalte dependerá de la abertura de la boquilla de la pistola además de las propiedades de viscosidad y densidad y la presión de trabajo (Giundice y Pereyra, p. 12).



**Figura 1.9** Sistema de aspersión  
(Ashby, 2011, p. 387)

### 1.2.2.2 Compresores

Estos equipos son utilizados para el transporte de gases comprimidos para lo que elevan la presión del fluido (Gelmi, 2006, p. 73). Los compresores de desplazamiento positivo no suministran incrementos significativos en el flujo con caídas en la presión de descarga. Además, de que deben poseer válvulas de alivio o sistemas de cierre. En cambio, los compresores centrífugos si presentan variaciones importantes y deben poseer sistemas de control de oscilación del equipo. Para la compresión a bajas presiones el tipo más utilizado es el compresor rotatorio o centrífugo, mientras que para la compresión hasta altas presiones se utiliza el compresor del tipo alternativo (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, pp. 10,41; Poveda-Ramos, 2007, pp. 24,25,30,31).



**Figura 1.10.** Compresores típicos: a) compresor de desplazamiento positivo bilobular; b) compresor centrífugo de succión simple  
(McCabe- Smith, y Harriot, 2007, p. 232)

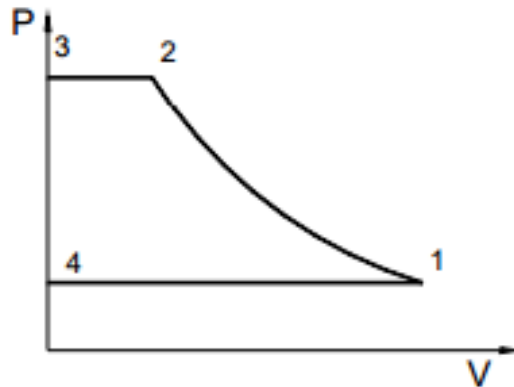
### 1.2.2.3 Ciclo de compresión

En el interior del compresor se producen las siguientes etapas:

- En la etapa de 4 a 1, ocurre la aspiración de gas, a la presión  $p_1$  de entrada,
- En la etapa de 1 a 2 se da la compresión de dicho gas
- En la etapa de 2 a 3 se da la expulsión del gas comprimido, a la presión  $p_2$  de descarga y finalmente
- En la etapa de 3 a 4 existe una caída brusca de la presión debido a la falta de gas para que el pistón se mueva hacia el P.M.I. (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12). El P.M.I se define como el punto muerto inferior y es la posición donde el pistón tiene velocidad nula y se encuentra más cerca del cigüeñal (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 10).

Luego de la etapa de 3 a 4 la válvula de admisión se abre para comenzar de nuevo el ciclo. Dado que el pistón en su P.M.S. no está toca la culata del cilindro, el ciclo descrito en la Figura 1.11 es ideal, el ciclo real se describe en la Figura 1.2

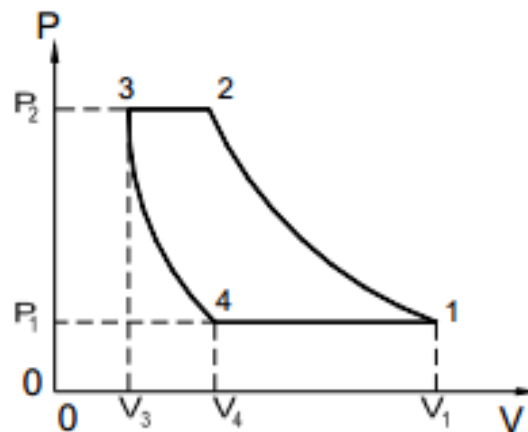
(Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12). El P.M.S se define como el punto muerto superior y es la posición donde el pistón tiene velocidad nula y se encuentra a mayor distancia del cigüeñal (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 10).



**Figura 1.11.** Ciclo de compresión ideal

(Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12)

El espacio que se encuentra entre el pistón y la culata se encuentra ocupado por cierta cantidad de gas que no ha sido expulsado en la etapa de 2 a 3 por lo que en la etapa de 3 a 4 el gas se expande (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12).



**Figura 1.12.** Ciclo de compresión teórico

(Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12)

Los procesos que se desarrolla en las etapas de 1 a 2 y de 3 a 4 se los conoce como politrópicos y cumplen la siguiente expresión (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 12).

$$p \times v^n = \text{cte} \quad [ 1.8 ]$$

Dónde:

$p$  , es la presión de trabajo (atm)

$v$ , es el volumen ocupado ( $\text{m}^3$ )

Si el proceso es adiabático:

$$n = k = \frac{C_p}{C_v} \quad [ 1.9 ]$$

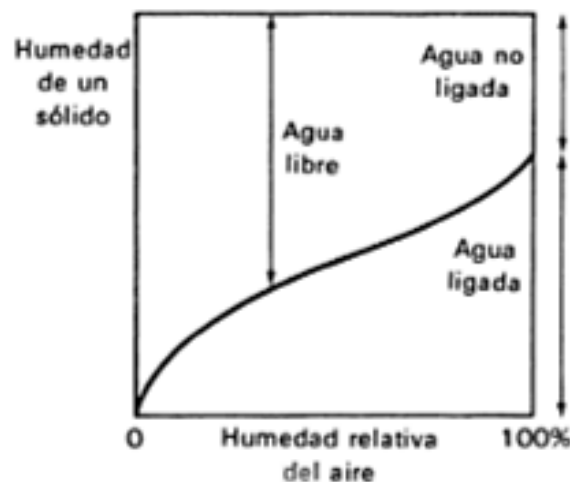
O bien cuando se trata de cilindros aletados exteriormente para refrigeración con aire ( $n$ ) puede tomar un valor de entre 1,25 y 1,38. Si el cilindro tiene una chaqueta por la que circula agua u otro refrigerante ( $n$ ) tendrá un valor entre 1,20 y 1,35 (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2010, p. 13).

### 1.2.3 SECADO Y DISEÑO DE UN SECADOR

El secado es una operación de transferencia de masa de sólido a gas. En este proceso de separación se produce la eliminación de la humedad de una sustancia (líquido residual de un sólido) hasta que la humedad del material a secar esté en equilibrio con la humedad del ambiente. Esta separación se la puede realizar por métodos mecánicos, centrífugos o mediante la vaporización térmica (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 833). Se considera un sólido seco cuando la presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido y la presión parcial dada por el vapor de agua contenido en la corriente del gas fresco que se encuentra en el ambiente, llegan al equilibrio y ésta se denomina como la humedad del sólido en el equilibrio a las condiciones del medio predominante (Terrizzano, 2002, p. 17).

### 1.2.3.1 HUMEDAD DE EQUILIBRIO Y LIBRE

La humedad total, definida por  $X_T$ , indica la proporción relativa de agua y sólido seco en la composición de una sustancia. Debido a que la cantidad de sólido no se altera durante el proceso, la humedad se determinará en base seca, es decir peso de agua por unidad de peso de sólido seco (Costa, 2004, p. 67).



**Figura 1.13.** Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases  
(Costa., 2004, p. 67)

La humedad de equilibrio, definida por  $X^*$ , representa el contenido de humedad mínimo en condiciones de temperatura y presión constantes. La presión de vapor se observa en condiciones de equilibrio, cuando la presión parcial del agua contenida en el sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua contenido en el aire. La humedad en equilibrio depende de las características de la superficie de la materia y ésta disminuye al aumentar la temperatura (Castillo, 2011, p. 3; Hougen y Watson, 2006, p. 388).

La humedad libre, definida por  $X_{\text{libre}}$ , es la humedad que el sólido húmedo puede evaporar. Esta depende de las condiciones ambientales y de la humedad del sólido y del aire, la cual se define como la diferencia entre la humedad total y la humedad en el equilibrio (Martínez y Rus, 2004, p. 807).

$$X_{\text{libre}} = X_T - X^*$$

[ 1.10 ]



### 1.2.3.2 HUMEDAD LIGADA Y HUMEDAD NO LIGADA

La humedad ligada es el valor mínimo que puede tomar la humedad de un sólido para que este deje de comportarse como higroscópico, es decir la humedad mínima de equilibrio con el aire saturado (Martínez y Rus, 2004, p. 808). La humedad no ligada se refiere al agua contenida en el sólido que ejerce cierta presión de vapor en el equilibrio menor que la presión de vapor del líquido puro a la misma temperatura (Costa, 2004, p. 67).

### 1.2.3.3 CINÉTICA DEL SECADO

Para determinar el tipo de equipo y su capacidad, dado que no es posible predecir la humedad de equilibrio del material, es necesario realizar ensayos de secado (Geankoplis, 2006, p. 589), los mismos que se efectúan en condiciones constantes de secado, presión, temperatura, humedad y velocidad se mantienen constantes con el tiempo y varían muy poco desde la entrada a la salida de la materia a secar (Costa, 2004, p. 67).

Los datos obtenidos de los ensayos se reportan como peso total ( $W$ ) del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes intervalos de tiempo ( $\theta$ ), es así que la humedad del material se puede calcular con la siguiente ecuación (Geankoplis, 2006, p. 589):

$$X_T = \frac{W_{sh} - W_s}{W_s} \quad [ 1.11 ]$$

Donde:

$W_{sh}$ , peso total del sólido húmedo (kg)

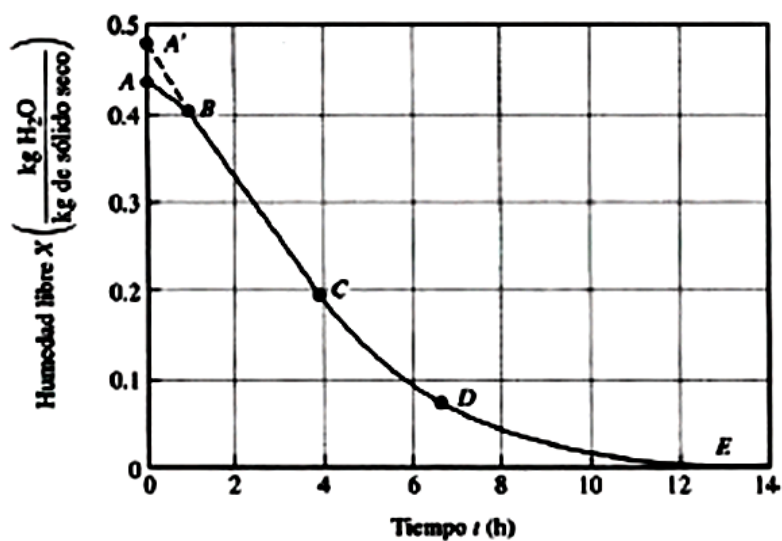
$W_s$ , peso del sólido seco (kg)

$X_T$ , humedad total en  $\frac{\text{kg total de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$

Una vez determinado el contenido de humedad total y la humedad en el equilibrio ( $X^*$ ), se puede calcular el contenido de humedad libre ( $X_{\text{libre}}$ ) para cada valor de ( $X_T$ ). La velocidad de secado es la pérdida de humedad por unidad de tiempo y se puede definir por las tangentes medidas a ciertos intervalos de tiempo (Martínez y Rus, 2004, p. 811) y (Geankoplis, 2006, p. 590):

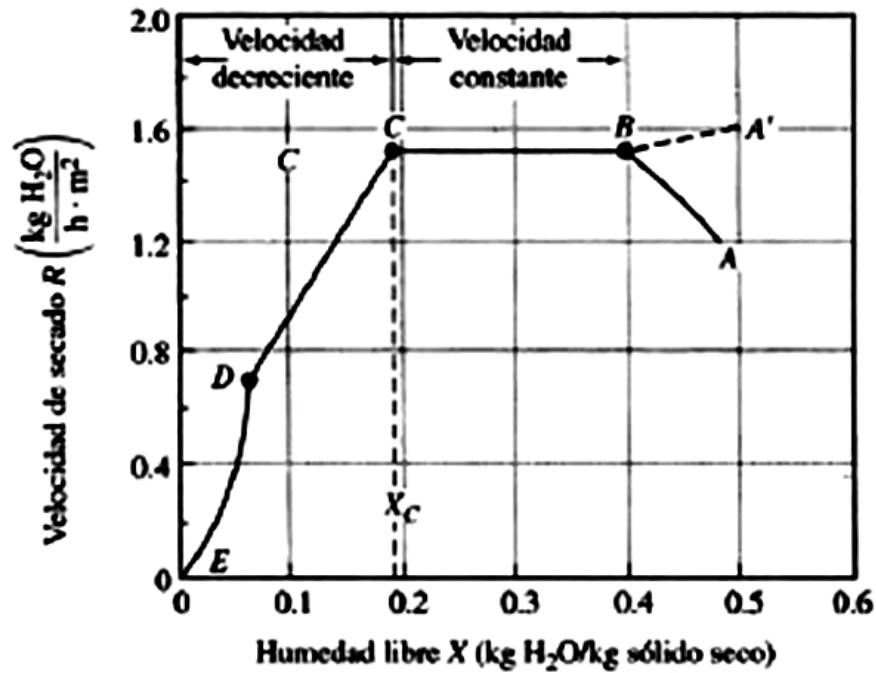
$$-\frac{dX}{d\theta} \quad [ 1.12 ]$$

En la Figura 1.14 se representa la curva de humedad ( $X$ ) vs el tiempo ( $\theta$ ); la humedad disminuye desde el valor inicial (punto A) hasta llegar a la humedad de equilibrio, valor que corresponde a las condiciones de presión y temperatura de la cámara o estufa de secado (Geankoplis, 2006, p. 589).



**Figura 1.14.** Humedad libre en función del tiempo  
(Geankoplis, 2006, p. 590)

En la curva de la Figura 1.15 se representa la velocidad de secado, en la misma se aprecia un período de régimen constante y uno de caída, en la curva también se observa tres etapas de secado (Geankoplis, 2006, p. 591; McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 843):



**Figura 1.15.** Curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre a condiciones constantes (Geankoplis, 2006, p. 590)

- Etapa A-B, corresponde al calentamiento, el proceso comienza desde la temperatura ambiente hasta que el sólido húmedo alcance el equilibrio a una temperatura del bulbo húmedo del aire.
- Etapa B-C, este proceso se caracteriza el secado a velocidad constante, la humedad libre o no ligada se evapora, el sólido tiene un comportamiento higroscópico. En el punto C se tiene la humedad crítica donde la velocidad de secado empieza a disminuir.
- Etapa C-D-E, este es el régimen de caída donde la humedad libre tiende a un valor de 0 y la humedad del sólido es igual a la humedad de equilibrio con el aire, se aprecia que la curva decrece a medida que disminuye la humedad del sólido. Durante este periodo la temperatura del sólido sobrepasa la temperatura del bulbo húmedo, dado que se excede la humedad en equilibrio y gran parte de la energía es utilizada para calentar el sólido y evaporar la humedad que se encuentra en su interior.

Para el cálculo de las curvas de velocidad de secado de un material, experimentalmente se determinará el contenido de agua al registrar el peso

perdido de las muestras en cada intervalo de tiempo, según lo que se estipula en el método del secado al horno (INEN 690, 1982, p. 3).

#### **1.2.3.4 MECANISMO Y MÉTODO DEL SECADO**

La evaporación, cuando el contenido de humedad es alto, sucede sobre la superficie mojada, el proceso de la difusión del líquido incrementa y esta va desde el interior del sólido húmedo, en este periodo la velocidad de secado es constante, debido a que no existe una fuente de calor de otros medios, el valor de la temperatura de la superficie del sólido permanecerá igual al valor de la temperatura húmeda del aire (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 849). Según este último criterio (método de calefacción), el método de secado se puede clasificar según la fuente o aplicación de calor es así que se tiene dos tipos de métodos (Geankoplis, 2006, p. 573):

- Por contacto directo, se utiliza aire caliente a presión atmosférica, la evaporación se da en el ambiente.
- Contacto indirecto, se da un secado al vacío, es un proceso más rápido pues se da a presiones bajas, la transferencia de calor por contacto con una pared metálica o por radiación.

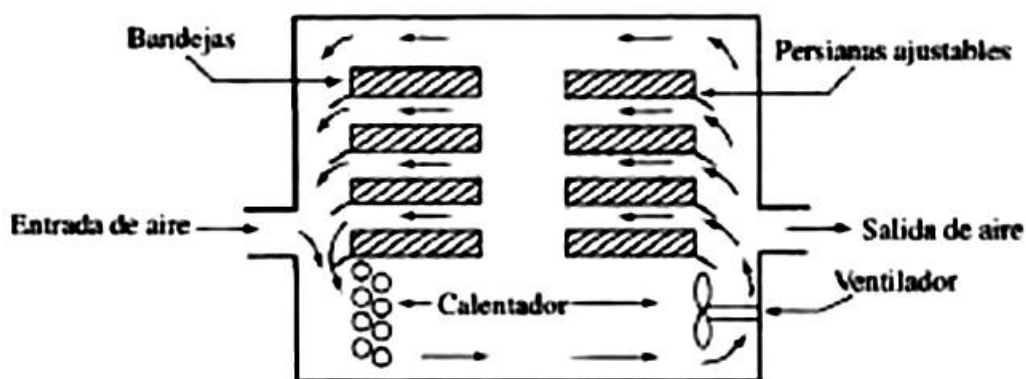
Los métodos de secado también pueden clasificarse según el tipo de producción así se tiene: proceso de lotes (la alimentación del material se da por períodos) o continuo (la alimentación del material se da continuamente) (Geankoplis, 2006, p. 573).

#### **1.2.3.5 EQUIPO PARA SECADO**

Según el método y el mecanismo de secado y la naturaleza del material a secar los equipos utilizados pueden ser:

### 1.2.3.5.1 Secadores de bandejas

También llamado secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimentos. El material a secar puede ser: un sólido en forma de pasta. El equipo posee un ventilador para la recirculación del aire que puede ser calentado con vapor o también mediante resistencias eléctricas. La circulación se dispone paralelamente sobre la superficie de las bandejas. Este equipo se utiliza para la producción a lotes o batch (Geankoplis, 2006, p. 574). En la Figura 1.16 se muestra el esquema del equipo.



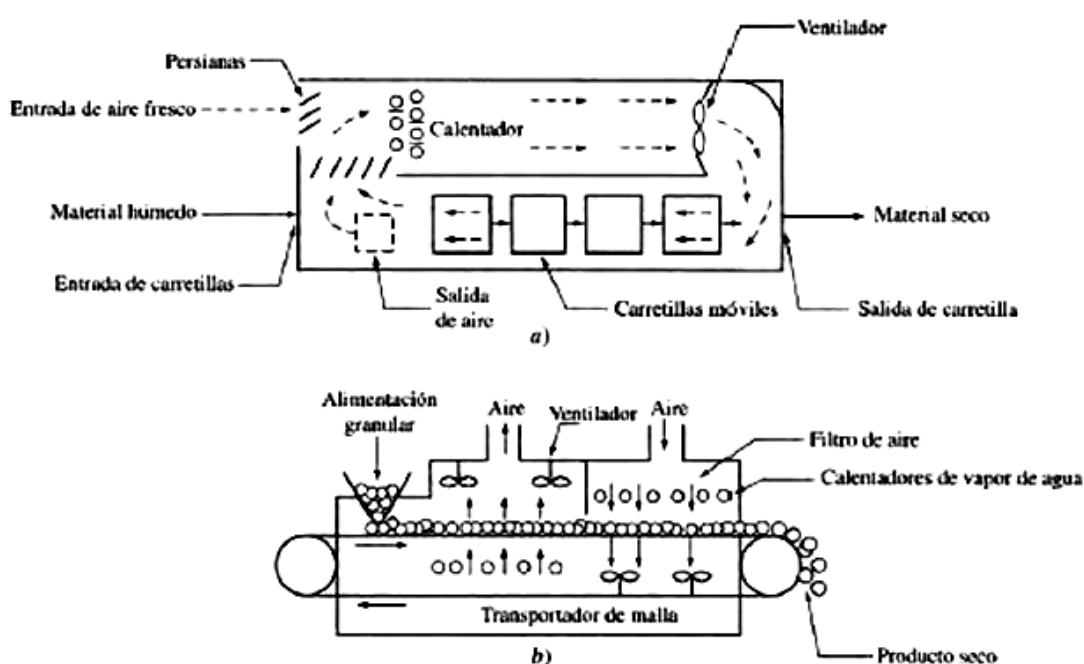
**Figura 1.16.** Secador de bandejas  
(Geankoplis, 2006, p. 574)

### 1.2.3.5.2 Secadores indirectos al vacío con anaqueles

Este tipo de equipo se utiliza para secar materiales costosos o sensibles a ciertas condiciones como la temperatura o que se oxiden fácilmente. La calefacción es indirecta, es decir la transferencia de calor se da a través de las paredes metálicas y por radiación entre las bandejas. El vacío se logra a través de puertas herméticas y a la diferencia con que opera a presión ambiental es que el material se coloca sobre bandejas huecas. La producción en este tipo de secador es del tipo lotes (Geankoplis, 2006, p. 574).

### 1.2.3.5.3 Secadores continuos de túnel

Este equipo puede utilizarse para el secado de partículas sólidas granulares, o pastas. Consta de bandejas o de carretillas que operan continuamente. La calefacción se da directamente por medio de un flujo en contracorriente o en paralelo, de aire caliente. Cada sección del secador consta de un ventilador y serpentines de calentamiento (Geankoplis, 2006, p. 575). En la Figura 1.17 se muestra el esquema del equipo.

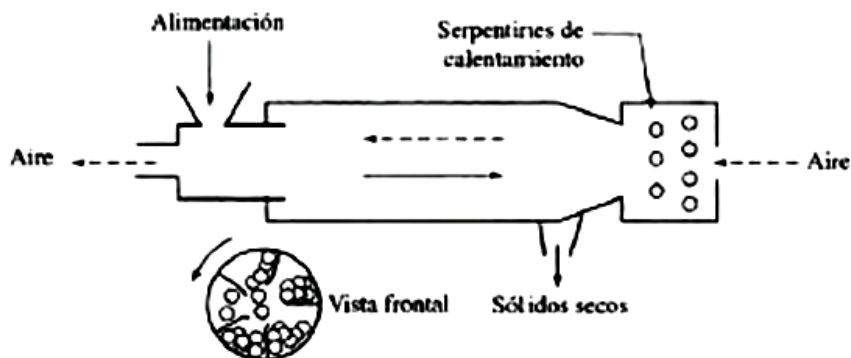


**Figura 1.17.** Secador continuo de túnel: a) secador de carretillas con flujo de aire a contracorriente, b) secador de banda transportadora con circulación cruzada (Geankoplis, 2006, p. 575)

### 1.2.3.5.4 Secador rotatorio

Este tipo de equipo se utiliza para el secado de sólidos granulares. La calefacción se da por el contacto directo con gases calientes en contracorriente, en pocos casos el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared metálica del cilindro. Este secador consta de un cilindro hueco, con una ligera inclinación hacia

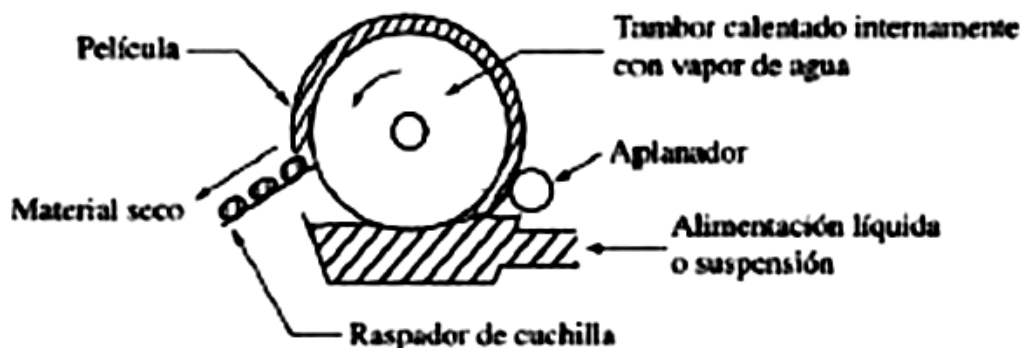
la salida del producto (Geankoplis, 2006, p. 575). En la Figura 1.18 se muestra el esquema del equipo.



**Figura 1.18.** Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo (Geankoplis, 2006, p. 576)

#### 1.2.3.5.5 Secador de tambor

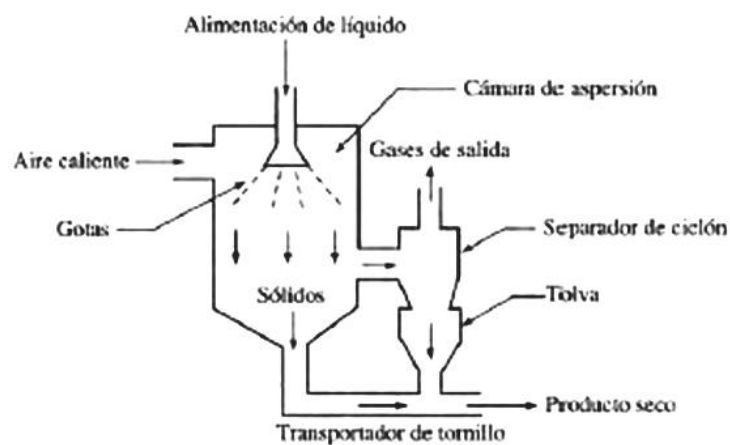
Los secadores de tambor son utilizados para procesar material tipo suspensiones o pastas de sólidos finos. Este tipo de equipo consta de un tambor de metal, el medio de calefacción es la evaporación de una capa delgada de un líquido o una suspensión hasta que se seca (Geankoplis, 2006, p. 576). En la Figura 1.19 se muestra el esquema del equipo.



**Figura 1.19.** Secador de tambor rotatorio (Geankoplis, 2006, p. 576)

### 1.2.3.5.6 Secador por aspersión

Este equipo consta de una cámara cilíndrica, toberas para la alimentación o rociadores. Para la alimentación del material, la suspensión se atomiza en una corriente de gas caliente, cuyo flujo puede ser en contracorriente, paralelo o una combinación de ambos. El producto seco sale de la cámara en un transportador de tornillo hacia un hidrociclón para filtrar las partículas muy finas (Geankoplis, 2006, p. 576). En la Figura 1.20 se muestra el esquema del equipo.



**Figura 1.20.** Diagrama de flujo para una unidad de secado por aspersión (Geankoplis, 2006, p. 577)

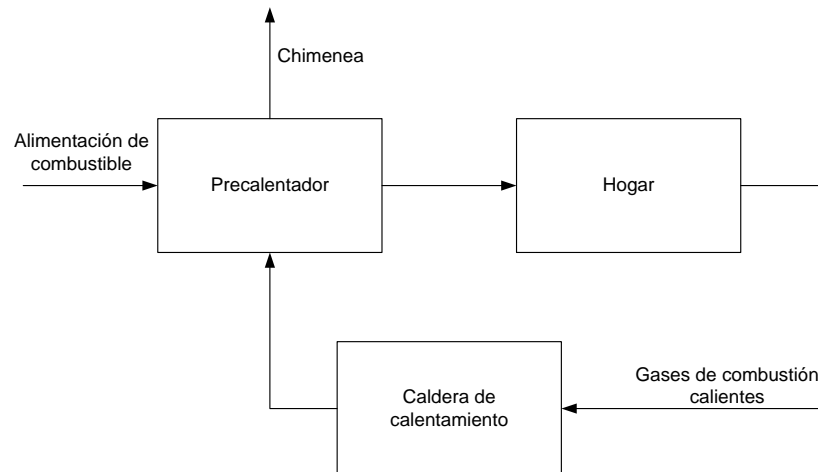
## 1.2.4 DISEÑO DE HORNOS

Un horno es una instalación donde a partir de energía química de un combustible se obtiene calor y es utilizado en operaciones de calentamiento, tratamiento y vaporización. En el diseño de este tipo de equipos la principal preocupación es la estimación del tamaño de un horno además del consumo del combustible y la recuperación de calor remanente no utilizado durante etapas de diseño preliminar (Wimpress, 2008, p. 2). Un horno está constituido principalmente por las siguientes partes (Cao, 2004, p. 349):

- Hogar o cámara de combustión: contiene los quemadores para la generación de los gases de combustión.



- Cámara de calentamiento: donde se alimenta el combustible.
- Revestimiento aislante que recubre las cámaras del horno.
- Chimenea y tubos de escape de gases de combustión.



**Figura 1.21.** Esquema de funcionamiento de un horno  
(GAS NATURAL SDG S.A., 2014, p. 1)

La transferencia de calor en este tipo de equipos está influenciada por varios factores como son:

- Las dimensiones del horno y las formas de las cámaras de combustión,
- La construcción y arreglo de los quemadores
- El tipo de combustible quemado, especialmente la parte mineral y
- Las condiciones de operación del horno.

#### 1.2.4.1 FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO

Este tipo de equipo posee un quemador en el cual se producen reacciones de combustión y se obtienen productos gaseosos, en la Figura 1.22 se muestra el esquema del equipo. Una parte del calor liberado de esta reacción es aprovechado, y mediante la transferencia por radiación ya sea directamente o indirectamente, para calentar al producto. La otra parte se perderá por la chimenea o por medio de la conducción hacia las paredes del refractario (Cao,

2004, p. 349). El calor, que se libera por la combustión de un material combustible, se transfiere a un fluido que circula dentro de tubos colocados a lo largo de las paredes del horno y el techo por los diferentes mecanismos de transferencia de calor:

- Radiación directa
- Convección
- El calor reflejado en las paredes de los refractarios



**Figura 1.22.** Zonas principales de un horno  
(Wimpress, 2008, p. 2)

Normalmente los hornos se tienen 3 zonas que se muestran en la Figura 1.22 y que son (Wimpress, 2008, p. 3):

- Sección radiante: constituida por los tubos que están en contacto con la llama. La transmisión de calor es por radiación aproximadamente un 80% y un 20% por transferencia de calor por convección debido a la circulación de gases calientes que se encuentran en contacto con los tubos.
- Sección de convección: constituida por los tubos que no se encuentran en contacto con la llama. Esta zona es utilizada para recuperar el calor remanente y evitar pérdidas, los gases calientes producto de la combustión ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ) fluyen a través del paquete de tubos. El calor es transmitido mediante radiación y convección. En ocasiones los tubos están equipados con aletas para incrementar la transferencia de calor.

- Sección de blindaje (shield): esta sección está constituida por las primeras filas de tubos que se encuentran en el área de convección y en ella los tubos no tienen aletas, reciben la misma cantidad de calor por ambos mecanismos antes ya descritos.

#### 1.2.4.1.1 Combustión

La combustión es una reacción química exotérmica, en esta reacción de oxidación una sustancia o mezcla de sustancias (combustible) que se combinan con el oxígeno (comburente) formando una llama (masa gaseosa incandescente) y la generación de calor (Márquez, 2005, p. 20).



Esta reacción puede realizarse directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, por lo general esta mezcla es el aire atmosférico. De esta reacción se obtiene como productos gases de combustión, que por lo general son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (Cao, 2004, p. 349).

#### 1.2.4.1.2 Poder calorífico

El poder calorífico es la cantidad de calor liberado de un combustible durante la reacción de la combustión completa con la cantidad estequiometría de aire. Cuando en la reacción, el vapor de agua formado se condensa entregará todo su calor, esta cantidad formará parte del calor de reacción y se define como poder calorífico superior. Por otra parte si el vapor permanece como tal y el calor de condensación no es entregado, dicho calor no formará parte del poder calorífico, esto se define como poder calorífico inferior (Cao, 2004, p. 351).

### 1.2.4.2 CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN HORNO

Para la elección del horno se debe tener en cuenta la capacidad, el tipo de calefacción y tipo de operación (continuo, batch) y el factor económico, para el dimensionamiento se tomará en cuenta el método de Lobo y Evans en el cual se consideran (Cao, 2004, p. 371):

- Que las temperaturas de la masa gaseosa dentro del hogar y la temperatura de salida de los humos sean iguales.
- Se supondrá que la temperatura en la pared de los tubos sea uniforme, se podrá calcular un valor medio de velocidad de transferencia de calor en la zona radiante.
- Velocidad de calentamiento y enfriamiento (cuando se diseñan hornos con sistemas de control)

En este tipo de equipos el calor se transmite de un sector a otro por la combinación de los tres tipos de transferencia de calor es decir: conducción, convección y radiación.

Los métodos de diseño utilizados en la industria para el cálculo de la transferencia de calor en las diferentes secciones radiantes, bajo ciertas simplificaciones y suposiciones, se basan en la ecuación general para la transferencia de calor, la misma que se presenta a continuación (Kern, 2006, p. 777):

$$Q = F_A F_\epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad [ 1.14 ]$$

Donde:

Q, flujo de calor por radiación (W)

T<sub>1</sub>, temperatura de la fuente en (K)

T<sub>2</sub>, temperatura de superficie receptora en (K)

F<sub>A</sub>F<sub>ε</sub>, cuyo producto es igual a  $\mathcal{F}$  el mismo que es llamado factor de forma en cuenta la geometría del sistema y las emisividades de un cuerpo gris.

A, superficie efectiva de transferencia de calor del cuerpo receptor frío (m<sup>2</sup>)

$\sigma$ , constante de Stefan- Boltzman igual a  $5,6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$

A continuación se presentan algunos detalles relacionados con los métodos de diseño: Lobo y Evans, el de Wilson, Lobo y Hottel y la ecuación de Orrok-Hudson.

#### 1.2.4.2.1 Método Lobo y Evans

En el método de Lobo y Evans se usa el factor total de intercambio ( $\mathfrak{F}$ ) y de la ecuación del tipo de Stefan-Boltzmann (cálculo de la transferencia de calor por radiación). La desviación máxima entre los cálculos y el equipo en operación es del 16% (Kern, 2006, p. 792).

$$Q=0,173F \left[ \left( \frac{T_G}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \alpha A_{cp} \quad [ 1.15 ]$$

#### 1.2.4.2.2 Métodos Wilson, Lobo y Hottel

El método de Wilson, Lobo y Hottel es muy utilizado en la industria a pesar de que sea empírico y en general se lo aplica en hornos tipo caja cuyo combustible sea el petróleo o gas de refinería cuando el flujo de calor se encuentra en el rango de entre los 5 000 y 30 000 Btu/(h)(pie) de superficie circunferencial. La desviación máxima de este método es del 33%. Entre las consideraciones que debe tomar en cuenta en este tipo de método están:

- El exceso de aire debe ser de entre el 5% al 80% (Kern, 2006, p. 792).
- Las temperaturas de la superficie de los tubos debe ser menor a la temperatura del gas de salida de la sección radiante en al menos 477,6 K (Kern, 2006, p. 792).
- La longitud de la trayectoria media no deberá ser menor de 15 pies (Kern, 2006, p. 792).

#### **1.2.4.2.3 Métodos Orrok-Hudson**

El método de Orrok-Hudson es utilizado para el cálculo empírico de la absorción de calor en la sección radiante de una caldera con tubos de agua. Puede ser usado para la estimación de los efectos del cambio en la alimentación del combustible (carbón o petróleo) en el quemador y la variación de la razón aire-combustible (Kern, 2006, p. 793).

#### **1.2.4.3 TIPOS DE HORNOS**

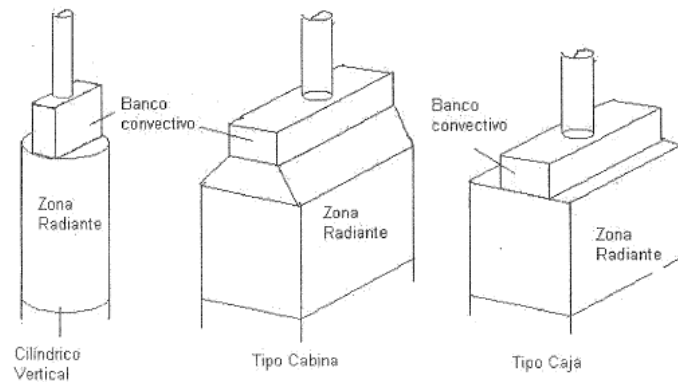
En función de la cantidad de energía requerida se deberá pensar una mayor o menor volumen del hogar, se conoce que a mayor volumen mayor emisividad del gas y por lo tanto una mayor densidad de flujo de calor radiante. Según esto se conocen varios tipos de construcción de este equipo que se muestran en la Figura 1.23 (Cao, 2004, p. 357).

##### **1.2.4.3.1 Horno cilíndrico vertical**

Este equipo es usado para capacidades de hasta aproximadamente 167,2 GJ/h. En la sección radiante los tubos están dispuestos verticalmente dispuestos en forma de un círculo alrededor de los quemadores, los cuales se encuentran en el piso para permitir que la llama se ubique paralelamente a los tubos y la sección convectiva se halla en la parte superior del horno. Esta sección está conformada por un banco de tubos que son divididos o no en varios pasos según la caída de presión permisible según las especificaciones del proceso (Cao, 2004, pp. 357,358,359). Los parámetros para el diseño de este tipo de equipo se indican en la norma API 560.

### 1.2.4.3.2 Horno de sección recta

Los hornos de sección recta corresponden los del tipo cabina y tipo caja. En los de tipo cabina los tubos son instalados horizontalmente y la sección radiante se encuentra en la parte superior de la cámara radiante inclinada o llamado arco. En los de tipo caja el arco es horizontal. La sección de convección se extiende a lo largo del horno, en este equipo los tubos son más largos en comparación con el horno cilíndrico. Los quemadores pueden ser colocados en el piso o en las paredes laterales (Cao, 2004, p. 359).



**Figura 1.23.** Principales tipos de hornos  
(Cao, 2004, p. 357)

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

Una vez establecido la capacidad de la planta que es de 100 m<sup>2</sup> de acero esmaltado por día, la metodología que se sigue para el diseño de la planta de esmaltado es la de dimensionar cada uno de los equipos utilizados para los procesos que se muestra en la Figura 1.4. Con los resultados hallados mediante catálogos se seleccionaron los equipos que mejor se ajusten. El proceso se escogió con base a los estudios realizados en el área de investigación del Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Química, sobre suspensiones porcelánicas que se aplican por vía húmeda, y a partir de los cuales se obtuvo la mejor formulación y sus propiedades fisicoquímicas, estabilidad, etc.

En el proceso de la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47 se requerirá de un tanque agitado, por lo cual se realizó un balance de masa a partir de la cantidad de piezas esmaltadas por día. Como resultado se obtuvo la cantidad de cada reactivo que se utilizará y el volumen de la mezcla, dato con el cual se dimensionará el tanque. A partir de la altura, diámetro y las relaciones de la ecuaciones [2.1] a la [2.7] se dimensionó el agitador además del diámetro, se necesitó conocer su potencia, la misma que se calculó a partir del número de Reynolds y la Figura 2.2.

Para el proceso de esmaltado, se requirió dimensionar la cámara de esmaltado, cuarto de esmaltado, compresor y depósito de aire. Tanto para la cámara como para el cuarto de esmaltado, en base a tiempos de operación y la capacidad de la planta se calculó las piezas esmaltadas en cada sub-lote, con el fin de facilitar la producción y evitar los tiempos muertos se implementaron unos carritos transportadores. Con la geometría y número de carritos, piezas esmaltadas en cada sub-lote se dimensionaron los equipos. Para el dimensionamiento del compresor se tomó en cuenta las presiones de entrada y salida. El depósito se lo dimensionó de acuerdo al volumen de aire necesario para el esmaltado de las piezas. Además, en este proceso se dimensionó las tuberías para el transporte de aire comprimido a partir de la velocidad necesaria de aplicación y la cantidad de



aire en cada aplicación del esmalte a partir de los monogramas de Figura All. 1 y Figura All. 2.

El proceso de secado tiene dos etapas: el secado a temperatura ambiente y a temperatura de 110 °C. Para el diseño del proceso, se realizaron pruebas de secado a temperatura ambiente y a 110 °C. Las pruebas consistieron en el registro de los pesos de tres piezas esmaltadas en paralelo cada cierto intervalo de tiempo; con los datos registrados se calculó la humedad total y humedad libre, así como también la humedad a las condiciones de equilibrio y peso del sólido seco. Con los mejores resultados de humedad en el proceso a temperatura de 110 °C se pudo obtener la velocidad de secado en el punto crítico. El dimensionamiento de la cámara de secado a temperatura ambiente y del secador que operará a 110 °C, fue a partir de la cantidad de piezas que salen del esmaltado, geometría de piezas y carritos transportadores.

En el último proceso de la planta, la cocción de las piezas, el horno utilizará como combustible cascarilla de arroz. El poder calorífico de la cascarilla de arroz se lo calculó mediante el ensayo realizado en la bomba calorimétrica del Laboratorio de Termodinámica. A partir de este resultado se calculó la cantidad de cascarilla necesaria, además se determinó el calor necesario para la cocción de las piezas. Cabe mencionar que para validar el uso de la cascarilla de arroz, se determinó mediante un TGA la humedad y esta manera verificar que esta materia prima cumpla con los rangos establecidos, ya que una materia prima con un mayor contenido de humedad requerirá de un pre-tratamiento para eliminarla, aumentando los costos de operación. En el dimensionamiento del horno se lo utilizó el método empírico Lobo y Evans, del cual se obtuvo la cantidad de tubos que irán en la sección radiante, potencia y dimensiones de la cabina del horno.

Con las dimensiones de equipos, capacidad de producción total de la planta así como también los sub-lotes salientes de cada unidad y tiempo de: procesamiento, de transporte y muertos, se determinó el número de operarios que trabajaran en cada unidad del proceso. En el ANEXO VI se muestra la metodología seguida para cada unidad del proceso. Finalmente con los precios de materiales, insumos,

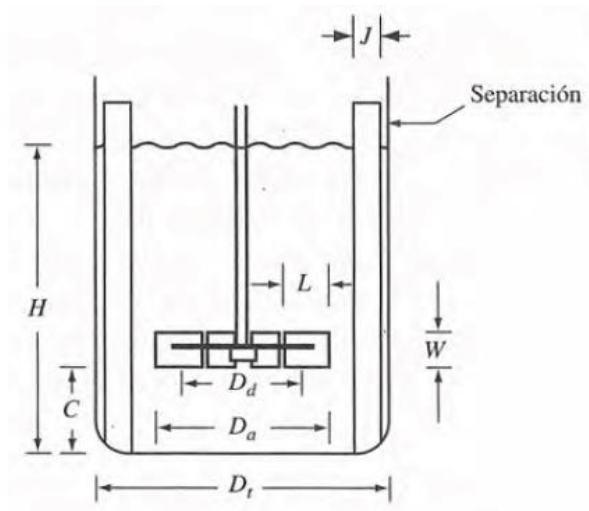
equipos y mano de obra requerida para cada uno de los procesos se calculó el costo de operación. Se determinó si el presente proyecto es viable, mediante los resultados del TIR y VAN que se calcularon en la evaluación preliminar del costo del proceso de esmaltado.

## **2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA PREPARACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DEL ESMALTE**

La preparación de la suspensión porcelánica, en la planta en marcha, se realizará en un tanque agitado continuo, en el cual la concentración, propiedades fisicoquímicas y los requerimientos de producción se mantendrán constantes. En la Figura 2.1 se muestra el esquema del equipo. Los parámetros físicos importantes tanto para el diseño como dimensionamiento de un tanque agitado son (Gelmi, 2006, p. 88):

- Diámetro del impulsor ( $D_a$ )
- Altura del líquido ( $H$ )
- Diámetro del tanque ( $D_t$ )
- Espesor de los baffles ( $w$ )
- Ancho de la hoja del impulsor ( $L$ )
- Ancho de las placas deflectoras ( $j$ )

Las dimensiones como el diámetro y altura del tanque como se muestran en la Figura 2.1, determinaron a partir de la capacidad de la planta en base al balance de masa cuyos cálculos se presentan en el ANEXO I. El diámetro del agitador, la dimensión y posición de las placas deflectoras están en relación geométrica definida respecto al diámetro de la hélice y las proporciones geométricas para el dimensionamiento de un sistema de agitación se tienen las siguientes relaciones (Geankoplis, 2006, p. 163; McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 262):



**Figura 2.1.** Dimensiones de la turbina y el tanque agitado  
(Geankoplis, 2006, p. 160)

$$\frac{D_t}{D_a} = 1,33-3 \quad [2.1]$$

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad [2.2]$$

$$\frac{j}{D_t} = \frac{1}{12} \quad [2.3]$$

$$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3} \quad [2.4]$$

$$\frac{W}{D_t} = 0,1 \quad [2.5]$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad [2.6]$$

$$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3} \quad [2.7]$$

La potencia necesaria para mover el agitador se puede expresar como una función de las siguientes variables (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 274):

- Diámetro de la hélice ( $D_a$ )
- Velocidad de rotación ( $N$ )
- Densidad del líquido ( $\rho$ )
- Viscosidad ( $\mu$ )

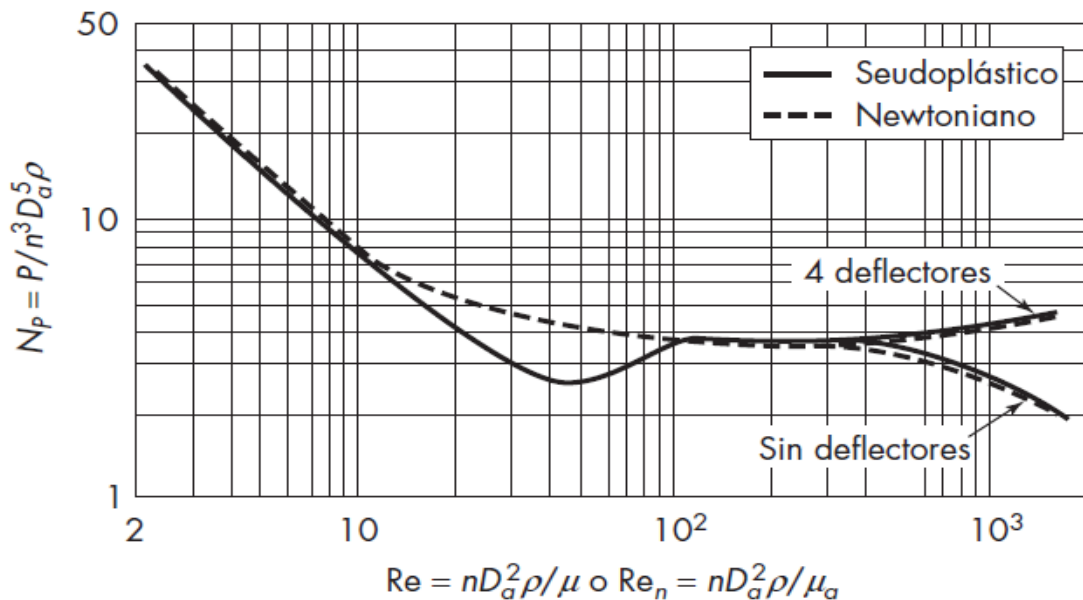
- Gravedad (g)

Es decir:

$$P=f(N, Da, g, \mu, \rho)$$

[ 2.8 ]

En la Figura 2.2 se muestra el gráfico del número de potencia ( $N_p$ ) versus el número de Reynolds ( $Re$ ), a partir de las curvas y el número de Reynolds, cuyo cálculo se muestra en el ANEXO I se determinó la potencia que el agitador requiere para diferentes valores de velocidades, así como viscosidades y densidades de líquido (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 281; Gelmi, 2006, p. 95).



**Figura 2.2.** Cálculo del número de potencia mediante el gráfico de  $N_p$  vs  $NRe$  para líquidos pseudoplástico  
(McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 281)

## 2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA APLICACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DEL ESMALTE POR EL MÉTODO DE ASPERSIÓN

Para la aplicación de la suspensión porcelánica sobre las piezas metálicas se utilizó el método de aspersión, ya que por vía húmeda se logra una capa uniforme y una total cobertura para piezas de diversas formas y tamaños. En este proceso es importante determinar la potencia del motor del compresor. Para determinar la potencia es preciso conocer la presión máxima y mínima. A partir de esto se calculará el trabajo del motor del compresor del equipo con la siguiente relación (Weston, 2006, p. 79; Geankoplis, 2006, p. 157):

$$w = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \frac{R \times T_1}{M} \times \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} - 1 \right] \quad [ 2.9 ]$$

Donde:

w, es el trabajo requerido por el compresor (J)

R, es la constante general de los gases ideales y que tiene un valor de 8,31  $\left( \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right)$

T<sub>1</sub>, es la temperatura de ingreso del gas a comprimir (K)

M, es el peso molecular  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)$

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, son tanto la presión de entrada como de salida del gas a comprimir (Pa)

γ, es la relación de las capacidades caloríficas, los valores típicos para diferentes sustancias se puede observar en la Tabla 2.1, y está dada por la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad [ 2.10 ]$$

Dónde:

C<sub>p</sub>, capacidad calorífica a presión constante  $\left( \frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$

C<sub>v</sub>, capacidad calorífica a volumen constante  $\left( \frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$

**Tabla 2.1.** Valores típicos de  $\gamma$ 

Compuesto	Valor de $\gamma$
Aire	1.40
Metano	1.31
Dióxido de azufre	1.29
Etano	1.20
Nitrógeno	1.40

(Gelmi, 2006, p. 88)

Para determinar la potencia del equipo se considerará el tiempo de operación del equipo y del trabajo. Para la compresión de aire en la industria se utiliza el compresor del tipo reciprocante o de pistón debido a que siempre suministra el mismo flujo sin importar las presiones de succión y descarga, además de su alta eficiencia (Gelmi, 2006, p. 77).

En el laboratorio la aplicación de la suspensión porcelánica se realizó con aire comprimido con una presión de entre los 300 kPa a 450 kPa, la distancia de aplicación entre la pistola y la superficie es de entre 0,15 m y 0,20 m (LEROY MERLIN S.A., 2002, p. 6), para obtener un porcentaje de pérdidas de 25 % a 35 % (Ibaza, 2012, p. 101).

### **2.3 DISEÑO DEL PROCESO DE SECADO DE LAS PIEZAS RECUBIERTAS CON ESMALTE CRUDO**

El diseño del proceso de secado de las piezas recubiertas con esmalte consta de dos etapas:

- Secado a temperatura ambiente.
- Secado en la estufa a 110 °C.

En la etapa del secado a temperatura ambiente, las piezas esmaltadas fueron introducidas en una cámara con circulación de aire, en esta etapa se eliminó la

humedad libre o intersticial (Costa, 2002, p. 67). Las piezas esmaltadas ingresaron en soportes móviles para no afectar la calidad de la pieza. La capacidad de la cámara se determinó a partir de la capacidad de producción de la planta, tiempos de espera y de operación en cada unidad.

Las piezas esmaltadas procedentes de la cámara de secado a temperatura ambiente fueron introducidas en un secador programado a las condiciones de operación. Para el diseño del proceso de secado fue necesario realizar ensayos a partir de los cuales se calculó velocidad de secado y las dimensiones del equipo a utilizar en el proceso (Geankoplis, 2006, p. 596). A continuación se describen los ensayos, equipos y materiales utilizados.

### **2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE SECADO**

Previo a la determinación de la curva de secado, mediante ensayos de secado establecidos por la norma (INEN 690, 1982, p. 5), se preparó una suspensión porcelánica cuya formulación ya se encontraba predeterminada en los trabajos de investigación anteriores del Laboratorio de Producción de Vidrio de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional (Ibaza, 2013).

#### **2.3.1.1 Preparación de la suspensión porcelánica**

Para obtener la suspensión porcelánica con una relación S/L: 53:47, se necesitó de los siguientes reactivos y equipos:

- Vidrio
- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 % AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 % LUBON
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 % TIANYUAN GROUP

- Balanza, OHAUS, 2610 g
- Estufa POL-EKO,
- Tamizador Vibratorio, RETSCH
- Agitador automático, HEIDOLPH
- Cámara del molino de bolas, 1 l
- Bolas de alúmina
- Rodillos Giratorios, NORTON, velocidad de giro 1772 rpm
- Tamiz de malla ASTM #200
- Un vasos de precipitación de 1 l
- 3 placas de 5 x 5 cm de acero inoxidable

Para la preparación de las materias primas se siguió del siguiente procedimiento:

- Se recolectaron y limpiaron las botellas de vidrio. A través de un choque térmico se fracturaron y obtuvieron pequeños fragmentos.
- Los fragmentos de vidrio fueron molidos a una velocidad de giro de 1772 rpm durante un tiempo de 2 h, en una relación de 250 g de vidrio para 1000 g de bolas de alúmina y 500 ml de agua.
- El vidrio triturado y secado se tamizó en la malla #200.
- Los reactivos: bentonita, 94 %, carboximetilcelulosa, 99,9 %, cloruro de amonio, 99,5 %, tripolifosfato de sodio, 94,2 % se tamizaron hasta un tamaño de malla #200.

El esquema del proceso se muestra en la Figura AVI. 1 y Figura AVI. 2 del ANEXO VI. Para la preparación de la suspensión porcelánica se siguió el siguiente procedimiento:

- Se calculó la cantidad de materias primas, según la dosificación determinada en los trabajos de investigación del Laboratorio de Producción de Vidrio: 3,0 % de bentonita, 0,1 % de carboximetilcelulosa, 0,5 % de tripolifosfato de sodio y 96,4 % de vidrio molido. El ejemplo de cálculo de la cantidad de las materias primas se detalla en el ANEXO I.
- Una vez pesados los componentes del esmalte, se homogeneizó la mezcla sólida manualmente.



- A la mezcla sólida se añadió el agua necesaria según la relación S/L determinada y se mezcló con ayuda del agitador mecánico durante 20 min a una velocidad de entre 1 700 – 1 800 rpm como se muestra en la Figura 2.3. El esquema del proceso se muestra en la Figura 1.4 .



**Figura 2.3.** Homogenización de las materias primas para la preparación de la suspensión porcelánica S/L: 53/47

### 2.3.1.2 Determinación de la estabilidad de la suspensión porcelánica

Para determinar el tiempo de estabilidad que presente la suspensión con relación S/L: 53:47 se necesitó de los siguientes equipos y materiales:

- Balanza analítica, UNIBLOC 220 g, 0,0001 g
- Estufa, MMM Group Venticell, temperatura Max 250 °C.
- Columna de sedimentación de 45 cm de altura y 1,7 cm de diámetro, con un tubo lateral de muestreo
- Frascos de vidrio de 10 cm<sup>3</sup>
- Desecador
- Pinza de tres dedos
- Soporte metálico

A continuación se describe el procedimiento seguido para la determinación de la estabilidad de la suspensión porcelánica:

- Se colocó 80 ml de la suspensión homogenizada en la columna de vidrio previamente instalada, que se muestra en la Figura 2.4.
- Se recolectó 3 ml aproximadamente de la suspensión por el tubo lateral de la columna en frascos de vidrio, previamente secados y pesados, en diferentes intervalos de tiempo.
- Las muestras tomadas en los frascos de vidrio se pesaron y se secaron en la estufa a 110 °C durante 12 h. Las muestras secas se las colocó en un desecador hasta que se enfríen, posteriormente se pesaron.
- Se calculó la concentración de los sólidos en la suspensión a diferentes tiempos a partir de los pesos registrados.
- Se determinó la velocidad de sedimentación y el tiempo de estabilidad, a partir de las curvas de concentración de sólidos en función del tiempo. Las tablas de los datos registrados y el ejemplo de cálculo se reportaron en el ANEXO III.



**Figura 2.4.** Columna de sedimentación de vidrio para las pruebas de estabilidad de la suspensión porcelánica S/L: 53/47

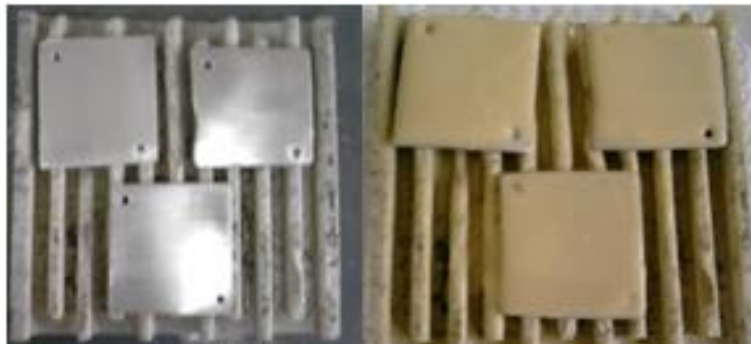
### 2.3.1.3 Aplicación de la suspensión por aspersión, secado de las piezas esmaltadas

Para la aplicación de la suspensión porcelánica se necesitó de los siguientes equipos y materiales:

- Compresor de aire, TRUPER, 50 l, 800 kPa
- Estufa, POL-EKO, 200 °C
- Balanza, OHAUS, 2610 g
- Pistola para compresor, presión 40-50 psi, boquilla de 1,6 mm
- Soporte para esmaltado horizontal
- 3 placas metálicas 5×5 cm
- Desecador

Para la aplicación de la suspensión porcelánica sobre las piezas metálicas y posterior cálculo de humedad y velocidad de secado se siguió el siguiente procedimiento:

- Una vez limpias y secas las piezas metálicas se colocaron en el soporte de la Figura 2.5 (a).
- Se colocó aproximadamente 250 ml de suspensión porcelánica en el recipiente de la pistola de aplicación y se encendió el compresor hasta alcanzar una presión de 50 psi.
- Con la pistola perpendicularmente a las piezas y a una distancia de 20 cm, se esmaltaron las piezas hasta cubrirlas completamente, las piezas esmaltadas se pesaron y se las dejaron reposar a temperatura ambiente durante 1 h, tiempo después del cual se volvió a pesar.
- Las piezas esmaltadas fueron colocadas en la estufa a 110 °C, de la cual se sacaron las muestras cada cierto intervalo de tiempo y se las colocó en el desecador por 10 min. Posteriormente las muestras se pesaron y colocaron nuevamente en la estufa. Este proceso se repitió hasta completar las 2 h de secado.
- Se calculó el peso de la suspensión húmeda en la pieza y también el peso de la suspensión sólida a diferentes tiempos a partir de los pesos registrados.



**Figura 2.5.** a) Piezas metálicas limpias en el soporte para el esmaltado, b) Piezas metálicas esmaltadas

#### 2.3.1.4 Diseño del secador

La velocidad de secado para cada punto o cada valor de humedad libre se puede calcular a través de la siguiente expresión (Geankoplis, 2006, p. 590):

$$R = -\frac{L_s}{A} \times \frac{dX}{d\theta} \quad [ 2.11 ]$$

Donde:

R, es la velocidad de secado  $\left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h m}^2}\right)$

Ls, es kg de sólido seco

A, es el área expuesta al secado ( $\text{m}^2$ )

A partir de la ecuación de velocidad de secado y los datos obtenidos sobre los pesos de los ensayos de secado, se determinó el área requerida para el proceso y la capacidad de la planta. El ejemplo de cálculo se encuentra en el ANEXO IV.

## 2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO PARA LA COCCIÓN DEL ESMALTE Y QUE SE CALIENTE POR COMBUSTIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ

La metodología usada para el cálculo de hornos se basa en la aplicación de procesos empíricos cuya eficiencia ha sido alta en los procesos en la industria. El mecanismo de transferencia de calor por radiación es de importancia en otras secciones del horno aparte de la sección radiante propiamente dicha. El método utilizado para el dimensionamiento del horno y el cálculo de la transferencia de calor en las secciones de radiación y convección está basado en correlaciones ajustadas sobre la base de la experiencia en hornos industriales (Wimpress, 2008).

Para el cálculo de la transferencia de calor se aplicaron los conceptos diseñados por el método de Lobo y Evans (Kern, 2006, p. 793). El calor debido a la transferencia de calor por radiación está dado por la ecuación [1.15]. Mientras que el calor debido a la transferencia de calor por convección está dado por la siguiente ecuación (Wimpress, 2008, p. 5):

$$q_c = h_c A (T_G - T_S) \quad [ 2.12 ]$$

Donde:

$q_c$ , calor transmitido en la sección convectiva

$h_c$ , coeficiente de convección  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$T_G$ , temperatura de los gases de combustión

$T_S$ , temperatura del sumidero

El calor total recibido por el fluido frío se calculó de la sumatoria de la transferencia de calor por radiación y convección (Kern, 2006, p. 794) como se muestra en la siguiente expresión:

$$q = q_r + q_c = F_A F_\epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) + h_c A (T_G - T_S) \quad [ 2.13 ]$$

Dónde:

q, calor total transmitido

#### 2.4.1 CÁLULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA SECCIÓN RADIANTE

Para el cálculo de la transferencia de calor por radiación se tomó en cuenta la superficie receptora de calor o superficie fría. El cálculo se simplificará al utilizar la superficie plana equivalente en la cual se menciona (Wimpress, 2008, p. 4):

- La parte de la radiación de los gases calientes que incide directamente sobre los tubos es absorbida, mientras que el remanente pasa de largo.
- Si los tubos se encuentran frente a la pared de los refractarios, la energía es irradiada hacia atrás nuevamente y absorbida por los tubos, el remanente pasa de largo.

El factor de absorción  $\alpha$  se calcula a partir de la Figura AV. 3 que se encuentra en el ANEXO V. El producto de  $\alpha A_{cp}$  es el área del plano frío equivalente y representa el área con la misma capacidad de absorción que el área del banco de tubos en el horno (Wimpress, 2008, p. 5). La longitud media de la radiación L, se calculó con la siguiente ecuación (Wimpress, 2008, p. 5):

$$L=3.6 \frac{V}{A_e} \quad [ 2.14 ]$$

Dónde:

V, es el volumen total de la caja de fuego m<sup>3</sup>

A<sub>e</sub>, el área envolvente total de la caja de fuego en m<sup>2</sup>

Para el cálculo del factor de intercambio se utilizó la gráfica que se representa en la Figura AV. 2 del ANEXO V donde se relaciona el área de la superficie fría y el área total de la caja de fuego.

## 2.4.2 CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA SECCIÓN CONVECTIVA

Dado que la transferencia de calor por convección en la zona de radiación es despreciable se puede hacer ciertas simplificaciones comunes en el diseño de este tipo de equipos (Wimpress, 2008, p. 5):

- Para hornos comunes el coeficiente de convección,  $h_c$ , tiene un valor de aproximadamente  $2,39 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{K}}$
- La superficie efectiva de transferencia de calor del cuerpo frío,  $A$  es alrededor de dos veces  $\alpha A_{cp}$
- El factor de forma,  $F$ , es aproximadamente 0,57

Con las simplificaciones descritas y reemplazándolas en la ecuación [2.15] el calor total transferido se define como (Wimpress, 2008, p. 6):

$$\frac{q_r}{\alpha A_{cp} F} = \sigma (T_G^4 - T_S^4) + 35(T_G - T_S) \quad [ 2.15 ]$$

La relación  $\frac{q_r}{\alpha A_{cp} F}$  se encuentra en función de la temperatura del gas y la pared del tubo por lo que se pudo determinar el flujo de calor en la zona de radiación (Wimpress, 2008, p. 6), a partir de la Figura AV. 3 que se presenta en el ANEXO V.

Para el funcionamiento del horno que operará en la planta para el esmaltado de piezas de acero, se utilizará como combustible cascarilla de arroz molida, la misma que fue adquirida en los molinos Agrocomexport Cía. Ltda. ubicados en la ciudad de Machachi, provincia de Pichincha. Para el dimensionamiento del horno y el cálculo de consumo del combustible, se determinó el poder calorífico de la cascarilla de arroz que se determinó bajo la norma (DIN 51900).

### 2.4.3 CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Para determinar el poder calorífico de la cascarilla de arroz que se utilizará como combustible del horno en el proceso de cocción de las piezas esmaltadas se necesitaron de los siguientes reactivos, equipos y materiales:

- Cascarilla de arroz, triturada
- Ácido benzoico, PRIMARY STANDARD FOR BOMB CALORIMETER
- Alambre de Ignición de Ni-Cr, PRÜFZERTIFIKAT FÜR ZÜNDDRANT C8
- Agua destilada
- Balanza
- Bomba calorimétrica , Parr
- Calentador de agua, Parr
- Prensa, FRED S. CARVER INC. HYDRAULIC EQUIPMENT , 11 Tons métrica
- Termómetro digital

El procedimiento para el ensayo para la determinación del poder calorífico de la cascarilla de arroz se describe a continuación:

- Se pesó de 0,7 – 0,8 g de cascarilla de arroz.
- Se midió 10 cm del alambre de ignición.
- Se conectó el alambre a los dos polos
- Se colocó 5 cm<sup>3</sup> de agua destilada en la bomba calorimétrica.
- Se tapó la cámara y conectó al tanque del aire comprimido.
- Se abrió la válvula de aire hasta una presión entre 12-15 bar (1,2-1,5 MPa) durante 5 min.
- Para preparar la cámara, se colocó agua a 20 °C en el envase donde se instala la bomba calorimétrica, hasta cubrirla completamente.
- Se cerró la cámara y verificó que la temperatura en el termómetro sea de 20 °C. Se prendió el equipo y presionó el botón “ignición”, posteriormente se esperó 5 min.
- Cuando se completó el tiempo, se tomó la temperatura final.
- Se apagó el equipo y sacó la bomba calorimétrica de la cámara.



- Se pesó el residuo que quedó en la copa metálica.
- Se midió el residuo del alambre de ignición quemado.

A partir de los resultados recogidos de los ensayos antes descritos, se calculó el poder calorífico con la ecuación que a continuación se presenta (DIN 51900):

$$q_c = \frac{C \times (T_f - T_i) - q_z \times (L_o - L_f)}{m} \quad [ 2.16 ]$$

Donde:

$q_c$ , poder calorífico  $\left(\frac{J}{g}\right)$

$C$ , estándar para la calibración del equipo  $\left(\frac{J}{g}\right)$

$T_f$  y  $T_i$ , temperatura final e inicial respectivamente de la bomba calorimétrica ( $^{\circ}C$ ).

$q_z$ , poder calorífico del alambre de ignición  $\left(\frac{J}{cm}\right)$

$L_o$  y  $L_f$ , longitud inicial y final respectivamente del alambre de ignición en cm

$m$ , masa de la cascarilla de arroz (g)

El ejemplo de cálculo se presenta en el ANEXO V.

## 2.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COSTO DEL PROCESO DE ESMALTADO

El análisis económico se lo realizó a partir de la cantidad de piezas esmaltadas en un día, piezas salientes de cada sub-lote, el costo de producción de las piezas esmaltadas y su costo de venta. Se estableció un día laboral de 16 h para los operarios de la planta. Para el análisis de los costos, se estimó sobre la base de datos de los proveedores calificados y los cuales se encuentran en el internet, tanto de materias primas, reactivos, piezas metálicas, y costos de equipos utilizados en cada unidad de la planta. Además, para la validación del proyecto se calculó el TIR y VAN de la planta de esmaltado de piezas de acero a partir de los costos de operación ya calculados. Se usó el programa Microsoft Excel.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño de la planta de esmaltado de las piezas de acero contempla los procesos que se muestran en el BFD de la Figura 1.4. A partir de dichos procesos y de las especificaciones de la planta que se muestra en la Tabla 1.1 se dimensionaron los equipos que operan en las diferentes unidades. Cabe mencionar que los procesos se escogieron en base a las alternativas tecnológicas que se muestran en la Tabla 3.1 que se basan en los criterios establecidos en el trabajo “Estudio de la compatibilidad de suspensiones de esmalte porcelánico crudo con la superficie de piezas de acero” de Marisol Ibaza y “Los aceros para esmaltación y el acero esmaltado” de ArcelorMittal Flat Carbon Europe. Dichos criterios se mencionan en el capítulo uno del presente documento.

**Tabla 3.1** Alternativa tecnológica de los procesos de la planta de esmaltado

Proceso	Equipos	Alternativa/Criterio
<b>Preparación de la suspensión porcelánica S/L 53:47</b>	Tanque, agitador	Fluido pseudoplástico, disminuir el flujo axial para evitar precipitaciones de la suspensión.
<b>Aplicación del esmalte</b>	Pistolas, compresor, tanque de depósito, cámara de aplicación, cuarto de esmaltado	Aplicación por aspersión, es un método económico y que permite total recubrimiento de la pieza
<b>Secado de piezas esmaltadas</b>	Cámara de secado a temperatura ambiente, secador tipo cabina	Capacidad de la planta, lote y sub-lotes. Temperatura no debe superar los 110 °C para evitar golpes de uña.
<b>Cocción de piezas esmaltadas</b>	Horno tipo caja	Capacidad de la planta, lote y sub-lotes. Temperatura de 900 °C para lograr una buena adhesión entre el esmalte y el acero. Tipo de combustible (cascarilla de arroz) para disminuir costos de operación

### 3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE AGITADO PARA LA PREPARACIÓN DE LA SUSPENSIÓN PORCELÁNICA

En la Tabla 1.1 se muestran las dimensiones de la pieza metálica, dado que las piezas se esmaltarán tanto interna como externamente el área esmaltada será de 0,45 m<sup>2</sup>. Para cubrir con la capacidad de la planta que es de 100 m<sup>2</sup> por día se deberán esmaltar aproximadamente 222 piezas, los cálculos se muestran en el ANEXO I. Cabe recalcar que la capacidad de la planta corresponde a un nivel de pequeña escala o piloto, como se puede observar en la Tabla 1.3. Dicha capacidad fue impuesta para el diseño de la planta debido a que en el Ecuador actualmente las cacerolas esmaltadas son importadas, por lo que para poder competir con este producto se lo debe introducir de a poco, a futuro la planta deberá incrementar su capacidad.

Los resultados del balance de masa para el cálculo tanto del peso de la suspensión porcelánica con relación sólido-líquido (S/L) 53:47, así como los resultados de los pesos de cada uno de los componentes de la misma para las cuatro aplicaciones, se muestran en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 respectivamente, tanto para el esmaltado de una pieza así como para la capacidad de la planta es decir 100 m<sup>2</sup> de acero. Cabe recalcar que los cálculos son con base a una captación de 7,55 g/dm<sup>2</sup> y a cuatro aplicaciones del esmalte para evitar fallas y lograr superficies lisas (Ibaza, 2013, p. 101).

**Tabla 3.2.** Peso de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47 requerido para la capacidad de la planta

Número piezas	Recipiente cilíndrico	
	1	222
Área total piezas (m <sup>2</sup> )	1,79	397,54
Peso esmalte (g)	1 351,98	300 140,54
Peso sólido (g)	716,55	159 074,48

**Tabla 3.3.** Pesos de cada uno de los componentes para la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47 requeridos para la capacidad de la planta

Número piezas	Recipiente cilíndrico	
	1	222
Componente	Peso (g)	
Vidrio	690,76	153 347,80
Bentonita	21,50	4 772,245
Tripolifosfato de sodio puro	3,58	795,37
Tripolifosfato de sodio impuro	3,81	846,14
Carboximetilcelulosa puro	0,72	159,07
Carboximetilcelulosa impuro	0,72	159,23
Agua (g)	635,43	141 066,05
Agua (m <sup>3</sup> )	6,35E-04	0,14

\*El porcentaje de cada componente en la suspensión se muestra en la Tabla 1.5

En la Tabla 3.4 se muestran las dimensiones del tanque agitado con una capacidad de 0,20 m<sup>3</sup>, dicha capacidad corresponde a la suspensión porcelánica requerida para el esmaltado de 222 piezas por día. La capacidad del tanque agitado calculada evitará la instalación de un tanque pulmón, en el cual debido a las características reológicas y fisicoquímicas de la suspensión porcelánica podrían presentarse precipitaciones, lo cual ocasionaría que la composición del esmalte cambie y por lo tanto las características y calidad de la pieza esmaltada.

**Tabla 3.4.** Dimensiones del tanque agitado para la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47

DIMENSIONES TANQUE AGITADO	
Capacidad m <sup>3</sup>	0,20
Altura, H (m)	0,76
Diámetro tanque, Dt (m)	0,63
Diámetro Impulsor, Da (m)	0,32
Espesor de los baffles, W (m)	0,06
Ancho de la hoja impulsor, L (m)	0,08
Ancho placas deflectoras, j (m)	0,05

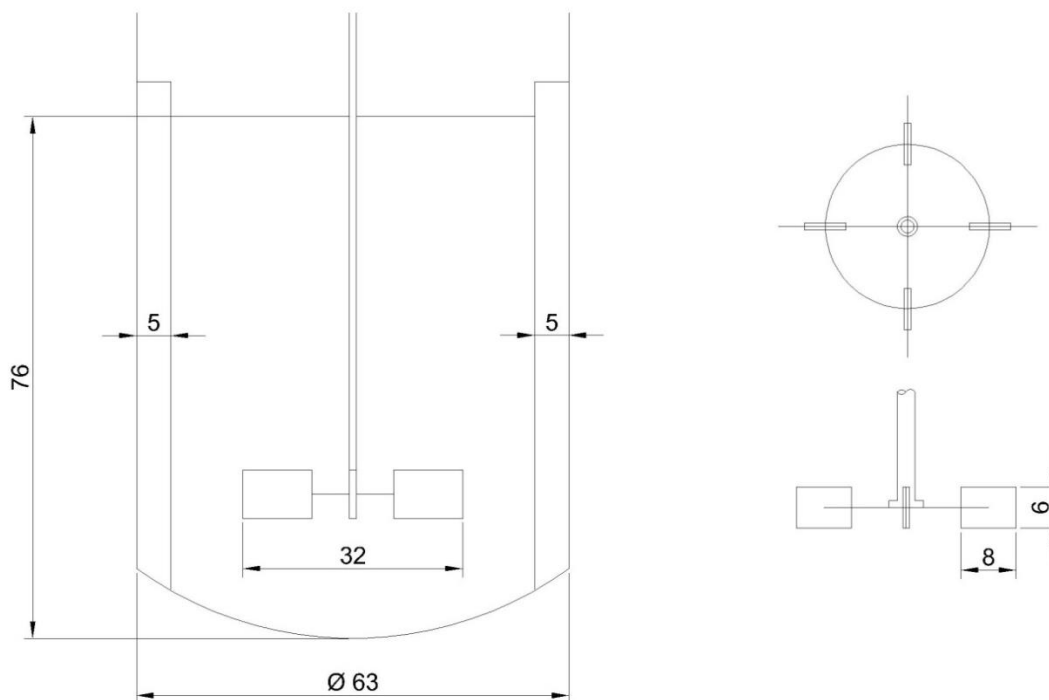
En la Tabla 3.5 se muestran las dimensiones y especificaciones del agitador que se deberá instalar en el tanque para la preparación de la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47, debido al comportamiento pseudoplástico de la suspensión esta debe estar en constante agitación a pesar de que su formulación contiene componentes que le permiten tener una estabilidad del 100 % durante 6 h (Ibaza, 2013, p. 58).

Para determinar la potencia del agitador se escogió la curva de cuatro deflectores que corresponde a la de fluidos pseudoplásticos, ésta se muestra en la Figura 2.2. Cabe recalcar que los deflectores dentro del tanque ayudarán a mejorar la eficiencia de mezclado y a evitar el vórtice generado por la agitación en el fluido. La potencia del agitador teórica es  $9,79E-02$  kW, para el cálculo de la potencia real se toma un factor de 2 y un factor de sobredimensionamiento y eficiencia del 20% por lo que la potencia del agitador será de 0,29 kW es decir  $1,5$  kW/m<sup>3</sup>, lo cual corresponde a una mezcla moderada (Sinnott, 2005, p. 485). En la Tabla 3.5 se puede los resultados calculados de las especificaciones del agitador.

**Tabla 3.5.** Especificaciones del agitador o impulsor

<b>ESPECIFICACIONES AGITADOR</b>	
<b>Diámetro impulsor (m)</b>	0,32
<b>Velocidad (rpm)</b>	100
<b>Potencia kW</b>	0,29

Debido a que la forma en la que un fluido se agitará depende en gran medida de su viscosidad, se eligió un agitador de palas inclinadas con un ángulo de 45° que produzca un fuerte flujo axial para que la suspensión de sólidos no precipite sobre las paredes dentro del tanque (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 266). En la Figura 3.1 se muestra la vista frontal del tanque agitado y sus dimensiones.



**Figura 3.1.** Diagrama del tanque agitado

### **3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA APLICACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DEL ESMALTE POR EL MÉTODO DE ASPERSIÓN**

El esmaltado de las piezas metálicas se realizó vía húmeda, es decir mediante la aspersion de la suspensión porcelánica S/L 53:47, para lo cual se utilizó una pistola neumática y un compresor. En la Tabla 3.6, se muestra las condiciones de operación, presión, temperatura ambiental, además del peso del esmalte de las cuatro capas aplicadas sobre las piezas metálicas.

**Tabla 3.6.** Datos generales sobre las condiciones de aplicación de la suspensión porcelánica S/L 53:47

Presión de trabajo del compresor (kPa)	344,74
Temperatura (°C)	18
Distancia pistola – pieza en la aplicación (m)	0,20
Esmalte aplicado por pieza (kg)	1,35

Para el dimensionamiento del equipo utilizado en la aplicación de la suspensión porcelánica, en primer lugar fue necesario conocer las características de la cámara de aplicación y capacidad de producción en este proceso. Para el esmaltado de 100 m<sup>2</sup> de acero por día, se consideró que el tiempo de aplicación del esmalte en cada pieza sea de cinco minutos, por lo que para cumplir con la capacidad de la planta en la unidad de esmaltado se deberán procesar cinco piezas en el intervalo de tiempo ya estipulado. Dado que la aplicación en las cinco piezas debe ser simultánea, deberá haber cinco cámaras de aplicación y cinco operarios en esta sección. La cámara de aplicación es un compartimiento rectangular, en la cual recolectará el esmalte que resulte como residuo.

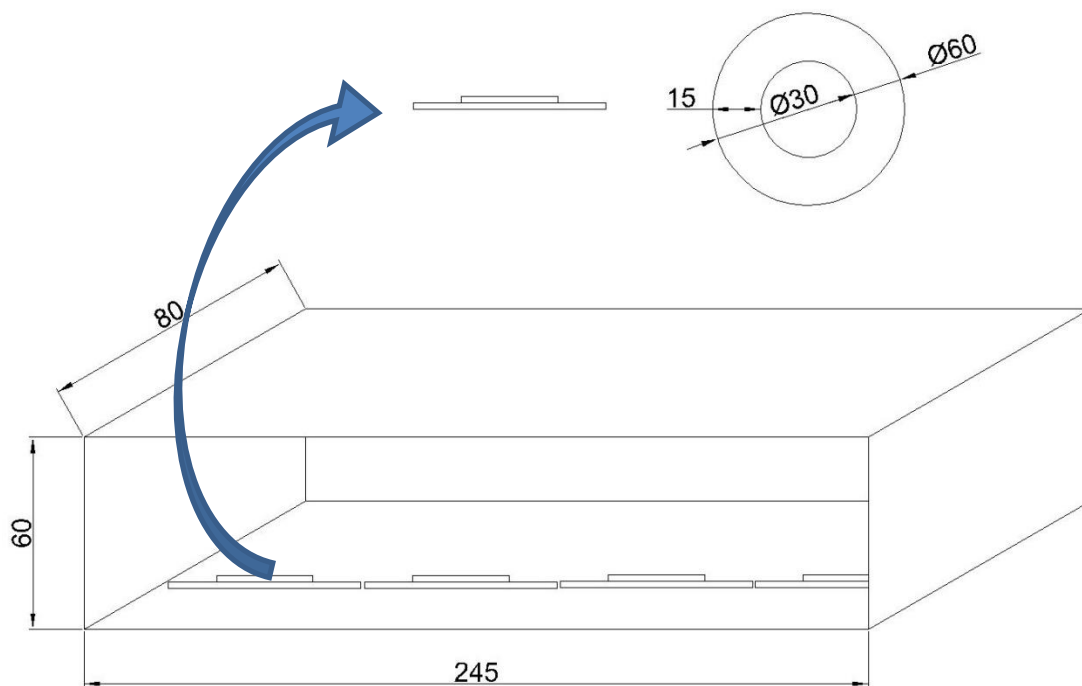
Cada pieza se colocará en bases giratorias con el fin de facilitar y agilizar la aplicación del esmalte. En cada cámara se colocarán cuatro piezas. Para evitar la pérdida de tiempo en montaje y desmontaje de las mismas. Las dimensiones de la cámara de aplicación se detallan en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7.** Dimensiones de la cámara de aplicación

Largo (m)	2,45
Profundidad (m)	0,80
Altura (m)	0,60

La base giratoria tendrá un diámetro de 0,60 m para facilitar el montaje de la pieza y evitar que se rocen con otras piezas inmediatamente después de aplicar el esmalte, además tendrán jaladeras para su fácil transporte. Para evitar que todo el esmalte residual quede sobre la base, ésta tendrá orificios a través de los

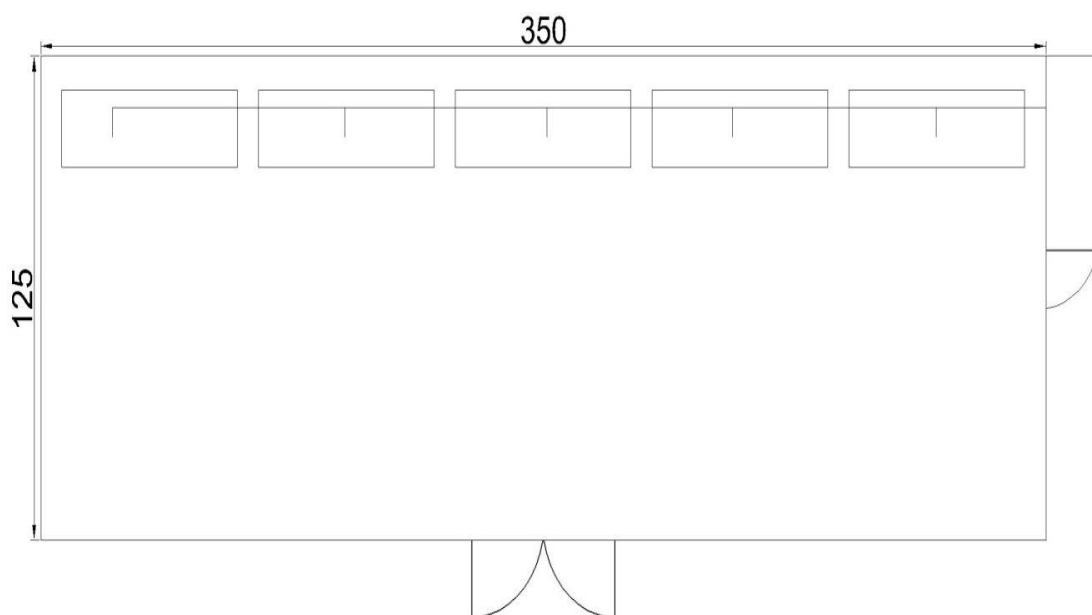
cuales la suspensión caerá hacia la cámara para su posterior recolección. En la Figura 3.2 se muestra el diseño de la base giratoria.



**Figura 3.2.** Cámara de aplicación y base giratoria

Con la dimensión de la cámara de aplicación del esmalte, se pudo determinar las dimensiones del cuarto de esmaltado que serían de 14 m de largo por 5 m de fondo, de acuerdo como se muestra en la Figura 3.3. El cuarto de esmaltado tendrá una circulación de aire permanente durante la aplicación del esmalte. Con base a estas dimensiones de las cámaras de aplicación y del cuarto de esmaltado, se dimensionó la red de distribución de aire comprimido, para posteriormente calcular la potencia del compresor requerida. La mejor configuración de la red de aire, debido a la baja inversión en su instalación y bajas pérdidas por accesorios o tuberías, es la de una red abierta como que se muestra en la Figura 3.3, en la que se detalla la disposición de las cámaras de aplicación.





**Figura 3.3.** Cuarto de esmaltado

La tubería principal será de aluminio anodizado (Guest, 2011, p. 9) y tendrá una longitud de 13 m. Para evitar los condensados la tubería deberá ser instalada con un ángulo de inclinación de  $3^\circ$  (Poveda, 2007, p. 37). Las tomas de salida de las tuberías de servicio se encontrarán en forma perpendicular y en la parte superior de la tubería principal.

Para determinar el diámetro tanto las líneas principales como de las secundarias, que conectarán el depósito con el aire comprimido hacia las pistolas neumáticas, se consideró que el caudal de aire fuera igual a  $29,70 \text{ m}^3/\text{h}$ , (KREMLIN REXSON, 2005), para fluidos de alta viscosidad a una presión de  $344,74 \text{ kPa}$ , caudal que se encuentra en el rango utilizado en las industrias de pintado de carrocería, por ejemplo. En la Tabla 3.8 se muestra los criterios de diseño utilizados para el dimensionamiento de la tubería.

**Tabla 3.8.** Consideraciones de diseño para cálculo de tuberías

*Caudal aire comprimido (m <sup>3</sup> /h)	29,70
**Velocidad de aire en línea principal (m/s)	8
***Densidad aire comprimido a 20°C	1,21 kg/m <sup>3</sup>

\* (KREMLIN REXSON, 2005, p. 5)

\*\* (Moreno, 2005, p. 31)

\*\*\* (The Linde Group, 2002, p. 4)

El caudal total requerido en el cuarto de esmaltado así como el caudal provisto por el compresor se determinó con el caudal utilizado por cada pistola cuyo valor es de 29,70 m<sup>3</sup>/h. Para este dimensionamiento se tomó en cuenta un porcentaje de fugas del 5 %, una demanda del 80 % debido al uso intermitente y un 20 % debido al sobredimensionamiento en caso de ampliación (Moreno, 2005, p. 29). Los cálculos se muestran en el ANEXO II y los resultados se muestran en la Tabla 3.9. En el ANEXO VII se muestran las características técnicas de la pistola neumática requerida.

**Tabla 3.9.** Caudal de aire comprimido requerido

Caudal aire comprimido total en el cuarto de esmaltado (m <sup>3</sup> /s)	0,034
Caudal aire compresor (m <sup>3</sup> /s)	0,043

El sistema de tubería principal tendrá cinco derivaciones T, para su conexión con las tuberías de servicio, además de una curva de 90° debido a la conexión entre el compresor y tubería principal. Los cálculos del dimensionamiento de la tubería se muestran en el ANEXO II. En la Tabla 3.10 se muestran las dimensiones así como las pérdidas de carga admisibles debida a la tubería y los accesorios. En la Figura AII. 3 del ANEXO II se muestra el catalogo escogido de la tubería.

**Tabla 3.10.** Dimensiones de la tubería utilizada en el sistema de distribución de aire comprimido

Longitud tubería (m)	13
Diámetro interno tubería (mm)	26
Diámetro externo tubería (mm)	28
Pérdidas de cargas admisibles debidas a accesorios (kPa)	17

Las tuberías de servicio serán de polietileno del mismo diámetro interno de la tubería principal y con la longitud requerida por el operador para que no interfiera en el proceso de esmaltado. Una vez determinados las dimensiones de la tubería, así como el caudal de aire requerido por la instalación, se determinó la potencia del compresor así como el volumen del depósito acumulador de aire. En la Tabla 3.11 se muestran los resultados.

**Tabla 3.11.** Características de compresor y depósito acumulador

Compresor, potencia (kW)	216,71
Rendimiento compresor (%)	85
Depósito compresor, volumen (m <sup>3</sup> )	1,60

Para este tipo de instalaciones y debido a las características reológicas de la suspensión porcelánica S/L 53:47, alta viscosidad y carácter pseudoplástico, la mejor elección son los compresores a pistón. Estos equipos utilizan sistemas de fuerza neumática y tienen alta eficiencia y bajos costos de operación (Moreno, 2005, p. 23).

Con los resultados determinados de volumen del compresor, potencia y volumen del acumulador de aire se seleccionaron los equipos con las características más parecidas a las requeridas para esta unidad de producción, por medio de catálogos comerciales. En el ANEXO VII se muestran los catálogos de los equipos escogidos. En la Tabla 3.12 se muestran las características del compresor escogido así como del tanque acumulador de aire.

**Tabla 3.12.** Características técnicas de compresor y depósito de aire comprimido

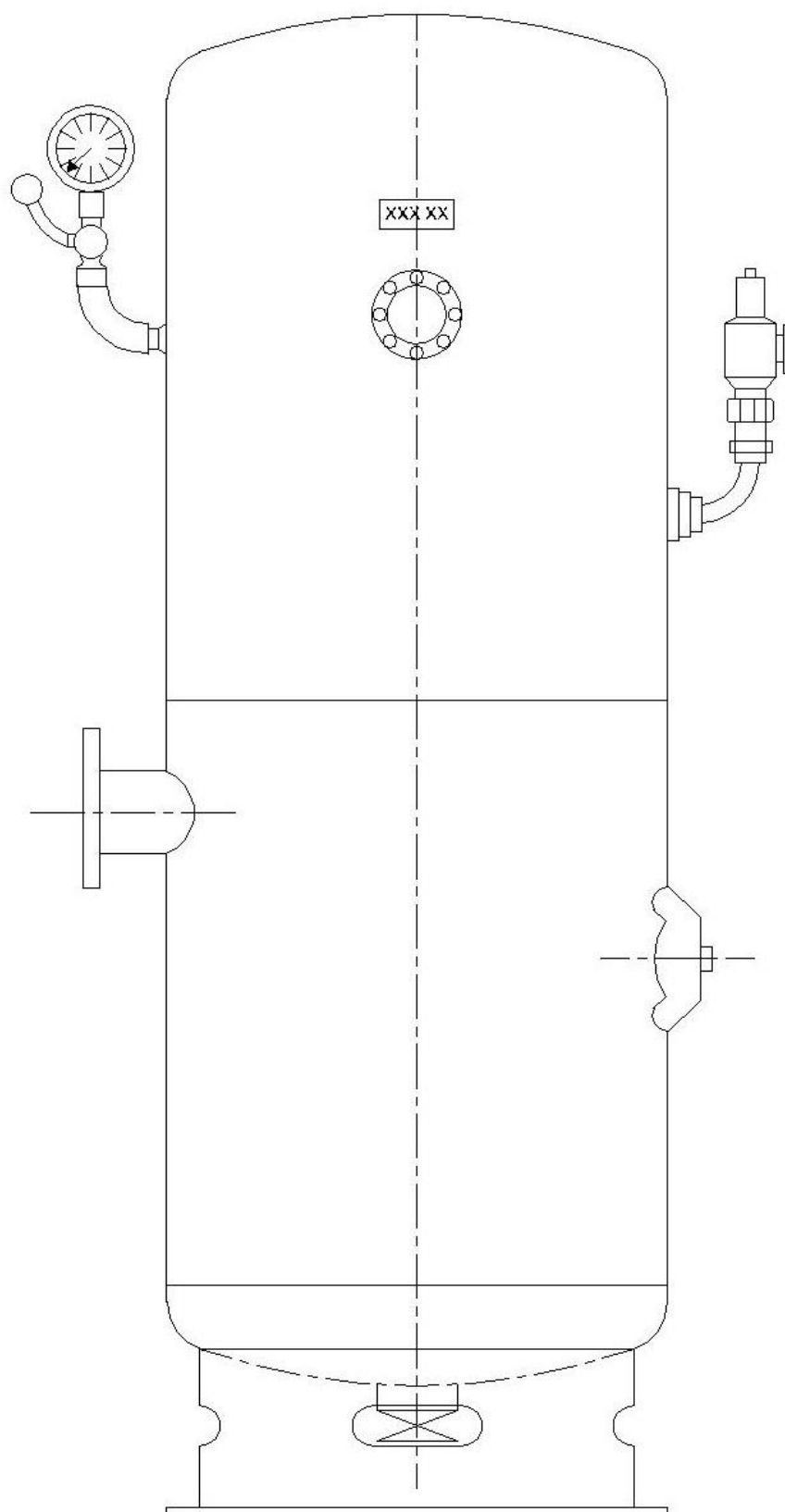
<b>EQUIPO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	
*Compresor V-Major	Presión (bar)	1,5-20,5
	Potencia (kW)	55-280
	Velocidad (rpm)	590
	Caudal aire libre (m <sup>3</sup> /min)	43,4
**Depósitos de aire comprimido	Volumen (m <sup>3</sup> )	2
	Presión (Pa)	1E06
	Dimensiones (m)	L=1 H=2,7

**L= Diámetro del tanque**

**H= altura del tanque**

\* (CompAir, 2014, p. 8)

\*\* (Sedel, 2010)



**Figura 3.4.** Compresor

### 3.3 DISEÑO DEL PROCESO DE SECADO DE LAS PIEZAS RECUBIERTAS CON ESMALTE CRUDO

#### 3.3.1 ESTUDIOS DE SEDIMENTACIÓN DE LA SUSPENSIÓN PORCELÁNICA CON RELACIÓN S/L 53:47

Para comprobar que la formulación de la suspensión porcelánica sea la señalada por (Ibaza, 2013, p. 100), se realizaron ensayos de sedimentación para determinar la estabilidad del esmalte. Los ensayos se efectuaron en un tubo de vidrio de 47 cm de altura, 1,7 cm de radio, con un tubo lateral de 27 cm por el cual se tomaron muestras y se determinó la relación S/L a diferentes tiempos.

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados del ensayo de sedimentación, donde se puede observar que la concentración de sólidos varía desde el 53,65 % al 53 %. En dicho rango se encuentra el porcentaje de sólidos en la suspensión, por lo que se puede decir que no hay una variación en la formulación del esmalte. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se presentan en el ANEXO III.

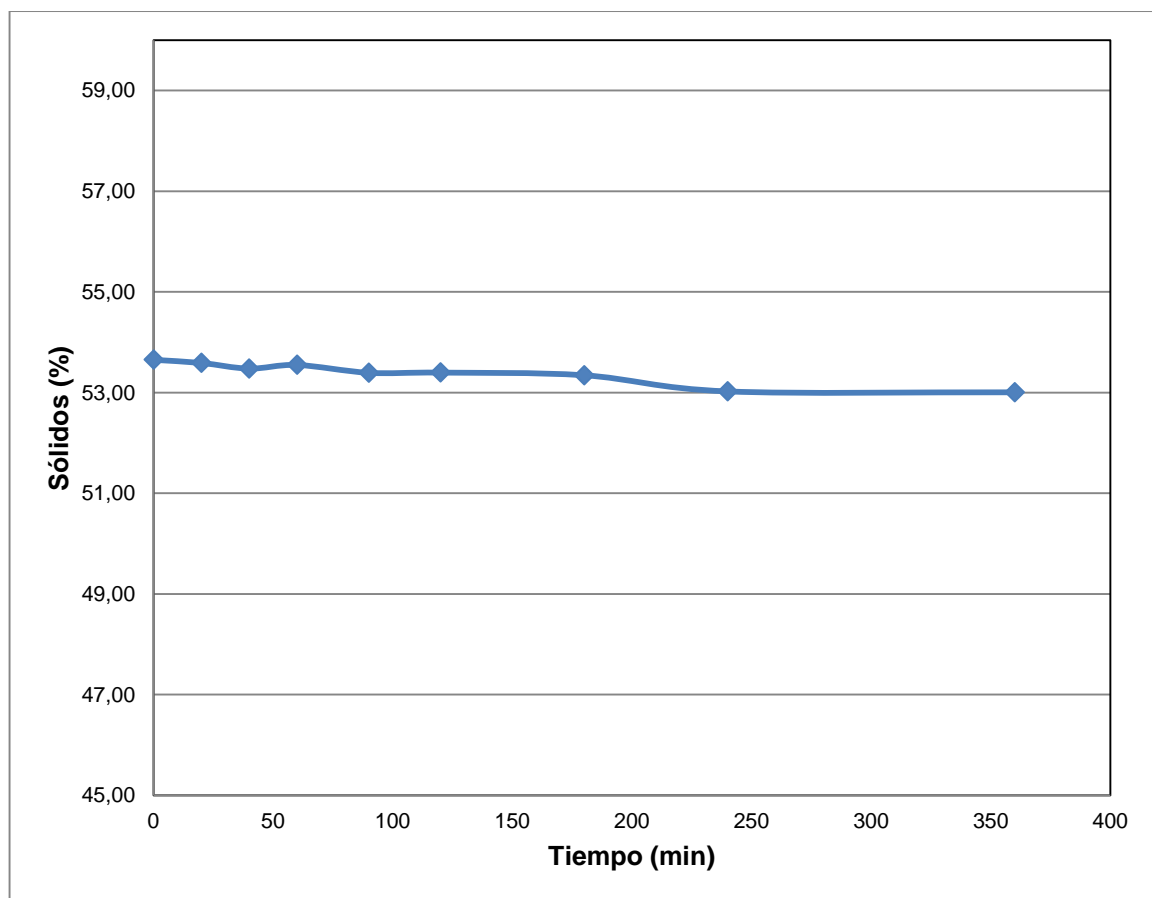
**Tabla 3.13.** Resultados ensayo de sedimentación de la suspensión S/L: 53: 47

# Prueba	Tiempo (min)	Concentración de sólidos (%)
1	0	53,65
2	20	53,59
3	40	53,48
4	60	53,55
5	90	53,40
6	120	53,40
7	180	53,35
8	240	53,03
9	360	53,01

En la Figura 3.5 se puede observar la tendencia de la curva de sedimentación en función del tiempo de la suspensión porcelánica S/L 53:47, la cual tuvo un

comportamiento estable en un tiempo de 360 min, tiempo que duró el ensayo. Se puede observar que a partir de los 180 min la tendencia de la curva decae, esto se debe a que se presentó una precipitación pequeña de los sólidos en la suspensión en la parte inferior de la columna de sedimentación, por lo que en la altura de recolección de las muestras hay una menor concentración de sólidos. A pesar de esto, la suspensión porcelánica no presentó de una concentración de sólidos inferior al 53 %.

La suspensión presenta excelentes características para ser aplicada sobre la superficie metálica como ya se mencionó su estabilidad, captación y formulación. Estas características evitan que sobre la superficie esmaltada aparezcan imperfecciones como flóculos o diferencias de espesor debido a precipitaciones, además de posibles problemas en los siguientes procesos del esmaltado.



**Figura 3.5.** Curva de sedimentación de la suspensión porcelánica S/L: 53:47

### 3.3.2 DISEÑO DEL PROCESO DE SECADO A TEMPERATURA AMBIENTE

Para el ensayo se utilizaron tres piezas metálicas que fueron sometidas simultáneamente al proceso de secado, de esta manera se obtuvieron resultados paralelos, S.A.1, S.A.2, S.A.3. Las siglas S.A. son la abreviatura de secado a temperatura ambiente, para el caso de S.A.1 es el secado a temperatura ambiente para la pieza 1 y de la misma manera para S.A.2, S.A.3.

En esta etapa las piezas metálicas de 5 cm × 5 cm se colocaron en una cámara con circulación de aire a temperatura ambiente (20 °C), cada cierto intervalo de tiempo se registró el peso de las piezas esmaltadas hasta llegar a obtener un peso constante, el ensayo duró 1 h.

En la Tabla 3.14 se muestran los resultados de los pesos de: piezas metálicas, piezas metálicas más la suspensión porcelánica y suspensión porcelánica, registrados al inicio del ensayo de secado. Cabe notar que se procuró que el peso de la suspensión porcelánica aplicada sobre cada pieza metálica sea aproximadamente cercano, debido a que la aplicación se la realizó manualmente mediante una pistola de pulverización para esto se controló la distancia de aplicación (15 cm) y número capas aplicadas .

**Tabla 3.14.** Pesos registrados de las piezas esmaltadas

<b>Pesos (g)</b>			
<b># Prueba</b>	<b>S.A.1</b>	<b>S.A.2</b>	<b>S.A.3</b>
<b>Peso pieza acero (g)</b>	37,13	35,70	37,78
<b>Peso pieza acero + Suspensión (g)</b>	41,79	38,63	40,79
<b>Peso suspensión (g)</b>	4,67	2,92	3,01

En la Tabla 3.15 se muestran los resultados de los pesos obtenidos y humedad total calculada durante el ensayo de secado para las tres piezas en cada intervalo de tiempo. Cabe recalcar que la humedad total así como humedad libre cuyos resultados se muestran más adelante, fueron calculadas en base seca. Debido a



la relación sólido-líquido que la suspensión porcelánica tiene, además de su carácter higroscópico presentan valores de humedad total mayores a 1. Esto es para guardar concordancia con los posteriores cálculos de velocidad de secado que necesariamente se deben realizar en base seca. En el ANEXO IV se muestra el ejemplo de cálculo seguido para peso de la suspensión, agua contenida y humedad total.

**Tabla 3.15.** Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura ambiente

Tiempo (min)	Pacero + Wsh (g)			Wsh (g)			Xt (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)		
	S.A.1	S.A.2	S.A.3	S.A.1	S.A.2	S.A.3	S.A.1	S.A.2	S.A.3
0	41,79	38,63	40,79	4,67	2,92	3,01	1,82	2,05	1,72
10	41,16	38,48	40,45	4,03	2,78	2,67	1,44	1,90	1,41
30	40,95	38,19	40,10	3,82	2,49	2,32	1,31	1,60	1,10
60	40,78	38,01	40,01	3,65	2,31	2,23	1,21	1,42	1,02

**Pacero:** Peso acero (g)

**Wsh:** Peso suspensión húmeda (g)

**Xt:** Humedad total (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

En los resultados de peso de suspensión húmeda se puede observar que la pieza S.A.1 es la que contiene un mayor peso de suspensión porcelánica aplicada al inicio del ensayo, con un valor igual a 4,66 g. La pieza con un menor peso es la pieza S.A.2, a pesar de ello, esta pieza es la que contiene un mayor contenido de humedad total inicial. Esto se debe a las características higroscópicas, cantidad de esmalte aplicado y el estado de la superficie del esmalte sobre el metal.

Durante esta etapa según los resultados obtenidos no hubo una gran pérdida de humedad, en cuanto la presión de vapor del sólido húmedo iguala a la presión parcial de vapor del agua en el aire. En la Tabla 3.16, se muestran los resultados del contenido de humedad para los tres ensayos y su valor promedio, calculados en base húmeda. Se puede observar que las piezas ingresan con una humedad promedio del 65,01 % y al cabo de una hora esta disminuye hasta un valor del

54,57 %, que corresponde a una pérdida del 10,44 % de humedad total lo que corresponde a una humedad total en base seca igual a 0,65 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco.

**Tabla 3.16.** Contenido de humedad de los ensayos de secado a temperatura ambiente

Tiempo	Xth (%)			Xth (prom) (%)
	S.A.1	S.A.2	S.A.3	
0	64,54	67,26	63,24	65,01
10	58,97	65,54	58,50	61,00
30	56,71	61,53	52,36	56,86
60	54,73	58,61	50,38	54,57

**Xth:** Humedad total base húmeda (g H<sub>2</sub>O/g suspensión)

**Xth prom:** Humedad total base húmeda promedio de los tres ensayos (g H<sub>2</sub>O/g suspensión)

En adición de los resultados de la Tabla 3.16, se observa que el mayor contenido de humedad perdido va desde un 63,24 % a un 50,38 %, es decir aproximadamente un 12,86 % menos. Estos resultados corresponden a la pieza tres que además tiene un menor contenido de humedad total inicial con un valor de 1,72 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco. El contenido de humedad perdida para las otras piezas es del 9,81 % para la pieza uno y del 8,65 % para la pieza dos. Esto comprueba que la pérdida de humedad no sólo se debe a la cantidad de suspensión aplicada sino también de la adhesión esmalte-metal, es decir de las fuerzas intermoleculares que actúan.

La humedad libre es el valor máximo de humedad que puede ser removido del sólido húmedo. En la Tabla 3.17 se muestran los resultados de humedad libre para los tres ensayos al mismo tiempo, así como el valor promedio de éstas. Durante este periodo de secado, la humedad de equilibrio en condiciones ambientales es de 1,21 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco y se puede observar que hay una pérdida de 0,65 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco en un intervalo de tiempo de una hora.

Las tendencias en cuanto a pérdida por cada una de las piezas en el ensayo se mantienen iguales a las presentadas en resultados de humedad total. Es decir,

que la pieza que presenta una mayor disminución del contenido de humedad es la pieza 3 con un valor de 0,71 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco, mientras que la pieza uno es la que presenta una menor pérdida de humedad con un valor de 0,61 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco.

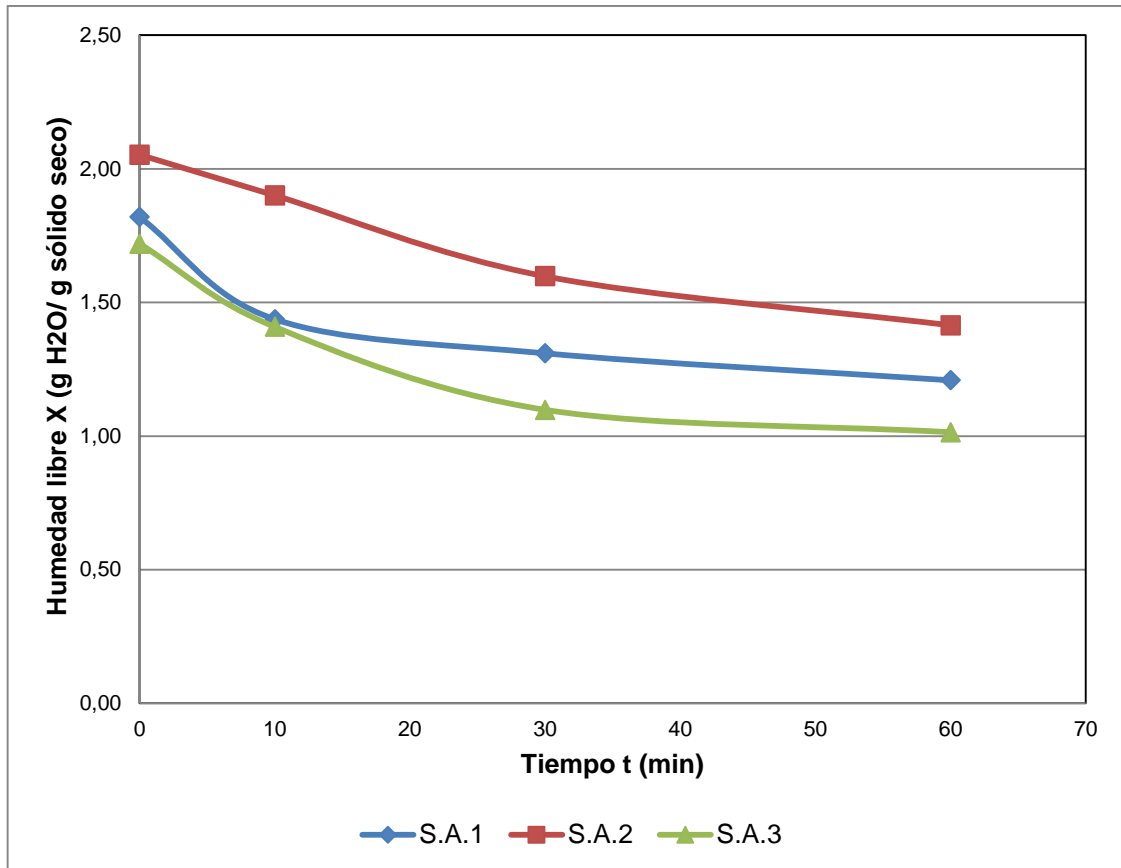
**Tabla 3.17.** Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura ambiente

TIEMPO (min)	X (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)			X prom (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)
	S.A.1	S.A.2	S.A.3	
0	1,82	2,05	1,72	1,86
10	1,44	1,90	1,41	1,58
30	1,31	1,60	1,10	1,34
60	1,21	1,41	1,01	1,21

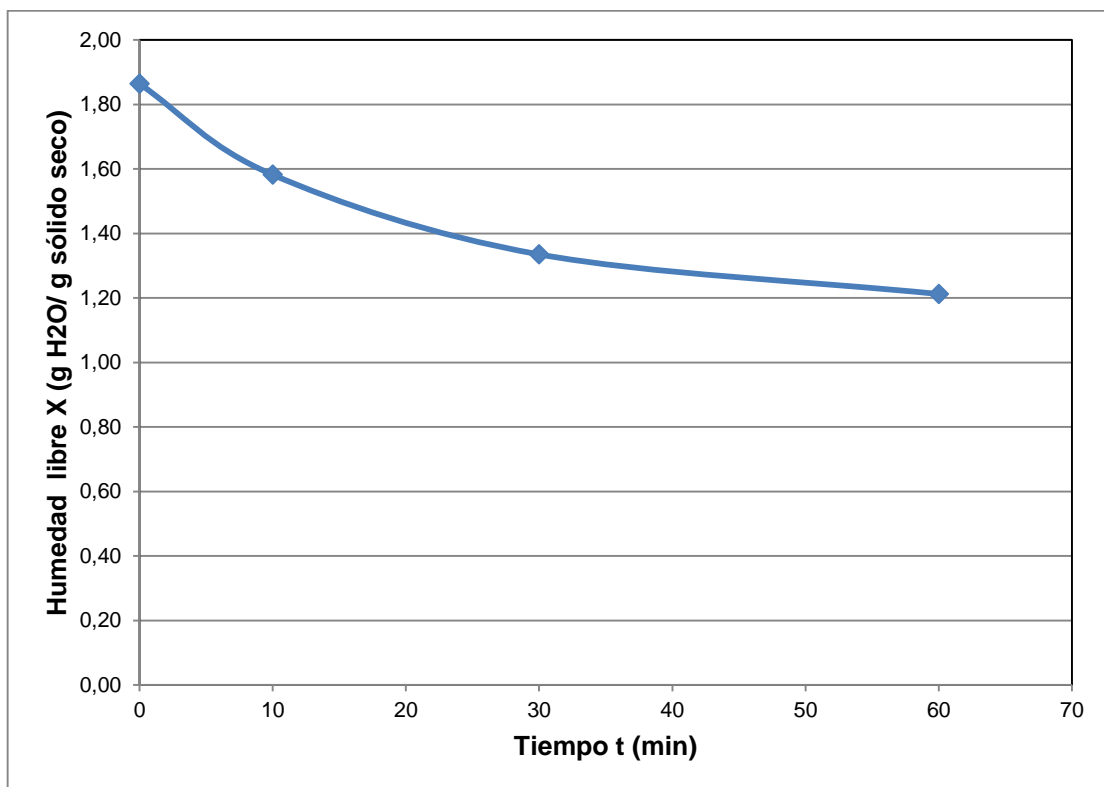
**X:** Humedad libre (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

**X prom:** Humedad libre promedio de los tres ensayos (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

En la Figura 3.6 se muestra la disminución de la humedad libre con el tiempo de la suspensión porcelánica para los tres ensayos. Se puede observar que a partir de la media hora la disminución de la humedad libre es menor, debido a que el valor de la humedad está muy cerca de la humedad de equilibrio en condiciones ambientales de presión y temperatura.



**Figura 3.6.** Ensayo de secado para las tres piezas esmaltadas a temperatura ambiente



**Figura 3.7.** Ensayo de secado a temperatura ambiente

En la Figura 3.7. se observa la tendencia de la curva de pérdida de humedad libre promedio del ensayo de secado a temperatura ambiente. Se puede observar que durante los 30 primeros minutos la velocidad de secado es mayor. A partir de la media hora la pérdida de humedad es menor debido a la disminución de la velocidad de secado y a que la humedad libre ya tiende a la humedad de equilibrio a tales condiciones.

En la Tabla 3.18 se muestran las condiciones del ensayo del proceso de secado a temperatura ambiente. Estas condiciones serán tomadas para controlar el proceso de secado en la cámara de secado a temperatura ambiente de la planta. Para el dimensionamiento de la cámara de secado, se tomarán en cuenta las condiciones encontradas en el ensayo de secado a temperatura ambiente que se muestran en la Tabla 3.18, además de la capacidad de la planta, tiempos de espera, así como también la mejor disposición de las piezas esmaltadas dentro de la cámara, para evitar cualquier daño en la superficie esmaltada.

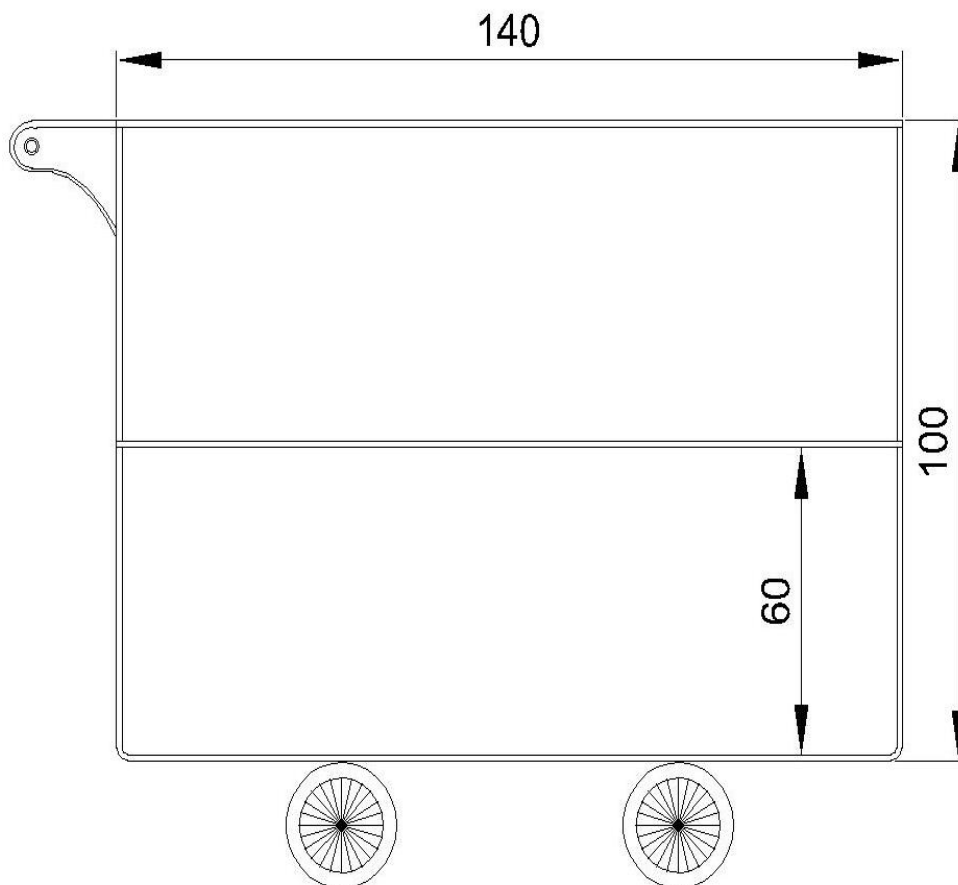
**Tabla 3.18.** Condiciones del proceso de secado de piezas esmaltadas a temperatura y presión ambiental

<b>Contenido X inicial (base húmeda) (%)</b>	65,01
<b>Contenido X final (base húmeda) (%)</b>	54,57
<b>Humedad perdida (base seca) (g H<sub>2</sub>O/g de sólido seco)</b>	0,65
<b>Temperatura (°C)</b>	20,00
<b>Presión (Pa)</b>	101 325
<b>Tiempo secado (h)</b>	1

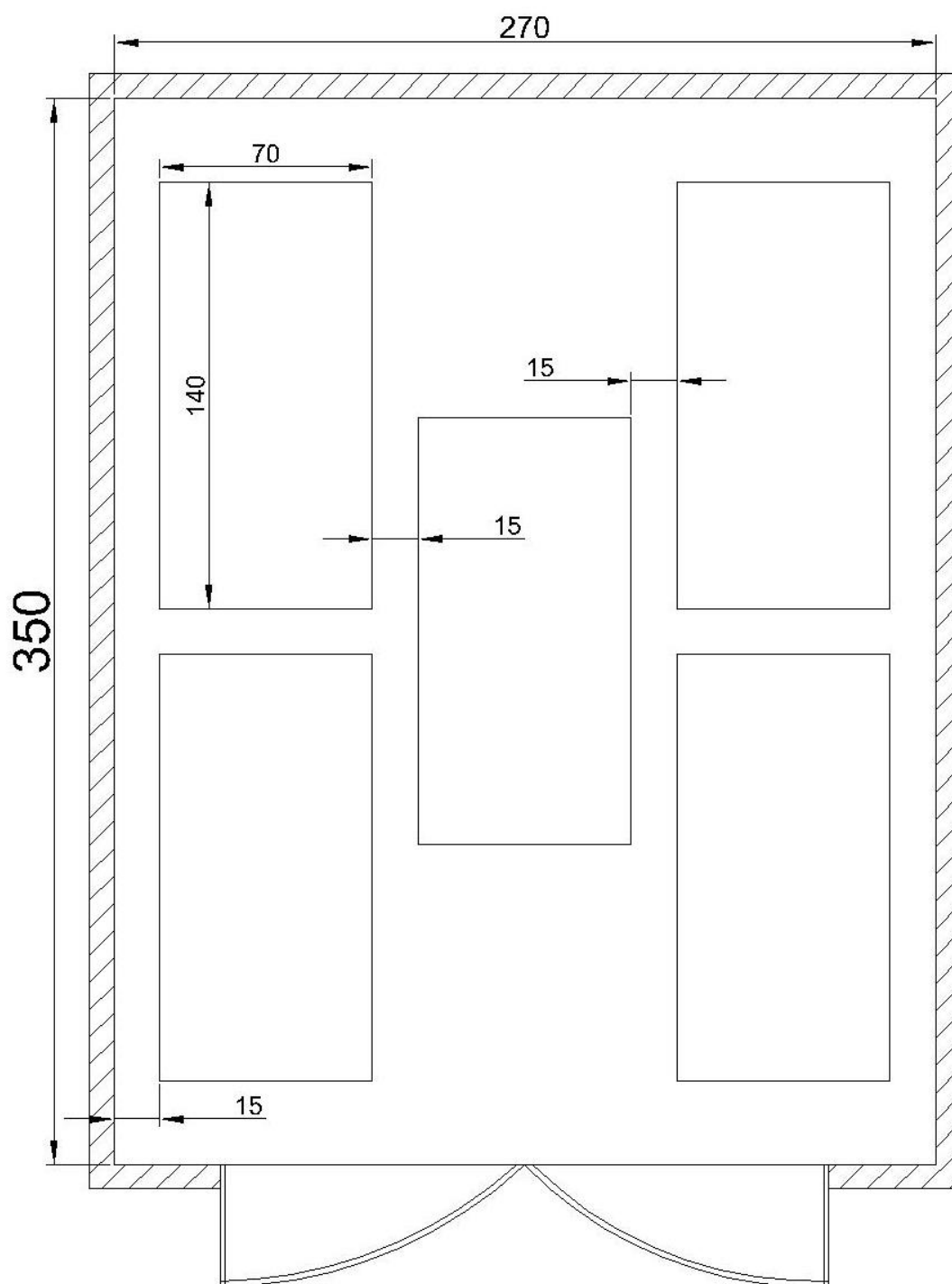
X: Humedad libre (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

En el cuarto de esmaltado se producen 20 piezas cada 20 min y que se considerará que el tiempo de transporte de esta unidad hacia la cámara de secado será de 5 min. Las piezas esmaltadas serán colocadas en carritos contruidos en acero para soportar el peso de las piezas. En cada carrito se colocarán 4 piezas como se muestra en la Figura 3.8.

Con las dimensiones de los carritos y la disposición de estos dentro de la cámara de esmaltado tal como se muestra en la Figura 3.9, se pudo encontrar las dimensiones de la cámara de secado que son de 2,7 m por 3,5 m. La altura de la cámara será según las disposiciones del fabricante, la cámara dispondrá de circulación constante de aire a una temperatura de 20 °C. Para cumplir con la producción diaria de la planta y dado que en cada cámara de secado a temperatura ambiente se procesan 20 piezas por hora. Se deberán instalar dos cámaras de secado y así evitar el tiempo de espera que genera el proceso de esmaltado.



**Figura 3.8.** Carrito transportador



**Figura 3.9.** Cámara de secado a temperatura ambiente

### 3.3.3 DISEÑO DEL PROCESO DE SECADO A TEMPERATURA DE 110°C

En esta etapa las piezas metálicas de 5 cm × 5 cm ya esmaltadas fueron colocadas en una estufa a 110 °C, durante dos horas. Al igual que en el ensayo de secado a temperatura ambiente se utilizaron tres piezas metálicas para así poder obtener resultados paralelos, S.E.1, S.E.2, S.E.3. Las siglas S.E. son la abreviatura de secado en la estufa, para el caso de S.E.1 es el secado en la estufa para la pieza 1 y de la misma manera para S.E.2, S.E.3.

En la Tabla 3.19 se muestran los pesos registrados durante el ensayo de secado, así como también la humedad total calculada en cada intervalo de tiempo. Se puede observar que la pieza dos es la que presenta un mayor contenido de humedad, mientras que la pieza tres es la que tiene un menor contenido de humedad.

**Tabla 3.19.** Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura de 110°C

Tiempo (min)	Pacero + Wsh (g)			Wsh (g)			Xt (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)		
	S.E.1	S.E.2	S.E.3	S.E.1	S.E.2	S.E.3	S.E.1	S.E.2	S.E.3
0	40,78	38,01	40,01	3,65	2,31	2,23	1,21	1,42	1,02
10	40,35	37,52	39,54	3,22	1,82	1,76	0,95	0,90	0,59
30	39,47	36,85	38,99	2,34	1,15	1,21	0,42	0,20	0,09
45	38,96	36,73	38,95	1,83	1,03	1,17	0,11	0,07	0,06
60	38,79	36,72	38,90	1,66	1,02	1,12	5,00E-03	6,00E-02	1,20E-02
90	38,78	36,69	38,89	1,66	0,99	1,11	1,00E-03	3,70E-02	2,00E-03
120	38,78	36,66	38,89	1,66	0,96	1,11	2,42E-04	1,25E-03	8,14E-04

**Pacero:** Peso acero (g)

**Wsh:** Peso suspensión húmeda (g)

**Xt:** Humedad total (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

Al cabo de las 2 h para los tres ensayos hay una pérdida casi total del contenido de humedad, como se puede apreciar de mejor manera en la Tabla 3.20, donde



se muestra el porcentaje de contenido de humedad calculado en base húmeda. Dado que la pieza dos es la que presentó un mayor contenido de humedad, tiene también la mayor pérdida de agua.

Para las condiciones de temperatura en este ensayo las piezas tuvieron un contenido de humedad total inicial del 54,57 % y una humedad total final del 0,08 %. Esta humedad corresponde a la humedad en equilibrio lograda cuando la presión de vapor del sólido húmedo iguala a la presión parcial de vapor del agua en el aire caliente que circula en la estufa.

**Tabla 3.20.** Contenido de humedad de los ensayos de secado a temperatura de 110°C

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Xth (%)</b>			<b>Xth prom (%)</b>
	<b>S.E.1</b>	<b>S.E.2</b>	<b>S.E.3</b>	
0	54,73	58,61	50,38	54,57
10	48,68	47,25	37,21	44,38
30	29,44	16,82	8,43	18,23
45	9,76	6,88	5,33	7,32
60	0,52	5,70	1,08	2,44
90	0,05	3,58	0,11	1,25
120	0,02	0,13	0,08	0,08

**Xth:** Humedad total base húmeda (g H<sub>2</sub>O/g suspensión)

**Xth prom:** Humedad total base húmeda promedio de los tres ensayos (g H<sub>2</sub>O/g suspensión)

Para obtener el peso del sólido seco de cada pieza en el ensayo de secado se dejó a las piezas por 24 h en la estufa a 110 °C. Los resultados se muestran en la Tabla 3.21.

**Tabla 3.21.** Peso del sólido seco obtenido en el ensayo de secado a temperatura de 110°C

Ensayo	S.E.1	S.E.2	S.E.3
<b>Peso sólido seco (g)</b>	1,65	0,96	1,11
<b>Peso sólido seco prom. (g)</b>	1,24		

La humedad en el equilibrio, es el valor del contenido de la humedad cuando las presiones parciales del vapor en el aire y el agua en la suspensión porcelánica son iguales (Terrizano, 2002, p. 17). Para llegar a la humedad de equilibrio según los resultados de humedad total presentados en la Tabla 3.20, se ha requerido de las 2 h, el cual es el tiempo de secado de este proceso. En la Tabla 3.22 se muestran los resultados de la humedad en el equilibrio calculadas para cada una de las piezas esmaltadas, así como el valor promedio en el ensayo. En el ANEXO IV se muestra el ejemplo de cálculo.

**Tabla 3.22.** Humedad de equilibrio  $X^*$  obtenido en el ensayo de secado a temperatura de 110°C

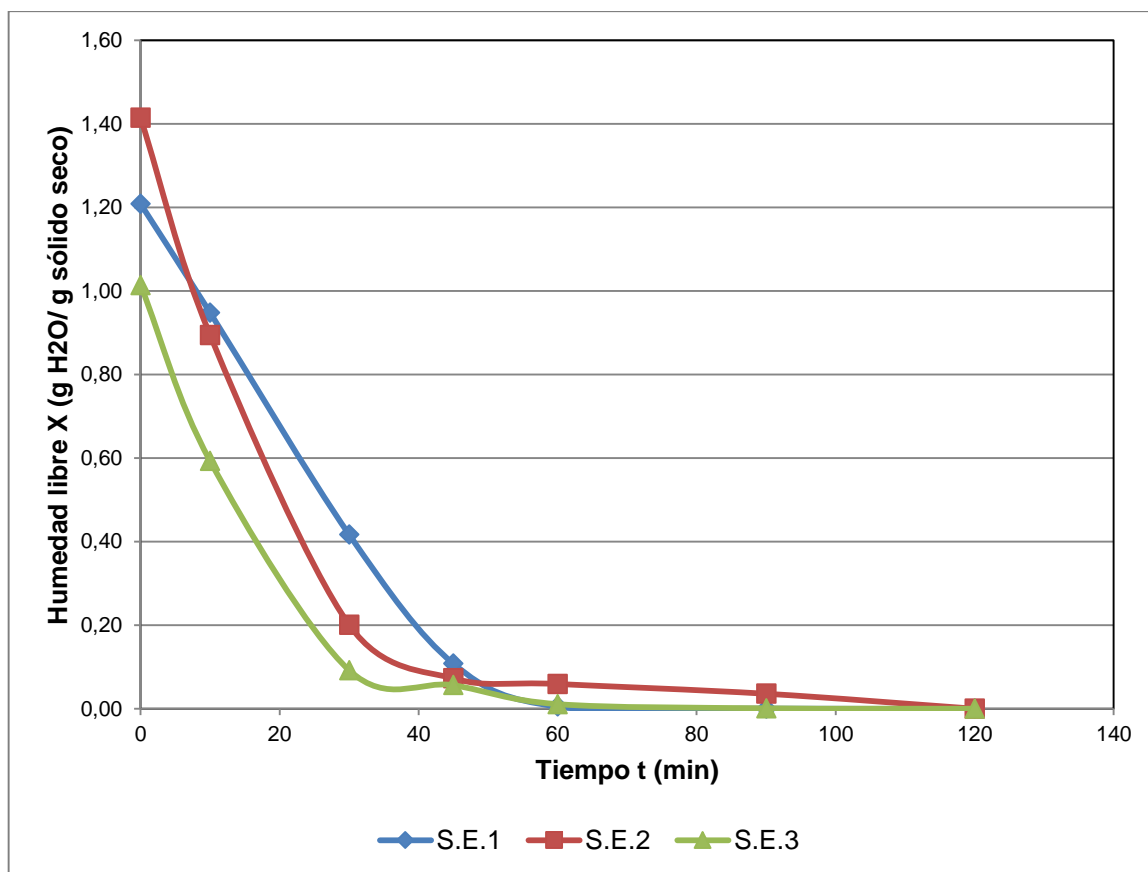
Ensayo	S.E.1	S.E.2	S.E.3
<b>Humedad en el equilibrio <math>X^*</math> (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)</b>	2,42E-04	1,25E-03	8,14E-04
<b>Humedad en el equilibrio prom. <math>X^*</math> (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)</b>	7,69E-04		

En la Tabla 3.23 se muestran los resultados de humedad libre calculados para cada pieza esmaltada, así como el valor promedio calculado en el ensayo. Al cabo de las dos horas se puede observar que el valor máximo de humedad que puede ser removido del sólido húmedo en g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco es de: 1,21 para el ensayo S.E.1, 1,41 para el ensayo S.E.2 y de 1,01 para el ensayo S.E.3. Al cabo de las 2 h de ensayo se puede observar que las piezas esmaltadas ya no pueden perder más humedad debido a que han llegado a las condiciones de equilibrio como se puede observar en la Figura 3.10 y la Tabla 3.23.

La pieza esmaltada del ensayo S.E.2 es la que presenta un mayor contenido de humedad libre y por lo tanto el valor de humedad en el equilibrio es el más alto

para esta pieza. Además se puede apreciar que al término del ensayo las piezas han perdido el total de contenido de humedad libre.

En la Figura 3.10 se muestra la disminución de la humedad libre de la suspensión porcelánica con el tiempo para los tres ensayos. Se puede observar que durante la primera media hora el contenido de humedad de las piezas del ensayo S.E.2 y S.E.3 disminuyó considerablemente, mientras que para la pieza del ensayo S.E.1 la disminución drástica fue durante los primeros 45 min. Este tiempo para las tres piezas representa el periodo de velocidad de secado constante.



**Figura 3.10.** Ensayo de secado para las tres piezas esmaltadas a 110°C

Posteriormente, la disminución de humedad se volvió más lenta para los tres ensayos, como se puede apreciar en la tendencia de las tres curvas de la Figura 3.10. Esto significa que el secado se encuentra en el periodo de velocidad decreciente, esto debido a que el aire ya se comienza a saturar a la temperatura

de operación de la estufa que es de 110 °C. Cabe recalcar que este periodo es donde se remueve la mayor cantidad de humedad de las piezas esmaltadas.

**Tabla 3.23.** Ensayo de secado para las piezas esmaltadas a temperatura de 110°C

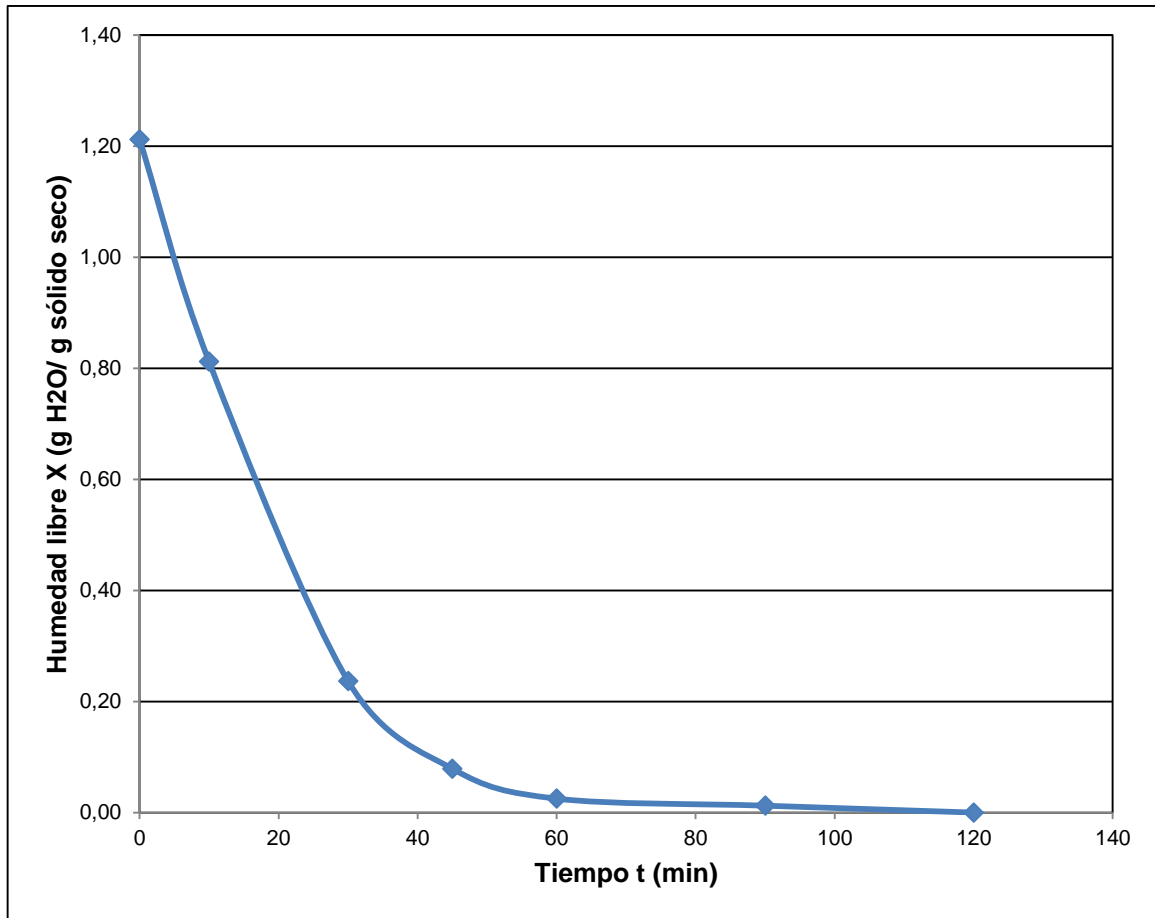
Tiempo (min)	X (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)			X prom (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)
	S.A.1	S.A.2	S.A.3	
0	1,21	1,41	1,01	1,21
10	0,95	0,90	0,59	0,81
30	0,42	0,20	0,09	0,24
45	0,11	0,07	0,06	0,08
60	5,00E-03	5,90E-02	1,10E-02	2,50E-02
90	3,02E-04	3,58E-02	1,09E-03	1,24E-02
120	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

**X:** Humedad libre (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

**X prom:** Humedad libre promedio de los tres ensayos (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco)

En la Figura 3.11 se muestra la tendencia de la curva de pérdida de humedad libre promedio del ensayo de secado a temperatura de 110 °C. Se puede observar que durante los primeros 45 min, la curva presenta una tendencia lineal donde hay una pérdida mayor de contenido de humedad. Este periodo corresponde al secado a velocidad constante y valor de humedad libre de 0,08 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco por lo cual hubo una pérdida de 113 en g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco.

A partir de los 45 min la pérdida de humedad es menor debido a la disminución de la velocidad de secado. Este periodo corresponde al secado a velocidad decreciente. Se puede observar que hay la pérdida total de la humedad libre de las piezas esmaltadas dado que se llega al valor de humedad de equilibrio.



**Figura 3.11.** Ensayo de secado a 110°C

En la Tabla 3.24 se muestran las condiciones del proceso de secado que se dio en la estufa a una temperatura de 110 °C, halladas después de realizar el ensayo. Estas condiciones serán tomadas para controlar el proceso de secado en la cámara de secado.

**Tabla 3.24.** Condiciones del proceso de Secado de piezas esmaltadas a temperatura de 110°C

<b>Contenido X inicial (base húmeda) (%)</b>	54,57
<b>Contenido X final (base húmeda) (%)</b>	0,08
<b>Temperatura (°C)</b>	110
<b>Presión (Pa)</b>	101 325
<b>Tiempo secado (h)</b>	2

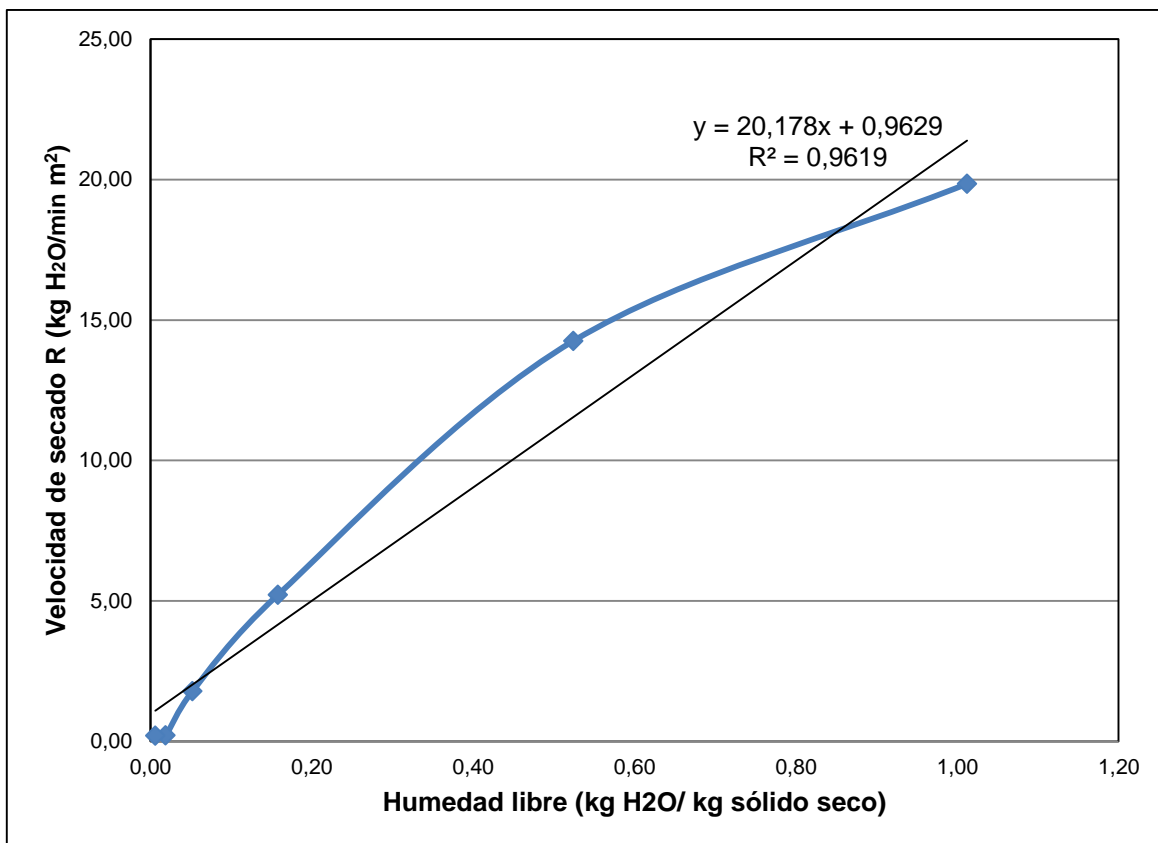
### 3.3.3.1 Determinación de la velocidad de secado

Para la determinación de la velocidad de secado de las piezas de acero esmaltadas se utilizó los cálculos y ecuaciones descritas en el ANEXO IV. En la Tabla 3.25 se muestran los resultados de velocidad de secado  $W$  (g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup>) determinados para cada punto del diferencial  $\Delta X$  y  $\Delta t$ . Dado que para la gráfica se utilizó el método diferencial también se calculó el  $X$  promedio.

**Tabla 3.25.** Condiciones del proceso de secado de piezas esmaltadas a temperatura de 110°C

Tiempo $t$ (min)	$X$ prom (g H <sub>2</sub> O/g sólido seco)	$\Delta X$	$\Delta t$	$\frac{\Delta X}{\Delta t}$	$W$ (g H <sub>2</sub> O/min·m <sup>2</sup> )	$X$ promedio
0	1,21	0,40	10,00	0,04	19,85	1,01
10	0,81	0,58	20,00	0,03	14,26	0,52
30	0,24	0,16	15,00	0,01	5,21	0,16
45	7,90E-02	5,40E-02	1,50E+01	4,00E-03	1,78	0,05
60	2,50E-02	1,30E-02	3,00E+01	0,00E+00	0,21	0,02
90	1,20E-02	1,20E-02	3,00E+01	0,00E+00	0,21	0,01

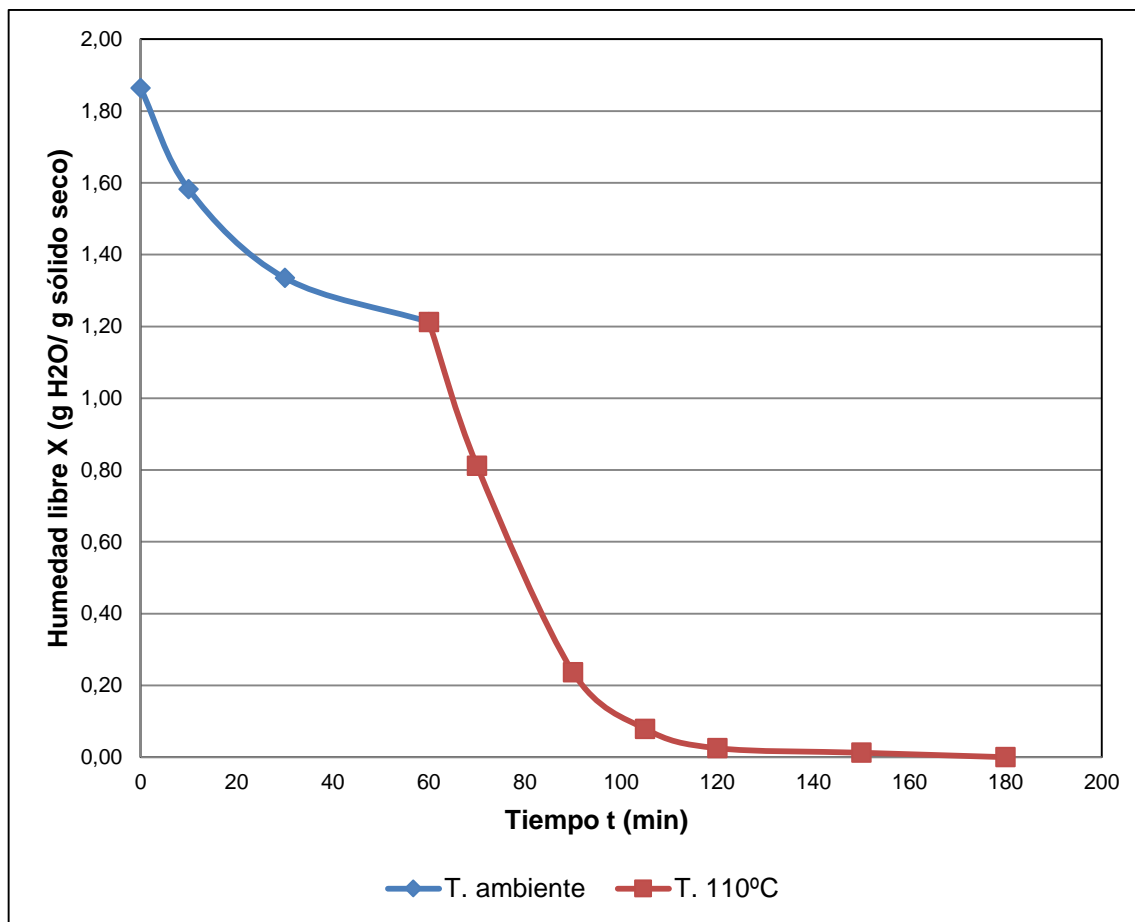
En la Figura 3.12 se muestra la curva de velocidad en función de la humedad libre para condiciones de temperatura y presión constante, se puede observar que la curva presenta la misma tendencia de las curvas de los ensayos de secado. Dado que el mayor contenido de la humedad libre que se encontraba como no ligada en la suspensión porcelánica se evaporó en el secado a temperatura ambiente, durante esta etapa del secado en la estufa, el periodo a velocidad constante es bastante corto por lo que no se puede apreciar claramente en la Figura 3.7.



**Figura 3.12.** Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el ensayo a 110 °C

En los primeros 10 minutos, se observa que la velocidad de secado no varían mucho, con valores que van desde 19,85 g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup> a 14,26 g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup>. A partir de la media hora del ensayo la velocidad de secado disminuye hasta un valor de 5,21 g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup> y un contenido de humedad de 0,24 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco. En este punto el valor de la velocidad corresponde al valor de velocidad crítica, ya que se da el cambio de velocidad constante a velocidad decreciente. Esto también se puede observar en la Figura 3.11, donde hay un cambio drástico en la disminución del contenido de humedad libre.

Cuando la velocidad de secado llega a 0,21 g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup> y un contenido de humedad de 0,03 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco a la hora de secado culmina el primer periodo de secado a velocidad decreciente. A partir de este tiempo la velocidad de secado disminuye con mayor rapidez hasta que el contenido de humedad libre iguala el contenido de humedad de equilibrio, que es cuando el proceso de secado termina.



**Figura 3.13.** Proceso de secado de las piezas esmaltadas

En la Figura 3.13 se muestra la disminución del contenido de humedad en función del tiempo total de secado de las piezas esmaltadas tanto en la etapa a temperatura ambiente como en la etapa a temperatura de 110 °C. En la primera etapa a temperatura ambiente, se puede observar en la Figura 3.13, que hay una pérdida total de humedad de 0,65 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco con una velocidad menor en comparación con la que existe en la segunda etapa que es mayor.

Cabe recalcar que esta etapa del secado a temperatura ambiente es importante debido al carácter arcilloso y pseudoplástico que presenta la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47. Al presentar un mayor número de poros, la evaporación del agua del interior de la suspensión es mayor. Si se elevará la temperatura, y por lo tanto la velocidad de secado drásticamente durante esta etapa en la superficie de la pieza esmaltada se podría producir agrietamientos y fallas.



En la segunda etapa de secado a una temperatura de 110 °C, la elevación de la temperatura permitió obtener una mayor velocidad de secado principalmente en el periodo que va desde los 60 min hasta los 90 min. La pérdida del contenido de humedad tuvo un valor de 0,976 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco.

Después de este tiempo el secado presenta una disminución de la velocidad de secado hasta llegar a las condiciones de equilibrio de humedad y máxima saturación del aire que circula en el interior de la estufa. En esta fase el agua que se evapora corresponde al agua ligada, por lo que hay la intervención de las fuerzas capilares por la tensión interracial entre agua y el sólido, esto provoca que la velocidad disminuya (Costa, 2004, p. 67).

### 3.3.3.2 Dimensionamiento de la cabina de secado controlada

Debido a las características de las piezas metálicas, forma y tamaño se escogió un secador tipo bandejas o cabina. Para facilitar el transporte y evitar tiempos muertos, las piezas se las colocaran en carretillas rodantes las cuales ingresarán al secador. Además este tipo de equipos tiene un mecanismo para la recirculación del aire seco. En la Tabla 3.26 se muestran las condiciones a las que se encuentra el aire dentro de la cabina de secado. La temperatura de bulbo húmedo se calculó a partir de las cartas psicométricas.

**Tabla 3.26.** Parámetros del aire seco que circula en el secador

Humedad absoluta del aire ( g H <sub>2</sub> O/ g aire)	0,01
Temperatura del bulbo seco (°C)	110
Temperatura del bulbo húmedo (°C)	37
*Velocidad del aire dentro del secador (m/s)	4,10

\*(Geankoplis, 2006, p. 596)

El mecanismo de transferencia de calor por convección es el que predomina en este tipo de equipos, debido a que esta transferencia se da por la diferencia de temperaturas entre el aire seco que circula en la cabina y las piezas esmaltadas.

Para el presente trabajo se despreció la transferencia de calor dada por los mecanismos de conducción y radiación.

A partir de las condiciones de operación, rangos de humedad y velocidad de secado se calculó el calor necesario para la operación de secado a 110 °C. En la Tabla 3.27, se muestran los parámetros que intervienen en la transferencia de calor como coeficiente de convección, calor, etc. En el ANEXO IV se muestra el ejemplo de cálculo.

**Tabla 3.27.** Parámetros de la transferencia de calor calculados

Volumen húmedo $V_H$ , $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}\right)$	1,10
Densidad aire seco $\rho$ , $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	1,00
Flujo másico de aire, $G$ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}\right)$	14 700,96
Coeficiente de convección, $h$ $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right)$	44,01
Calor consumido, $Q$ (kW)	28,90

Para el dimensionamiento del secador tipo cabina, principalmente se tomó en cuenta la capacidad requerida para este proceso que es de las 20 piezas que salen del proceso de secado en la cámara de secado, así como el calor que el equipo deberá proporcionar para llegar a las condiciones finales de humedad de las piezas esmaltadas. La disposición de las carretillas rodantes con las piezas esmaltadas, será la misma que se presenta en la cámara de secado, como se puede apreciar en la Figura 3.9. Las dimensiones del secador tipo cabina serán las mismas que las de la cámara de secado que son: 2,7 m de largo por 3,5 m de ancho, la altura de la cámara será según las disposiciones del fabricante, la cámara dispondrá de circulación constante de aire a una temperatura de 110 °C. Para cumplir con la producción diaria de la planta, se deberán instalar dos secadores tipo cabina.

### 3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO PARA LA COCCIÓN DEL ESMALTE Y QUE SE CALIENTE POR COMBUSTIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ

#### 3.4.1 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

En el proceso de la cocción de las piezas esmaltadas se utilizará como combustible cascarilla de arroz, para lo cual se determinó el poder calorífico que este material tiene. En la Tabla 3.28 se muestran las especificaciones del alambre de ignición utilizado en los ensayos que se realizaron en la bomba calorimétrica que se encuentra en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.

**Tabla 3.28.** Especificaciones del alambre de ignición Ni-Cr

Longitud Li (cm)	10
Poder calórico del alambre qz (J/cm)	2,69
Peso (g/cm)	0,01
P. alambre (g)	0,11

Para poder determinar el poder calórico de la cascarilla de arroz, en primer lugar se determinó el poder calórico del ácido benzoico, sustancia utilizada como control para calibrar la bomba calorimétrica. En la Tabla 3.29 se muestran los resultados del ensayo, el que consistió en tomar los pesos iniciales de la sustancia y los pesos finales después de la combustión, además de la medición del residuo del alambre de ignición que no se quemó.

Además durante el ensayo, al sacar la copa que contenía el residuo del ácido benzoico combustionado, sólo se pudo observar una finísima capa negra. En las otras pruebas si se podía observar una mayor cantidad de la muestra combustionada.

**Tabla 3.29.** Resultados de los ensayo para la determinación del poder calórico del ácido benzoico en la bomba calorimétrica

Prueba	Peso pastilla + alambre (g)		Peso pastilla (g)		Temperatura (°C)		Residuo alambre (cm)	Masa total	Masa sin residuo	Porcentaje de residuo (%)
	Inicio	Residuo	Inicio	Final	Constante C (J/g)	Constante C (J/g)				
1	0,892	0,787	0,009	20	23	1,1	6 939,286	6 857,339	1,182	
2	0,843	0,738	0,007	20,1	22,9	1,5	6 972,905	6 904,930	0,976	
3	0,858	0,753	0,007	20,3	23,2	3,7	6 865,326	6 803,342	0,904	
4	0,789	0,684	0,009	19,96	22,59	1,4	6 882,975	6 795,530	1,272	
5	0,776	0,671	0,001	20,48	23,1	1,4	6 774,047	6 769,002	0,075	

Además, en la Tabla 3.29, se pueden observar los resultados del poder calorífico del ácido benzoico calculado para cada prueba realizada en la bomba calorimétrica y su ejemplo de cálculo se muestra en el ANEXO V. En la Tabla 3.30 se muestra el valor medio del poder calorífico del ácido benzoico tanto para la masa sin residuo como para la masa con residuo, el mismo que se calculó a partir de los resultados del ensayo.

Se puede observar que el valor del poder calorífico en el que se toma en cuenta la masa total es igual a 6 897,46 J/g, el mismo que es mayor al de la masa sin residuo con un valor igual a 6 848,24 J/g. Esto se debe que en el caso en el que toma en cuenta la masa total hay una combustión total de la muestra. El error calculado para ambos casos no supera el 10 % por lo que se considera como valores aceptables.

Debido a que el residuo de la masa de la muestra después de la combustión es mínimo como se puede observar en la Tabla 3.29, el porcentaje de residuo no supera el 1,27 %. Para los posteriores cálculos se tomará en cuenta el poder calorífico calculado para la masa total. Según los proveedores de este reactivo el poder calorífico es de 7 654,7 J/g, la diferencia con el valor calculado se puede deber a que el reactivo se encontraba desgastado o afectado por impurezas del ambiente o también debido a errores dadas por el equipo utilizado en el Laboratorio de Termodinámica, por lo cual el valor del poder calorífico disminuyo.

**Tabla 3.30.** Poder calorífico del ácido benzoico

	<i>Masa sin residuo</i>	<i>Masa total</i>
	<b>Constante C (J/g)</b>	<b>Constante C (J/g)</b>
<b>Media</b>	6 848,24	6 897,46
<b>Mediana</b>	6 881,13	6 956,09
<b>Desviación estándar</b>	33,65	23,77
<b>Error</b>	10,54	9,89

En la Tabla 3.31, se puede observar los resultados del ensayo realizado en la bomba calorimétrica, el ejemplo de cálculo se muestra en el ANEXO V.

En la Tabla 3.31 se muestra el poder calorífico de la cascarilla de arroz tanto para la masa total como para la masa sin residuo de la muestra. Se puede observar que los valores del poder calorífico calculados para la masa sin residuo son mayores en comparación con los calculados para la masa total. Para todas las pruebas el porcentaje de residuo no supera el 23,01 %, por lo que para este caso para los posteriores cálculos se deberá tomar en cuenta el valor del poder calorífico calculado a partir de la masa sin residuo.

En la Tabla 3.32 se muestra el valor medio del poder calorífico de la cascarilla de arroz de la masa sin residuo y de la masa con residuo, el mismo que se calculó a partir de los resultados del ensayo que se encuentran en la Tabla 3.31. Se puede observar que el valor del poder calorífico en el caso en el que se toma en cuenta la masa total es igual a 12 003,35 J/g con un error del 23,548 %, mientras que para el caso en el que se toma en cuenta la masa sin residuo es igual a 15 486,140 J/g con un error del 1,365 %. Debido a que para el cálculo del error se tomó en cuenta como valor referencial o ideal al presentado en bibliografía (Castells, 2012, p. 708), el cual es de 15 700,500 J/g, dicho valor fue calculado a partir del rango presentado en la Tabla 3.33.

**Tabla 3.31.** Resultados de los ensayo para la determinación del poder calórico de la cascarilla de arroz en la bomba calorimétrica

<b>Prueba</b>	<b>Peso cascarilla (g)</b>		<b>Temperatura (°C)</b>		<b>Residuo alambre Lf (cm)</b>	<i>Masa total</i>	<i>Masa sin residuo</i>	<b>Porcentaje de residuo (%)</b>
	<b>Inicio</b>	<b>Residuo</b>	<b>Inicio Ti</b>	<b>Final Tf</b>		<b>Poder calórico qc (J/g)</b>	<b>Poder calórico qc (J/g)</b>	
1	0,754	0,172	20,06	21,38	2	12 043,392	15 444,739	22,832
2	0,77	0,177	20,02	21,36	1,5	11 981,456	15 406,980	23,041
3	0,762	0,177	20	21,3	1,5	11 737,312	15 132,454	23,241
4	0,785	0,181	19,9	21,3	3	12 272,523	15 775,075	23,01
5	0,746	0,172	20	21,3	0,9	11 982,069	15 419,687	23,101
6	0,772	0,174	20,2	21,5	0,8	11 579,835	14 802,759	22,585
7	0,757	0,174	20,26	21,5	1,3	11 273,389	14 475,858	22,932
8	0,797	0,182	20,43	21,8	1	11 823,017	15 149,341	22,767

**Tabla 3.32.** Poder calorífico experimental de la cascarilla de arroz

	<i>Masa total</i>	<i>Masa sin residuo</i>
<i>Media</i>	12 003,35	15 486,14
<i>Mediana</i>	11 982,07	15 470,00
<b>Desviación estándar</b>	190,89	228,93
<b>Error</b>	23,55	1,36

**Tabla 3.33.** Caracterización cascarilla de arroz

<b>*Poder calorífico superior (J/g)</b>	14 235,10 – 17 165,90
<b>Poder calorífico superior experimental (J/g)</b>	15 486,14
<b>Humedad (%)</b>	8,37

\*(Castells, 2012, p. 708)

Como se puede observar en la Tabla 3.33, y como se mencionó anteriormente, el poder calorífico superior calculado a partir de los resultados realizados en la bomba calorimétrica, se encuentra dentro de los rangos establecidos de 14 235,10 J/g a 17 165,90 J/g según bibliografía (Castells, 2012, p. 708). Cabe recalcar que el poder calorífico calculado a partir de las pruebas realizadas en la bomba calorimétrica corresponde al poder calorífico superior, dado que en el ensayo se libera energía.

Para verificar que la materia prima tenga las mejores características y condiciones, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela Politécnica Nacional para determinar la humedad de la cascarilla de arroz. A partir de estas pruebas se encontró que una muestra de cascarilla de arroz proveniente de los molinos Agrocomexport Cia.Ltda. ubicados la ciudad de Machachi tiene una humedad de 8,37 %, humedad cercana a la establecida por bibliografía como se puede ver en la Tabla 1.9. A pesar de que el porcentaje de humedad que presenta la cascarilla de arroz es baja, se deberá secar esta materia prima para evitar pérdidas de calor por la



evaporación del agua contenida en la cascarilla. Además, este pre-tratamiento permitirá que en la cocción la combustión de la cascarilla de arroz llegue a mayores temperaturas.

### 3.4.2 BALANCE TÉRMICO EN EL HORNO DE COCCIÓN DE LAS PIEZAS DE ACERO

Para realizar el balance térmico en el horno de cocción se consideró una sola fase de calentamiento debido a que el esmalte en las piezas casi se encuentra en estado sólido. Las piezas provenientes del proceso de secado se las introducirá en el horno, a una temperatura que va entre los 20 °C hasta los 900 °C.

El proceso de cocción en el esmaltado de las piezas de acero es muy importante dado que después de retirar la mayor cantidad de agua ligada de las piezas en el proceso de secado, la adherencia esmalte-metal requiere de ciertas reacciones químicas de óxido – reducción. Estas reacciones son posibles únicamente a altas temperaturas, que se logran durante este proceso y su posterior enfriamiento (ArcelorMittal, 2008, p. 20; Baldwin C., y Feldman S., 2007, pp. 6,7).

Para la cocción de las piezas metálicas el tipo de horno más apropiado es el del tipo caja, en el cual se podrá colocar las piezas esmaltadas sin ningún inconveniente debido a su forma y disposición en las carretillas. Para los cálculos realizados se utilizó el método de lobo y Evans, las consideraciones de cálculo más comunes para este tipo de equipo se muestran en la Tabla 3.34.

**Tabla 3.34.** Consideraciones de cálculo para el dimensionamiento del horno tipo caja

<b>Densidad de flujo (W/m<sup>2</sup>)</b>	34 100
<b>Factor de intercambio, F</b>	0,57
<b>*Eficiencia horno tipo caja (%)</b>	75
<b>Exceso aire para combustibles sólidos (%)</b>	25

\* (Kern, 2006, pp. 772,794)

Como consideración de cálculo se consideró que en la planta operará un sobrecalentador de vapor con un rango de densidad de flujo entre 28 200 W/m<sup>2</sup> a 40 000 W/m<sup>2</sup> (Cao, 2004, p. 374), de cuyo rango se tomó el promedio como se presenta en la Tabla 3.34. La selección y los cálculos realizados para el dimensionamiento del horno tipo caja se muestra en el ANEXO V.

Para el cálculo de la temperatura de los gases de salida se tomó en cuenta un factor de intercambio de 0,57 (Kern, 2006, p. 794) y una densidad de flujo igual a 34 100 W/m<sup>2</sup> (Kern, 2006, p. 772) como se indica en la Tabla 3.34. Debido a que, para la cocción de las piezas esmaltadas se requiere una temperatura de 900 °C., se consideró que esta corresponde a la de la sección radiante, de esta manera se obtuvo una temperatura de los gases de salida igual a 1 121,11 °C.

En la Tabla 3.35 se muestran los resultados del balance energético realizado, en el que se consideró que se requerirá una carga total del horno igual a  $63,30E6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ , valor que corresponde al 75 % de eficiencia del horno tipo caja (Kern, 2006, p. 772). Para que la combustión de la cascarilla de arroz se logre en un menor tiempo y evitar pérdidas de energía, el aire que ingresará al horno se precalentará a 477,440 K.

Se supuso para el cálculo del calor perdido por las paredes del horno un valor de 2 % del calor debido a la carga total del horno (Kern, 2006, p. 772). Además, en la Tabla 3.35 se muestran los resultados tanto de la sección radiante como de la sección convectiva, sin tomar en cuenta las pérdidas debidas al calentamiento de las piezas metálicas y esmalte, y las pérdidas en la salida de los gases de combustión. Se puede apreciar que el calor debido a la transferencia de calor por radiación es mayor al calculado por transferencia por convección, ya que es el proceso predominante en este tipo de equipos.

**Tabla 3.35.** Resultados balance energético en el horno tipo caja

*Carga total del horno $\dot{Q}_F$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ ),	63,30E6
Calor ingresa por aire precalentado $Q_A$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	12,03E6
Calor perdido a través de las paredes del horno $Q_{W0}$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	12,67E5
Calor perdido por los gases de salida $Q_G$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	39,25E6
Total calor disponible para la cocción de las piezas de acero $Q$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	34,97E6
Calor en la sección convectiva $Q_c$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	50,50E7
Calor en la sección radiante $Q_r$ , ( $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ )	30,02E8

\* (Kern, 2006, p. 772)

A partir del poder calorífico de la cascarilla de arroz previamente calculado y la carga total del horno se pudo encontrar que para suministrar tal cantidad de calor para la cocción de las piezas de acero esmaltadas se necesitará de 12,230 kg/h. La composición de la cascarilla de arroz es la que se muestra en la Tabla 1.9 y los cálculos se muestran en ANEXO V.

### 3.4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Para el dimensionamiento de la cámara de combustión del horno se tomó en cuenta la capacidad de las 20 piezas que salen de la etapa de secado, además de los resultados obtenidos del balance energético. Para este proceso se fija como tiempo de producción de una hora.

Se consideró que el diámetro de los tubos para la sección radiante es el promedio calculado a partir del rango entre 0,10 m y 0,15 m (Cao, 2004, p. 362), el cual se muestra en la Tabla 3.36. La selección y consideraciones de cálculo para el dimensionamiento del horno tipo caja se muestra en el ANEXO V.

**Tabla 3.36.** Consideraciones sobre la tubería de la sección radiante del horno tipo caja

<b>Diámetro exterior de los tubos (m)</b>	0,127
<b>Longitud de tubos (m)</b>	10,97
<b>Distancia centro – centro (m)</b>	0,203

A partir de las consideraciones realizadas y los resultados del balance energético, se determinó que se requerirá de 65 tubos, los cálculos se muestran en el ANEXO V. Con el número de tubos calculado y la disposición de las carretillas rodantes con las piezas esmaltadas que será la misma que la que se presenta en el proceso de secado, se determinaron las dimensiones de la cámara de cocción cuyos valores externos son de 5,93 m de ancho por 5,30 m de largo, la altura de la cámara será según las disposiciones del fabricante. En la Figura 3.14 se puede apreciar tanto la disposición de tubos en la cámara de cocción, así como las dimensiones internas de la misma.

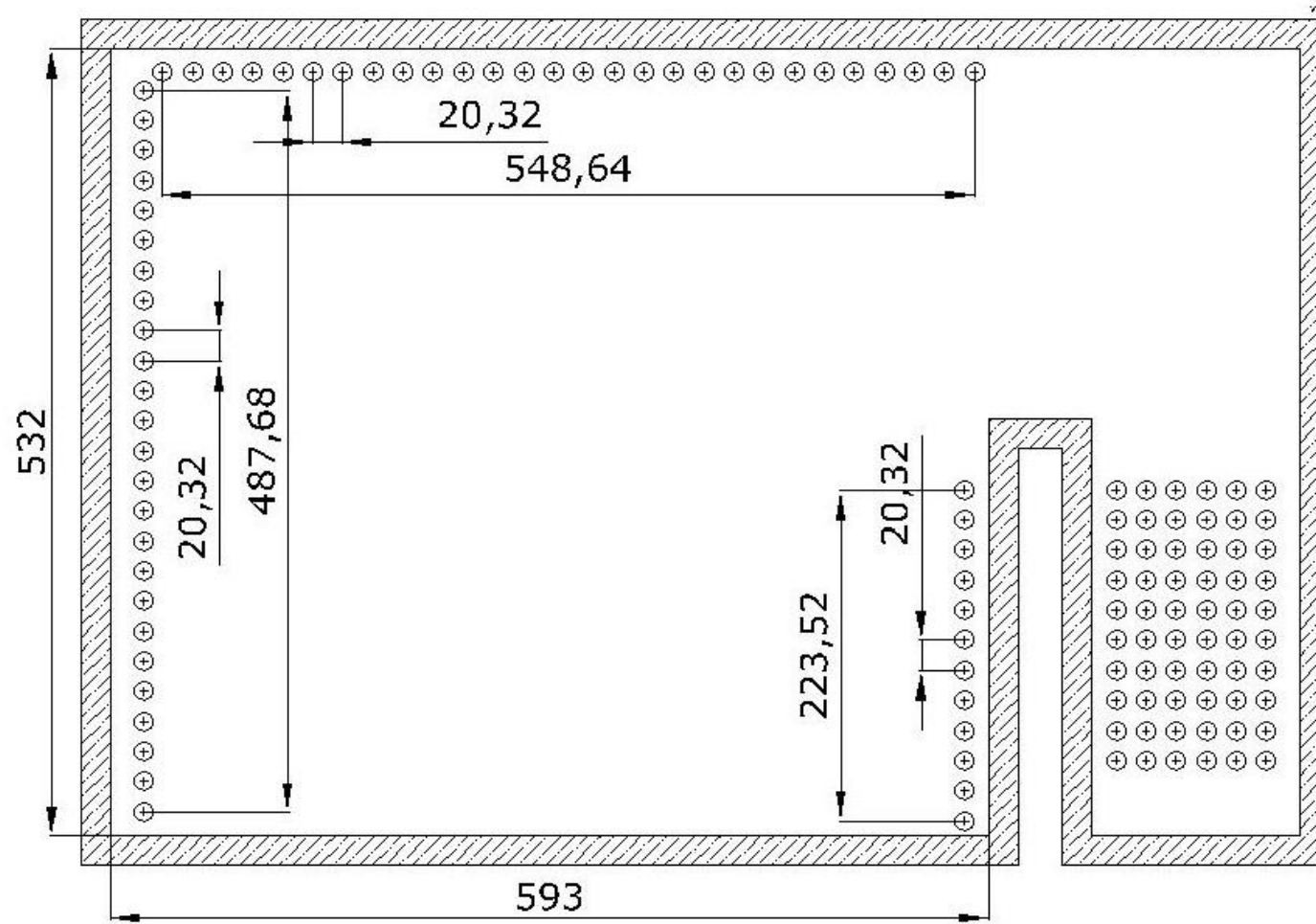
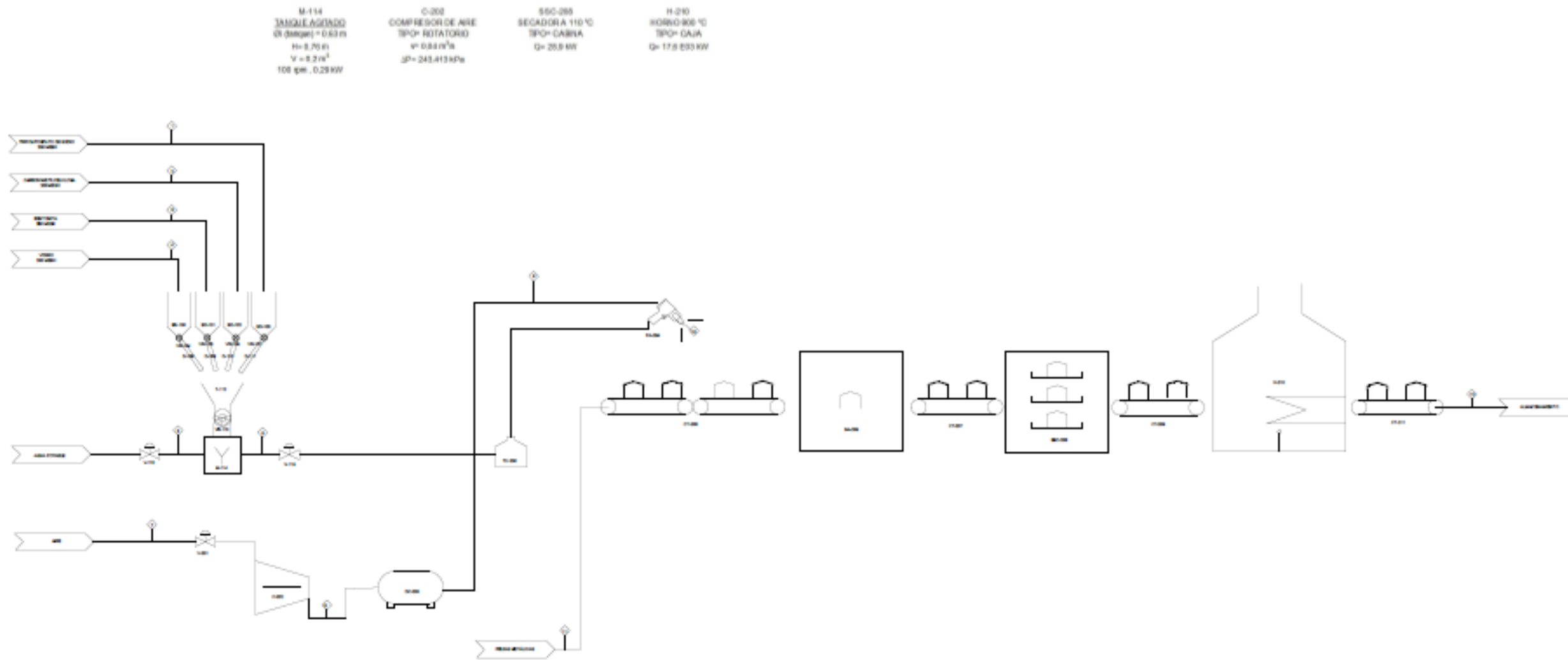


Figura 3.14. Horno



M-114  
 TANQUE AGUADO  
 Ø (diámetro) = 0.63 m  
 H = 3.70 m  
 V = 3.2 m<sup>3</sup>  
 108 gal., 0.29 KW

C-202  
 COMPRESOR DE AIRE  
 TPO= ROTATORIO  
 V= 0.84 m<sup>3</sup>/s  
 JP= 243.413 KW

S50-285  
 SECADORA 110 °C  
 TPO= CARBIA  
 Q= 25.8 KW

H-210  
 HORNO 908 °C  
 TPO= OAJA  
 Q= 17.8 833 KW


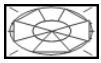




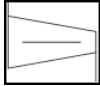



NUMERO CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CARACTERISTICAS												
Vidrio (g)				38336.96								
Borax (g)			1193.08									
Triphosfato de sodio (mpuro) (g)	211.54											
Carbonato de sodio (mpuro) (g)		39.81										
Agua (m <sup>3</sup> )					141066.1							
Suspensión porcelánica Sol. 53.47 (g)						300140.5						
Aire m <sup>3</sup> /s (101.325 kPa)							0.04					
Aire m <sup>3</sup> /s (344.738 kPa)								0.04				
Aire m <sup>3</sup> /h (344.738 kPa)									0.83			
Esmalte (g)										29.7		
Piezas metálicas (unidad/h)											22	
Piezas esmaltadas (unidad/h)												22

EPN	PLANTA DE ESMALTADO DE PIEZAS DE ACERO	DES. ANTORA VACA	ESCALA
			---
	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO	AV-2014-00x	FECHA 11/09/2014






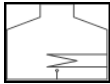
Figura 3.15. PFD (Process Flow Diagram) de la planta de esmaltado de piezas de acero

En la Figura 3.15 se muestra el PFD de la planta de esmaltado de piezas de acero. En el mismo que se presenta todos los procesos que se dan a cabo como: preparación del esmalte, esmaltado de las piezas de acero, secado de las piezas esmaltadas y finalmente la cocción de las piezas. En el Tabla 3.37 se muestra la nomenclatura y simbología de los equipos utilizados para representar el PFD de la Figura 3.15.

**Tabla 3.37.** Nomenclatura y simbología de los equipos utilizados en el PFD

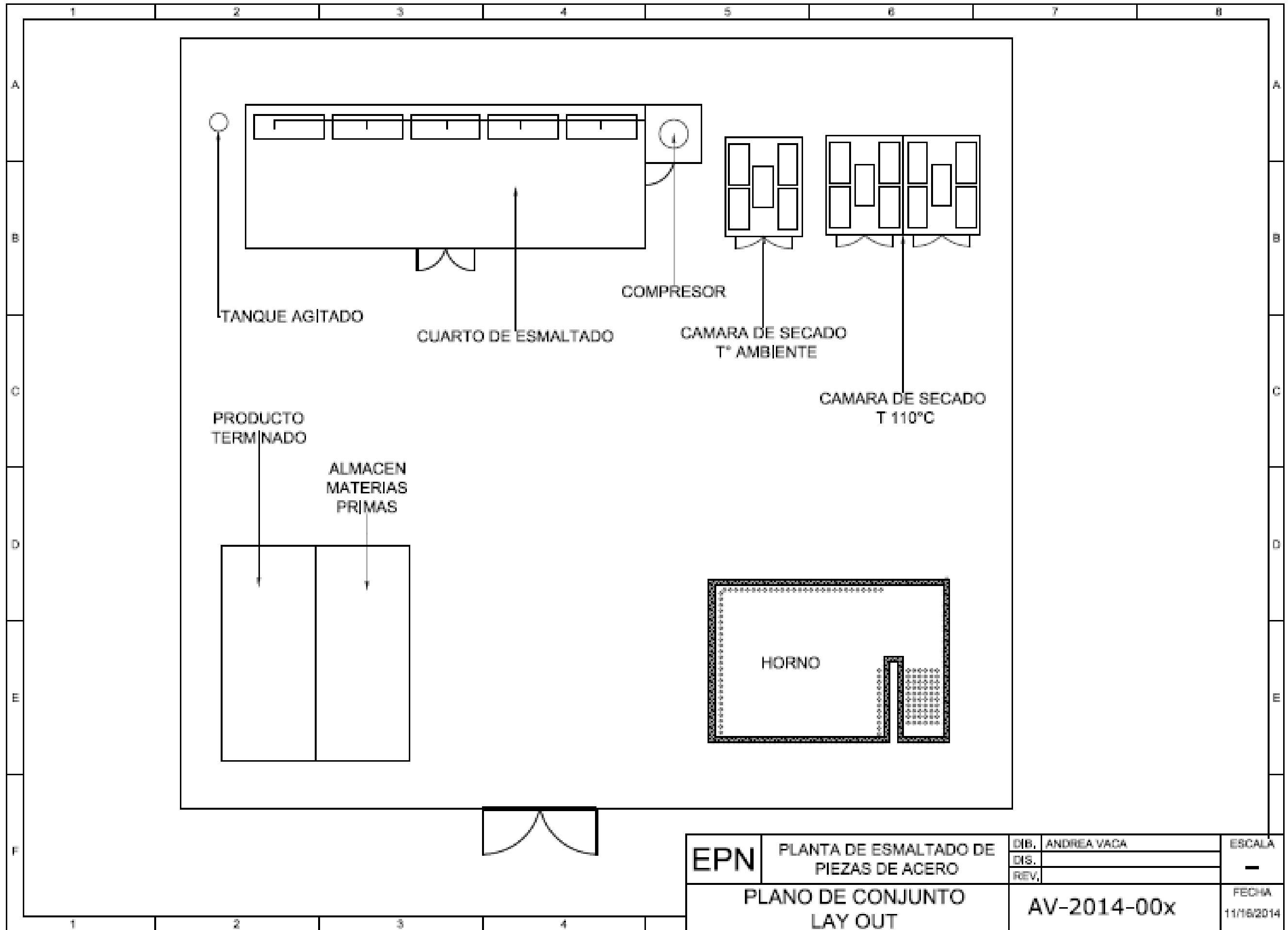
NOMBRE DEL EQUIPO	NOMENCLATURA	SÍMBOLO
Saco Dispensador	SD	
Válvula rotatoria	VR	
Tolva	T	
Dispensador	D	
Válvula	V	
Mezclador	M	
Compresor	C	
Depósito de aire comprimido	DC	
Tanque dispensador	TD	
Pistola de aspersión	PA	

**Tabla 3.37.** Nomenclatura y simbología de los equipos utilizados en el PFD  
(Continuación)

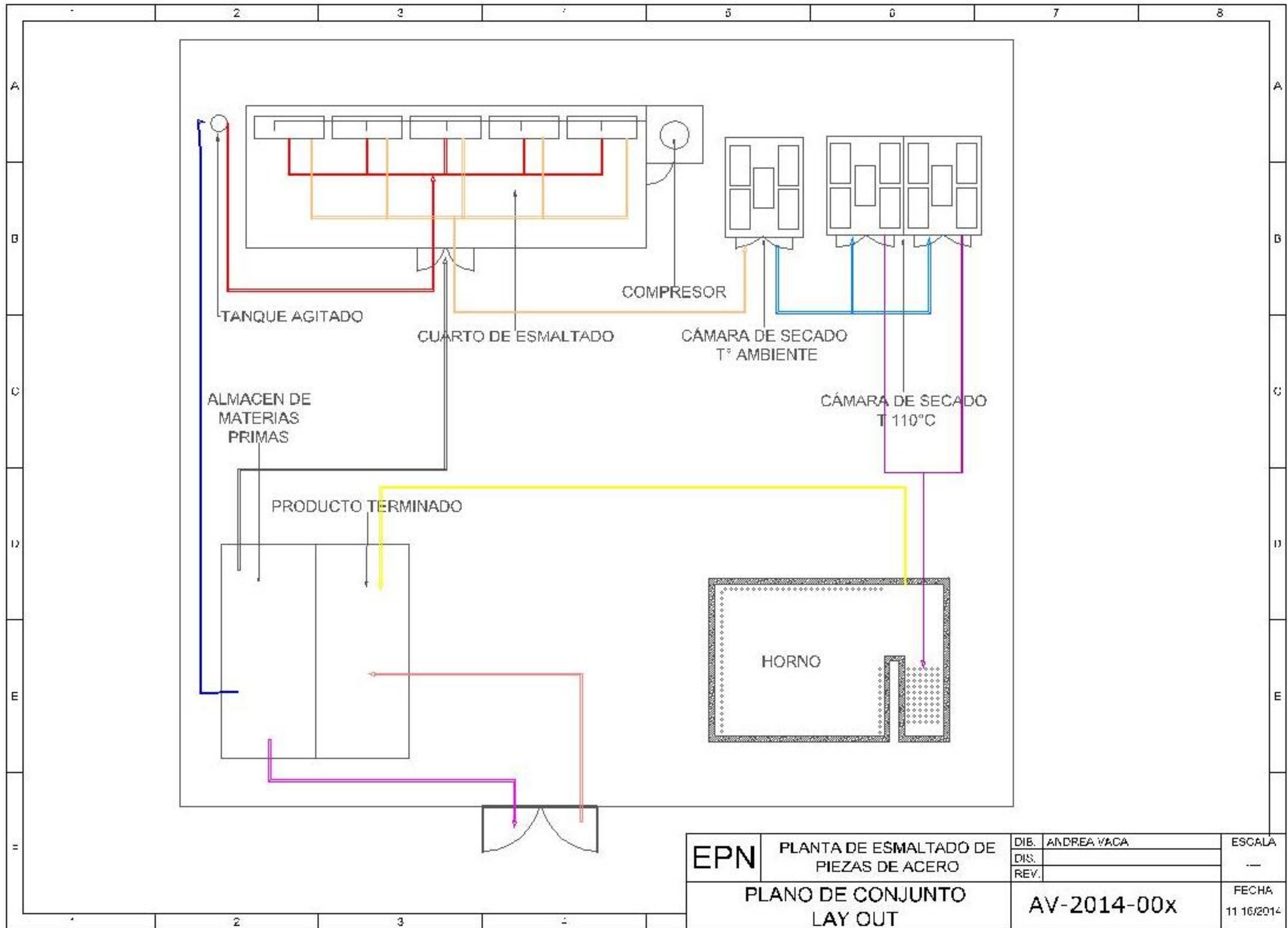
Pieza metálica	PM	
Pieza metálica en movimiento	PM	
Carro Transportador	CT	
Secador Temperatura Ambiente	SA	
Secador tipo Cabina	SSC	
Horno tipo Caja	H	

En los planos que se encuentran a continuación se muestra el layout de la planta así como también el recorrido del producto. En la Tabla 3.38 se muestra la nomenclatura de los colores de las líneas del recorrido del producto.






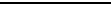
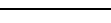
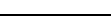





<b>EPN</b>	PLANTA DE ESMALTADO DE PIEZAS DE ACERO	DIB. ANDREA VACA	ESCALA
		DIS.	-
		REV.	
PLANO DE CONJUNTO LAY OUT		AV-2014-00x	FECHA 11/16/2014



<b>EPN</b>	PLANTA DE ESMALTADO DE PIEZAS DE ACERO	DIB. ANDREA VACA	ESCALA ---
	<b>PLANO DE CONJUNTO LAY OUT</b>	DIS.	FECHA 11/16/2014
		REV.	
		<b>AV-2014-00x</b>	

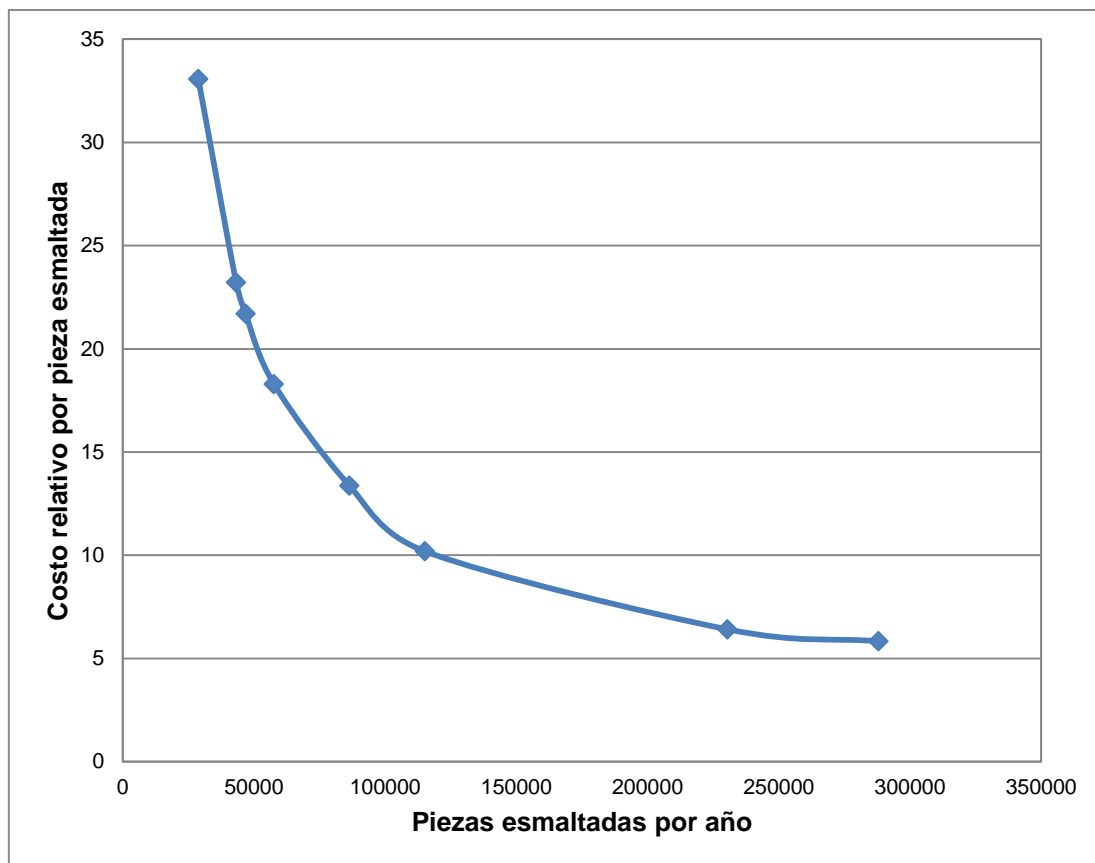
**Tabla 3.38.** Nomenclatura de líneas en el recorrido del producto en el plano layout

LÍNEA DE PRODUCCIÓN	COLOR
Ingreso de materias primas	
Materias primas suspensión porcelánica S/L 53:47	
Suspensión porcelánica S/L 53:47	
Piezas metálicas	
Piezas metálicas esmaltadas	
Piezas metálicas esmaltadas secadas a temperatura ambiente	
Piezas metálicas esmaltadas secadas a 110 °C	
Piezas metálicas esmaltadas salientes del proceso de cocción	
Producto final	

### 3.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COSTO DEL PROCESO DE ESMALTADO

El análisis económico de la planta de esmaltado de piezas de acero se realizó para una capacidad de procesamiento de 100 m<sup>2</sup> de acero por día, es decir 222 piezas esmaltadas de 0,45 m<sup>2</sup> cada una. Se tomó en cuenta el costo de producción de las piezas esmaltadas y el costo de venta. Además, se estableció un día laboral de 16 h con dos turnos de 8 h para los trabajadores.

En la Figura 3.16 se puede observar el costo relativo por pieza esmaltada. Al comparar con la escala de producción presentada en la Tabla 1.3, se comprueba que la capacidad impuesta para el diseño de la planta de esmaltado corresponde a una producción a pequeña escala. Además, se puede mencionar que a partir de la producción de 115 200 piezas anuales, el costo por pieza esmaltada disminuye notablemente. Esta producción si más bien supera la escala para pequeña producción no llegaría a la mediana producción. A partir de 288 000 piezas producidas se puede observar que el costo según la tendencia de la curva se mantendrá estable.



**Figura 3.16.** Costos de producción de las piezas esmaltadas

La curva de la Figura 3.16 sigue la función que se muestra en la ecuación [3.1]. Esta función se la obtuvo a partir de los costos de operación por número de piezas producidas.

$$C = \text{CostoMateriales} \times \text{Factor 1} + \text{Mano de obra directa} + \text{Mano de obra indirecta} \times \text{Factor 2} + \text{Insumos} \times \text{Factor 1} + \text{Maquinaria} \times \text{Factor 3} + \text{Imprevistos} + \text{Mantenimiento equipos} \quad [3.1]$$
















Cabe destacar que el Factor 1 se lo calcula a partir de los múltiplos del sub-lote que en este caso fue de 120, este valor corresponde al número de piezas esmaltadas en un turno de 8 h. El factor 2 es el calculado del submúltiplo de número de operarios que trabajan en un turno. El factor 3 es igual a 2 a partir 480 piezas esmaltadas. En la Tabla 3.39 se muestra el costo/pieza para el total de piezas producidas anualmente.

**Tabla 3.39.** Costos totales por piezas






<b>#PIEZAS POR DÍA</b>	<b>#PIEZAS POR AÑO</b>	<b>COSTO TOTAL POR AÑO</b>	<b>COSTO/ PIEZA</b>
120	28 800	952 354,77	33,07
180	43 200	1 003 014,04	23,22
195	46 800	1 015 678,86	21,70
240	57 600	1 053 673,31	18,29
360	86 400	1 154 991,86	13,37
480	115 200	1 173 698,81	10,19
960	230 400	1 477 022,77	6,41
1200	288 000	1 679 659,86	5,83

En la Tabla 3.40 se muestra los tiempos de operación en cada una de las actividades y procesos para el diseño de la planta, análisis económico y planificación de la producción. En la Tabla 3.41 se muestra la simbología utilizada.

**Tabla 3.40.** Tiempos de operación en cada uno de los procesos y actividades

N°	DETALLES	ACCIONES	TIEMPO (min)
1	Preparación de la suspensión porcelánica S/L 43:57		60
2	Transporte de esmalte hacia recipientes		5
3	Esmaltado de las piezas de acero		60
4	Ubicación de piezas esmaltadas en los carritos		15
5	Transporte de piezas esmaltadas		5
6	Ubicación de piezas en Cuarto de secado		5
7	Secado a temperatura ambiente		60
8	Transporte de piezas esmaltadas		5
9	Ubicación de piezas en Cuarto de secado		5
10	Secado a temperatura de 110 °C		120
11	Transporte de piezas esmaltadas		5
12	Ubicación de piezas en el horno		5
13	Cocción de las piezas de acero (2)		60
14	Transporte de piezas esmaltadas		5
15	Almacenamiento de piezas esmaltado		

**Tabla 3.41.** Simbología de acciones

ACCIONES	
	Operación
	Transporte
	Inspección
	Espera
	Almacenamiento

En la Tabla 3.42 se muestra el cronograma de actividades que se desarrollará en la planta y los tiempos que involucra cada proceso. Debido a que la suspensión porcelánica es un fluido pseudoplástico con una estabilidad mayor al 80 % durante 5 h, el tanque agitado deberá funcionar intermitentemente como se propone en la Tabla 3.42.

**Tabla 3.42.** Cronograma de actividades en la planta de esmaltado de piezas de acero

	Preparación de la suspensión porcelánica S/L 43:57	Esmaltado de las piezas de acero	Secado a temperatura ambiente	Secado a temperatura de 110 °C (1)	Secado a temperatura de 110 °C (2)	Cocción de las piezas de acero
7:00:00						
8:00:00						
9:00:00						
10:10:00						
11:20:00						
12:00:00						
12:20:00						
12:25:00						

**Tabla 3.42.** Cronograma de actividades en la planta de esmaltado de piezas de acero  
(Continuación)

	Preparación de la suspensión porcelánica S/L 43:57	Esmaltado de las piezas de acero	Secado a temperatura ambiente	Secado a temperatura de 110 °C (1)	Secado a temperatura de 110 °C (2)	Cocción de las piezas de acero
12:30:00						
13:00:00						
13:30:00						
15:00:00						
15:50:00						
16:00:00						
17:00:00						
18:00:00						
18:05:00						
18:10:00						
23:00:00						
0:00:00						
1:05:00						
2:15:00						
2:50:00						

Para cumplir con la capacidad de producción de la planta, funcionarán dos secadores tipo cabina y un horno para el proceso de la cocción. Los tiempos de movilización entre proceso y proceso son mínimos y ya se consideran dentro del proceso de esmaltado ya que este solo dura 20 min. En la Tabla 3.43, se puede observar el tiempo de operación de cada uno de los equipos y en sí de los procesos desarrollados.



**Tabla 3.43.** Disponibilidad de los equipos

Proceso	Equipo	Tiempo de operación (h)	Disponibilidad por año
Preparación de la suspensión porcelánica S/L 53:47	Tanque Agitado	2,5	100%
Esmaltado	Compresor	2	100%
Secado	Secado tipo cabina	8	99%
Cocción	Horno	16	99%

En caso de mantenimiento o fallos de operación de los diferentes equipos, para evitar la disminución o paro de la producción, en la planificación de la instalación de los equipos se debe tomar en cuenta el tiempo que tardaría dicho paro. En la Tabla 3.43 se puede observar la disponibilidad de los equipos durante el año, los procesos críticos son el secado y la cocción, cuyos equipos necesitarán de al menos dos mantenimientos por año (Parra Márquez, 2013, p. 16). Debido a que la disponibilidad de los equipos involucrados en dichos procesos es del 99 %, la planta no requerirá de un equipo adicional en cada proceso.

Para abaratar los costos en el proceso de producción se decidió trabajar con ciertas materias primas recicladas como las botellas de vidrio que se las trituró para poder preparar el esmalte con relación S/L: 53:47. Además como combustible del horno de cocción se utilizó cascarilla de arroz, producto que es considerado como desecho en la cosecha de arroz en el país.

Adicionalmente, se definieron los costos de la maquinaria con base en la información proveniente de las empresas que las comercializan. En la Tabla 3.44 se puede observar los costos y en ANEXO VII se muestran los catálogos de los equipos escogidos.

**Tabla 3.44.** Costo de los equipos principales utilizados en los procesos de esmaltado de las piezas de acero

Designación del equipo	Número de unidades	Valor unitario	Valor total	Dividendo anual de amortización
Tanque agitado	1	1 225	\$1 225,0	\$245,0
Compresor	1	33800	\$33 800,0	\$6 760,0
Pistola neumáticas	5	75	\$375,0	\$75,0
Depósito de aire comprimido	1	1 322	\$1 322,0	\$264,4
Cámara de aplicación	5	346	\$1 730,0	\$346,0
Base giratoria (soporte piezas de acero)	40	180	\$7 200,0	\$1.440,0
Carretillas transportadoras	10	380	\$3 800,0	\$760,0
Cuarto de esmaltado	1	13 125	\$13 125,0	\$2 625,0
Cámara de secado a T. ambiente	1	5 800	\$5 800,0	\$1 160,0
Secador tipo cabina	2	1 420	\$2 840,0	\$568,0
Horno tipo caja	1	12 500	\$12 500,0	\$2 500,0
	<b>TOTAL</b>		\$83 717,0	\$16 743,4

El costo de las piezas de acero esmaltadas será de \$21,75, dicho costo se estimó sobre el valor total de inversión anual que se requerirá para la puesta en marcha de la planta y con el costo de productos de características similares como lo son las ollas de acero esmaltado. Como se puede observar en la Tabla 3.39 este costo correspondería aproximadamente a la producción de 195 piezas y la producción de un mayor número de piezas disminuye los costos, por lo que la diferencia de número de piezas con la capacidad de la planta, corresponde a ganancias.

El costo de la cámara de aplicación, base giratoria, carretillas transportadoras corresponde al valor de la plancha de tol espesor 2,38 mm más su costo de producción, según la empresa MUEBLE ARTE y MOBELIN. El costo del cuarto de

esmaltado corresponde al valor de materias primas y valor de construcción que normalmente se ofertan en el mercado de construcción en el país. Los requerimientos de materia prima para el proceso de elaboración de la suspensión porcelánica con una relación S/L 53:47 se presentan en la Tabla 3.45. Los costos de los reactivos se obtuvieron de Sigma Aldrich 2014, mientras que el costo del vidrio reciclado se lo obtuvo de la empresa Reciclar Cia. Ltda. 2014.

**Tabla 3.45.** Requerimientos de materia prima para el proceso de preparación de la suspensión porcelánica con S/L 53:47

Materia prima	Consumo por día (kg)	Consumo anual (kg)	Precio (USD/kg)	Precio anual (USD)
Vidrio	153,35	55 971,95	0,12	\$4 416,42
Bentonita	4,77	1 741,87	59,80	\$68 491,11
Tripolifosfato de sodio	0,85	308,84	55,40	\$11 250,29
Carboximetilcelulosa	0,16	58,12	193,00	\$7 375,71
			<b>TOTAL</b>	\$91 533,52

La cantidad de agua requerida para la producción de la suspensión porcelánica fue de 0,14 m<sup>3</sup> por día, como se observa en la Tabla 3.46. En esta tabla no se considera el agua consumida por limpieza o uso en general en otros procesos de la planta.

**Tabla 3.46.** Agua requerida para el proceso de producción de a suspensión porcelánica con relación S/L 53:47

Materia prima	Consumo por día (m <sup>3</sup> )	Consumo anual (m <sup>3</sup> )	Precio (USD/m <sup>3</sup> )	Precio anual (USD)
Agua	0,14	51,49	0,31	15,91

En la Tabla 3.47 se muestra el costo de las piezas metálicas de 0,45 m<sup>2</sup> para ser esmaltadas. Este costo incluye costo de la lámina de acero, así como también el costo de producción de la formación de las piezas cilíndricas.

**Tabla 3.47.** Costo de piezas de acero previo esmaltado

Costo unitario	Unidades esmaltadas por día	Unidades esmaltadas por mes	Unidades esmaltadas por año	Costo de materia prima por año
\$11,84	240	4 800	57 600	\$682 200

Los servicios industriales que se necesitan para el proceso de esmaltado de piezas de acero se presentan en la Tabla 3.48. Este costo contempla los equipos que requieren de electricidad para su funcionamiento.

**Tabla 3.48.** Precio de consumo de energía eléctrica en el proceso de producción

Servicios industriales por Equipo (kW)	Consumo por día (kWh)	Consumo anual (kWh)	Precio (USD/kWh)
Agitador	9,79E-02	35,73	294,44
Compresor	222,22	81 110,30	668 348,87
<b>TOTAL</b>	2,22E+02	81 146,03	668 643,32

En la Tabla 3.49 se presenta la cantidad consumida y el costo del combustible usado en los procesos de secado y cocción, el cual para este tipo de equipos es el Diésel. Como se puede observar el proceso que requiere mayor cantidad de energía para su funcionamiento es el horno, debido a que en la cocción se debe llegar a una mayor temperatura.

Al sustituir el diésel por la cascarilla de arroz se puede llegar a ahorrar hasta aproximadamente 4 897,11 dólares, esto corresponde a una disminución del 48,66 % en los costos de operación del horno, además de lo que implica utilizar este tipo de alternativa que es la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>, CO, compuestos sulfurados. El costo de 1000 kg de cascarilla de arroz se encuentra en los 110 dólares, cabe recalcar que este valor puede variar según el proveedor ya que este material es considerado como desecho.

**Tabla 3.49.** Precio de diésel consumido en los procesos de secado a temperatura de 110 °C y cocción

INSUMOS					
Designación del insumo	Costo unitario	Cantidad de Materia Prima por día	Cantidad de materia prima por mes	Cantidad de materia prima por año	Costo de materia prima por año
Diésel en el proceso de cocción	\$0,27	155	3 106	37 271	\$10 063,06
Diésel en el proceso de secado	\$0,27	42	839	10 063	\$2 717,03
			<b>TOTAL</b>	<b>47.368</b>	\$12 780,08

La fuerza de trabajo requerida para el proceso de esmaltado de piezas de acero se muestra en la Tabla 3.50. Para los salarios se consideraron los beneficios de ley, entre los cuales consta el décimo cuarto, décimo tercero, vacaciones y fondos de reserva.

**Tabla 3.50.** Costo anual de la fuerza de trabajo requerida en el proceso de esmaltado de piezas de acero

Fuerza laboral	Número	Sueldo mensual (USD)	Costo (USD/año)
Operarios	12	\$354	\$72 583,91
Supervisores	2	\$600,00	\$20 098,1
Ingeniero	1	\$1 000,00	\$16 553,75
Secretaria	1	\$500,00	\$117 658,64

En la Tabla 3.51 se muestra el tiempo por actividad de cada operario en las diferentes unidades de producción de la planta. En la unidad de preparación del esmalte y esmaltado se requerirá de 5 operarios, en la unidad de secado (temperatura ambiente y temperatura de 110 °C) se requerirá de un operario y en el proceso de la cocción debido a que es un equipo con control automático solo de un operario, el mismo que también se encargará de la supervisión de la planta.

**Tabla 3.51.** Tiempo de las actividades de los operarios

	<b>TIEMPOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>
<b>Preparación de suspensión porcelánica y Esmaltado</b>	1 h	Pesado, traslado y colocación de reactivos
	15 min	Colocación de piezas en cámaras de aplicación
	15 min	Sacado de piezas en cámaras de aplicación
	10 min	Llenado de reservorio de esmalte
	20 min	Esmaltado de 4 piezas de acero
	1 h	Tiempo total de ciclo de esmaltado. Son 6 ciclos
	1 h	Limpieza
<b>Secado a temperatura ambiente</b>	5 min	Tiempo de traslado de piezas desde la unidad esmaltado
	5 min	Colocación de piezas en cuarto de secado
	1 h	Supervisión del proceso
	1:10:00	Tiempo total de ciclo de secado en cuarto a temperatura ambiente. Son 6 ciclos
<b>Secado a temperatura 110 °C</b>	5 min	Tiempo de traslado de piezas desde la unidad secado a temperatura ambiente
	10 min	Colocación de piezas en Secador
	2 h	Supervisión del proceso
	2:15:00	Tiempo total de ciclo de secado Secador. Son 6 ciclos
<b>Cocción de piezas</b>	5 min	Tiempo de traslado de piezas desde el secador
	5 min	Colocación de piezas en Horno
	5 min	Tiempo de sacado de piezas
	1 h	Supervisión del proceso
	1:15:00	Tiempo total de ciclo de secado en cuarto a temperatura ambiente. Son 6 ciclos

En la Tabla 3.52 se muestran los costos totales anuales de producción de las piezas metálicas esmaltadas.

**Tabla 3.52.** Costos anuales de producción de la planta de esmaltado de piezas de acero

<b>Designación del rubro</b>	<b>Valor</b>
Materiales directos	\$91 533,52
Mano de obra directa	\$117 658,64
<u>Carga fabril</u>	
Mano de obra indirecta	\$24 684,63
Materiales indirectos	\$697 439,47
<u>Depreciaciones</u>	
Maquinaria y Equipo	\$16 743,40
<u>Mantenimiento</u>	
Maquinaria y Equipo	\$837,17
<b>SUB-TOTAL COSTOS DE PRODUCCIÓN</b>	<b>\$948 896,83</b>
Imprevistos	\$94 889,68
<b>TOTAL, COSTOS ANUALES DE PRODUCCIÓN</b>	<b>\$1 043 786,51</b>

Se calcularon los costos totales de producción entre los que se incluye la depreciación de los equipos y de la planta con el fin de reconocer el desgaste que sufren éstos. También se incluyen la mano de obra directa e indirecta y ciertos costos de mantenimiento, como se observa en la Tabla 3.52. El costo total anual de producción es de 1 043 786,51 dólares para esmaltado de 100 m<sup>2</sup> diarios de acero.

En la Tabla 3.53 se presentan los costos de venta e ingresos anuales por este concepto. El costo de producción de cada pieza esmaltada fue de 18,12 dólares en tanto que el costo de venta pronosticado fue de 21,74 dólares. Esto corresponde al costo de producción más un 20 % de ganancia.

**Tabla 3.53.** Producción de las piezas esmaltadas y precio de venta

<b>Cantidad de producto por hora</b>	<b>Cantidad de producto producidos por día de 16 h</b>	<b>Cantidad de producto producido por mes</b>	<b>Cantidad de producto producido por año</b>	<b>Precio de venta, por kg</b>	<b>Ingresos anuales por ventas</b>
20	222	4 440	52 800	\$21,75	\$1 148 400,00

Como se puede observar en la Tabla 3.53 se producen 52 800 piezas esmaltadas por año con un peso de 350 060 kg. En comparación con el total, este rubro de importaciones de artículos de características tales como las de ollas (1 049150 kg/año) o cocinas (204 940 kg/año); como se muestra en la Tabla 1.2, representa una producción a pequeña escala.

**Tabla 3.54.** Datos generales empleados para el análisis económico de la planta a escala piloto

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Capacidad de la planta	52 800	piezas/año
Tiempo de vida útil del proyecto	10	años
Días de operación al año	240	días/año
Tasa de interés	10	%
Tasa de impuestos	25	%

En la Tabla 3.55 se detalla el flujo de caja del proyecto, que tendrá 10 años de funcionamiento. Para comenzar con el funcionamiento de la planta se requerirá de una inversión inicial de 100 000,00 dólares por parte de un aporte de socios o un préstamo bancario. Además, se puede observar en el flujo de caja que a partir del tercer año de operación de la planta, el flujo fue positivo, por lo que la inversión para el desarrollo del proyecto es bastante atractiva y podrá ser recuperada en este intervalo de tiempo.



**Tabla 3.55.** Flujo de caja del proyecto para 10 años

<b>Designación</b>	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
Aportación de socios	\$100.000,00										
Ventas		\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00	\$1.148.400,00
(-) Costo de producción		\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51	\$1.043.786,51
Flujo bruto		\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49	\$104.613,49
Dividendo de financiamiento	(\$115.661,92)	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44	\$18.823,44
Flujo antes de impuestos		\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05	\$85.790,05
(-) Impuesto a la renta		\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39	\$10.872,39
Flujo después de impuestos		\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66	\$74.917,66
Flujo acumulativo		-\$140.744,25	-\$65.826,59	\$9.091,07	\$84.008,73	\$158.926,39	\$233.844,05	\$308.761,71	\$383.679,37	\$458.597,03	\$533.514,69
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>	<b>-\$215.661,92</b>	<b>-\$140.744,25</b>	<b>-\$65.826,59</b>	<b>\$9.091,07</b>	<b>\$84.008,73</b>	<b>\$158.926,39</b>	<b>\$233.844,05</b>	<b>\$308.761,71</b>	<b>\$383.679,37</b>	<b>\$458.597,03</b>	<b>\$533.514,69</b>

En la Tabla 3.56 se presentan los parámetros financieros que demuestran que la instalación de la planta tiene viabilidad económica a pesar de ser una producción a pequeña escala, por su volumen en comparación a la importación de artículos de similares características. Como se puede apreciar el valor actual neto igual a 211 065,589 fue positivo, esto muestra que la inversión en el proyecto proporciona beneficio y genera un margen de utilidad. La tasa interna de retorno fue igual a 26 %, la cual ofrece al inversionista una tasa de interés mayor a la que puede acceder en el mercado.

**Tabla 3.56.** Parámetros financieros del análisis económico de la planta de esmaltado de piezas de acero

<b>Premio Riesgo País</b>	12,50%
<b>TIR</b>	26,48%
<b>VAN</b>	211 065,59

Por lo mencionado anteriormente se determina que la ejecución de la planta de esmaltado de piezas de acero a pequeña escala con una capacidad de procesamiento de 52 800 piezas esmaltadas por año, tiene viabilidad técnico-económica, debido a que la adquisición y construcción de equipos es factible, así como también materia prima. Con base en los parámetros financieros generará utilidades en un periodo de tiempo relativamente corto a partir del funcionamiento de la planta.

Además de la rentabilidad obtenida de la planta de esmaltado de piezas de acero, el proceso planteado es innovador en el país, en el mismo se introduce la utilización de un producto considerado de desecho, cascarilla de arroz, lo cual disminuye costos de operación. Finalmente cabe mencionar que el producto obtenido por sus características será de larga durabilidad, inocuo por ser químicamente inerte por lo que puede ser usado como utensilio de cocina, así como también en la industria especialmente de alimentos.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Dada la captación de  $7,55 \text{ g/dm}^2$  del esmalte sobre la pieza metálica con un área de  $0,45 \text{ m}^2$ , se determinó que se requerirá de  $300\ 140,54 \text{ g}$  de la suspensión con relación S/L: 53:47 para el esmaltado de  $100 \text{ m}^2$  de acero por día, es decir de 222 piezas cilíndricas. Para cumplir con la capacidad de la planta se determinó que la producción deberá ser dividida en 20 piezas por sub-lote, cantidad de piezas que será procesada en cada unidad del proceso. La cantidad de esmalte se calculó en base a cuatro aplicaciones por pieza para evitar fallas y lograr superficies lisas.
- Para la producción diaria del esmalte se determinó que se requerirá un tanque agitado con una capacidad de  $0,20 \text{ m}^3$ . Esto evitará la instalación de un tanque pulmón, equipo que resultaría poco conveniente dado la naturaleza no newtoniana de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47, dado a que podría presentarse precipitaciones dentro del esmalte que cambiará su composición. Debido al comportamiento pseudoplástico de la suspensión, se determinó un agitador con cuatro deflectores inclinados con un ángulo de  $45^\circ$  ya que este tipo de agitador generará un flujo axial que ayudará a controlar la turbulencia generada dentro del tanque, el agitador tendrá una potencia de  $1,5 \text{ kW/m}^3$ .
- El esmaltado de las piezas de acero se lo realizará por vía húmeda, la distancia entre la pistola de aspersion y las piezas fue de  $20 \text{ cm}$  y el esmalte aplicado por cada pieza aproximadamente fue de  $1,35 \text{ kg}$ . En la aspersion de la suspensión porcelánica se utilizó aire comprimido a  $344,74 \text{ kPa}$  y a una velocidad de  $8 \text{ m/s}$ , para lograr tal presión se dimensionó un compresor de potencia igual a  $216,71 \text{ kW}$  con un rendimiento del 85%. Para cumplir con la cantidad de aire comprimido requerido se dimensionó un depósito de aire con una capacidad de  $1,6 \text{ m}^3$ , que trabajará a  $1\text{E}06 \text{ Pa}$ . La aplicación de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47 se lo

realizó en cámaras de 2,45 m de largo, 0,60 m de altura y 0,80 m de profundidad, donde se procesarán por hora un sub-lote. En cada cámara se realizará el esmaltado de cinco unidades, donde el tiempo de esmaltado es de cinco minutos.

- Según las pruebas de sedimentación que se realizó en el laboratorio se determinó que la suspensión S/L 53:47 permanece estable durante 4 h sin agitación. Esto indica una baja velocidad de sedimentación lo que le da excelentes características para ser aplicada sobre la superficie metálica. Durante este intervalo de tiempo, la concentración de sólidos disminuyó del 53,65 % al 53,01 %, con lo cual no hubo una alternación en la composición del esmalte.
- El secado de las piezas esmaltadas se lo realizó en dos etapas, un secado a temperatura ambiente y un secado a temperatura de 110 °C, para evitar que se produzcan fisuras, agrietamientos o flóculos, debido a un cambio brusco de temperatura y al alto contenido de agua libre en la suspensión porcelánica. El contenido de humedad inicial de las piezas esmaltadas fue del 65,01 %, mientras que la humedad final fue del 54,57 % en base húmeda.
- En la etapa de secado a temperatura ambiente (20 °C), que duró una hora, la humedad de equilibrio fue de 1,21 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco, durante esta etapa en los primeros 30 minutos hubo una mayor pérdida, a partir de este tiempo la velocidad de secado disminuye dado que la humedad contenida en el sólido se encuentra muy cercano al punto de equilibrio. Al finalizar la hora de secado se determinó que la pérdida de humedad libre en base seca fue del 10,44 %, valor que corresponde a una pérdida de 0,65 g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco. La cámara de secado deberá tener unas dimensiones de 2,7 m por 3,5 m. Durante esta etapa del proceso se procesarán 20 piezas cada hora.
- La etapa de secado a temperatura de 110 °C se efectuó durante dos horas, la humedad total final fue de 0,08 % y la humedad en el equilibrio fue de

7,69E-04 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco valor de humedad máximo al que se puede llegar durante este proceso. Durante esta etapa del proceso de secado, la mayor velocidad de secado se presentó durante los primeros 45 minutos, al cabo de las dos horas se presentó una pérdida de humedad total en base húmeda del 54,49 %. Se determinó que la velocidad de secado en el punto crítico del proceso fue de 5,21 g H<sub>2</sub>O/min·m<sup>2</sup>, velocidad que corresponde a un contenido de humedad de 0,237 g H<sub>2</sub>O/g sólido seco. Cabe mencionar que la curva de secado obtenida en esta etapa tiene similitud con las curvas de secado de materiales arcillosos. Este proceso se lo efectuará en secadores tipo cabina cuyas dimensiones son de 2,7 m por 3,5 m. Para que la capacidad de producción requerida por la planta se cumpla se instalarán dos secadores que procesarán 20 piezas cada uno.

- El poder calorífico superior de la cascarilla de arroz determinado en la bomba calorimétrica fue de 15 485,14 J/g con un error de  $\pm 1,37$ . Este valor se encuentra en el rango establecido según bibliografía que es de 14 235,10 J/g a 17 165,90 J/g. La diferencia ya sea con el rango superior o inferior se debe al porcentaje de humedad de la materia prima. Se determinó mediante un TGA que la humedad de la cascarilla de arroz fue de 8,37%.
- En la etapa de la cocción, el horno será del tipo caja debido a la producción que se da en la planta, este equipo operará a 900 °C, la temperatura de salida de los gases de combustión será de 1 121,11°C. El equipo tendrá una eficiencia del 75 % y el combustible utilizado será la cascarilla de arroz que se combustionará con un 25 % de exceso de aire ya precalentado a 274,44 °C. La cámara de cocción del horno tipo caja tendrá como dimensiones 5,93 m por 5,30 m, en la zona radiante los tubos tendrán un diámetro de 0,127 m y una longitud de 10,97 m. Dichas dimensiones permitirán la cocción de 20 piezas esmaltadas por hora.
- De acuerdo a los cálculos realizados en el estudio preliminar de los costos del proceso de esmaltado, la planta con una capacidad de procesamiento de 100 m<sup>2</sup> de acero esmaltado diario requiere de una inversión anual de

1 043 786,510 dólares. Este valor incluye el costo total de la inversión de activos fijos y el capital de trabajo necesario para empezar a operar. El proyecto por la producción de 52 800 piezas esmaltadas por año generará un margen de utilidad del 20 % por pieza vendida. Además, el valor actual neto calculado fue igual a 211 065,59 y la tasa interna de retorno es del 26 %, valor superior a la tasa de interés que se ofrece en el mercado que es del 12,5 %. Estos parámetros y el flujo de caja calculado para 10 años muestran que la inversión será recuperada a partir del tercer año. Esto muestra que la inversión en el proyecto proporciona beneficio y genera un margen de utilidad atractivo para el inversionista.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Implementar una unidad de control de calidad que verifique todos los procesos que se desarrollan en la planta de esmaltado de piezas de acero como preparación del esmalte su estabilidad y adecuada mezcla, esmaltado de piezas de acero que este proceso sea uniforme, secado de las piezas y su acabado.
- Estudiar los factores que afectan al ensayo de secado como humedad, temperatura y flujo de aire dentro de la cámara de secado a temperatura ambiente ya que el proceso de secado durante esta etapa depende de las características del aire así como también de las propiedades fisicoquímicas de la suspensión porcelánica y su adhesión a la superficie metálica.
- En el proceso de esmaltado, estudiar la factibilidad de realizar el cambio del proceso de esmaltado de manual a automático. Esto disminuiría los tiempos de esmaltado, colocación de piezas, sacado de piezas, el tiempo que el obrero se demora en recargar el recipiente con la suspensión y además disminuiría la cantidad de mano de obra requerida en este proceso. Un sistema automático además ofrecería mayor precisión en cuanto a esmalte aplicado y disminución de pérdidas de la suspensión porcelánica.

- Estudiar el efecto que tendría el cambio del tipo de combustible en el secador tipo cabina, esto disminuiría los costos de operación en esta unidad.
- En el proceso de la cocción diseñar los quemadores requeridos para la combustión de la cascarilla de arroz, así como también sistemas de alimentación, limpieza, etc. Analizar en este proceso cual es el sistema que se debe implementar para evitar que los gases de combustión transporten cenizas, que afectará la cocción del producto.
- Identificar los puntos críticos o mermas en la producción de las piezas esmaltadas, para mejorar los procesos en la planta de esmaltado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alcamo , R., Micale , G., y Grisafi, F. (2005). Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine. *Chemical Engineering Science*, 60, 2303–2316. doi: 10.1016/j.ces.2004.11.017
2. ArcelorMittal. (2008). *Los aceros para esmaltación y el acero esmaltado*. Recuperado de [http://fce.arcelormittal.com/repository/fce/Brochures/Steelforenamelling\\_usermanual\\_ES.pdf](http://fce.arcelormittal.com/repository/fce/Brochures/Steelforenamelling_usermanual_ES.pdf) (Marzo, 2013)
3. Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4ta. ed.). Boston, Estados Unidos: ELSEVIER.
4. ASTM Internacional, (2011), Designation E711, *Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*. Recuperado de <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E711-87R96.htm> (Diciembre 2012).
5. Baldwin, C., y Feldman, S., (2007) Surface Tension and Fusion Properties of Porcelain Enamels. *69nd Porcelain Enamel Institute Technical Forum the American Ceramic Society*, (pp. 1-10). Tennessee, EEUU: Recuperado de [http://www.iei-world.org/downloads/Articolo\\_Baldwin.pdf](http://www.iei-world.org/downloads/Articolo_Baldwin.pdf). (Febrero, 2015)
6. Banco Central del Ecuador. (2014). *Comercio Exterior*. Recuperado de [http://www.portal.bce.fin.ec/vto\\_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp](http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp) (Enero, 2015)
7. Behler, F. y Nose, G. (2007, marzo). *Industrial Enamel Foundations, production, applications and CERN-tests*. En *ECL2 Workshop CERN*, Geneva. Recuperado de <http://indico.cern.ch/event/11937/session/1/contribution/12/material/slides/2.pdf> (Mayo, 2015).



8. Bernal, V. B. (2010). *Guía de Neumática*. Recuperado de : <http://automatica.mex.tl/imagesnew/5/0/1/4/2/NEUMATICA%20GUIA%204.pdf> (Marzo, 2014)
9. Berzosa-Jiménez, M., y Molina, C. M. (2011). Determinación de modelos para evaluar el consumo de potencia en tanques agitados para soluciones pseudoplásticas. *Revista Ingeniería*, 20(1 y 2), 51-65. Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/7265/6942> (Marzo, 2014)
10. Cao, E. (2004). *Transferencia de calor en ingeniería de procesos* (Primera ed.). Argentina.
11. Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
12. Castilla-Puello, D. J., y Morales-Simanca, L. J. (2013). *Diseño de un horno usando cascarilla de arroz*. (U. T. Bolivar, Ed.) Cartagena de Indias, Colombia.
13. Castro, E., Artigas, A. y Páez, M. (2002). *Diseño y Construcción de un Horno simulador de Recocido Continuo*. CONAMET/SAM-SIMPOSIO MATERIA. Recuperado de [http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/chile/Indice\\_Archivos/Download/F199.PDF](http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/chile/Indice_Archivos/Download/F199.PDF) (Septiembre, 2014)
14. CompAir. (2014). *Selector de Compresores*. Obtenido de *CompAir V-Major, V-Compact Reciprocating Compressors*: Recuperado de <file:///C:/Users/Alejandrina/Desktop/V%20compact%20V%20major%20brochure%20GB%20335%20catalogo%20compresor.pdf> (Septiembre, 2014)
15. Costa, J., Cervera, S. y Cunill, F. (2004) *Curso de Ingeniería Química*. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=XZNYpvnO\\_V8C&printsec=frontc](https://books.google.com.ec/books?id=XZNYpvnO_V8C&printsec=frontc)

over&hl=es&source=gbs\_ge\_summary\_r&cad=0#v=onepage&q&f=true.  
(Junio, 2015)

16. E.P.S Ingeniería de Gijón. (2006). *Universidad de Oviedo área de mecánica de fluidos. Instalación de aire comprimido*. Recuperado de: [kimerius.com/app/download/.../Instalación+de+aire+comprimido.pdf](http://kimerius.com/app/download/.../Instalación+de+aire+comprimido.pdf)
17. Echeverría O., M., y López M., O. (Mayo de 2010). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica* (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Quito, Ecuador.
18. EISENMANN. (2015). *Porcelain enamelling systems*. Recuperado de <http://www.eisenmann.com> (Mayo, 2015)
19. EL NERVION, S.A. (2014). NERVION PINTURAS. Recuperado de [http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/aplicacion\\_rec.php](http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/aplicacion_rec.php) (Marzo, 2014)
20. DIN 51900. (2004). Testing of solid and liquid fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value. Recuperado de <http://www.techstreet.com/products/1051856>. (Marzo, 2014)
21. Duarte, C. A., y Niño, J. R. (2004). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Bogotá Colombia: Colección 145 años.
22. Felu, S., y Andrade, M. (2001). *Corrosión y Protección Metálica*. Madrid, España: R. S.A., Ed..
23. Foucault, S., Ascanio, G., y Tanguy, P. (2005) Power Characteristics in Coaxial Mixing: Newtonian and Non-Newtonian Fluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(14), 5036-5043. doi: 10.1021/ie049654x

24. Fu, D., y Faust, W. (2000) *Porcelain Enamels with Improved Chip resistance*. En 62nd Porcelain Enamel Institute Technical Forum, the American Ceramic Society. Tennessee, EEUU: Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=cjmZ\\_IR6VQgC&pg=PA53&lpg=PA53&dq=Porcelain+Enamels+by+A.+I.+Andrews+in+the+USA&source=bl&ots=4mE2EhVaeM&sig=t0ugBjIVUuckiNkG3B\\_lwEPR8a4&hl=es&sa=X&ei=NrF0VePgD5LAGwT9p4GoBw&ved=0CCwQ6AEwBDgK#v=onepage&q=Porcelain%20Enamels%20by%20A.%20I.%20Andrews%20in%20the%20USA&f=true](https://books.google.com.ec/books?id=cjmZ_IR6VQgC&pg=PA53&lpg=PA53&dq=Porcelain+Enamels+by+A.+I.+Andrews+in+the+USA&source=bl&ots=4mE2EhVaeM&sig=t0ugBjIVUuckiNkG3B_lwEPR8a4&hl=es&sa=X&ei=NrF0VePgD5LAGwT9p4GoBw&ved=0CCwQ6AEwBDgK#v=onepage&q=Porcelain%20Enamels%20by%20A.%20I.%20Andrews%20in%20the%20USA&f=true) (Mayo, 2015)
25. GAS NATURAL SDG, S.A. (2014). *Gas Natural Fenosa. Obtenido de Hornos de Gas*. Recuperado de <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/hornos-de-gas> (Septiembre, 2014)
26. Gas Processors Suppliers Association. (2004). *Engineering Data Book: Gas Processors Suppliers Association* (20ª ed). Tulsa, Oklahoma
27. Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. México: Compañía Editorial Continental.
28. Gelmi, C. (2006). *Fundamento de Operaciones Unitarias*. Chile.
29. Gijón, E. I. (2005). *Obtenido de Instalación de aire Comprimido. Universidad de Oviedo*. Seminarios de Instalaciones de fluidos Recuperado de <http://web.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/> (Agosto, 2014)
30. Giundice, C. A., y Pereyra, A. M. (s.f.). *Métodos de Aplicación e Instalaciones de Secado/Curado para Pinturas y Recubrimientos*. Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas CIDEPINT (CIC-CONICET). Recuperado de <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/protecmat/aplicacion.pdf> (Marzo, 2014)

31. Gómez, J., y Barrera, M. (2002). *Estudio de la resistencia a la abrasión de capas vitrocerámicas depositadas sobre acero*. *Cerámica y Vidrio*, 41(6), 525-529.
32. Groupe Legris Industries. (2005). *Redes de aire inteligente*. Catálogo de productos : Recuperado de [http://www.utilairsur.com/20050908\\_Transairproducts\\_ES.pdf](http://www.utilairsur.com/20050908_Transairproducts_ES.pdf) (noviembre, 2014)
33. Guest, J. (2011). *Producto Speedfit para aire y neumática. Redes de Aire comprimido, Racores para Neumática y Tubería* : Recuperado de <http://www.johnguest.com/Home/literature-downloads/Spanish-Literature/catalogo-aire-comprimido-2011.aspx> (Noviembre, 2014)
34. Herranz Manzanares, J. L. (2002). *Esmalte sobre metal: un nuevo enfoque hacia la creación plástica a través de la obra Francés Vilasís Capalleja* (Memoria para optar al grado de doctor). Madrid, España.
35. Hougen, O., Kenneth, M. y Watson, R. (2006). *Principios de los procesos químicos*. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=ZngDtuqhx5sC&pg=PA405&dq=s%C3%B3lido+seco&hl=es&sa=X&ei=xCR2VcPcEOfZsASf-YG4Bg&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=s%C3%B3lido%20seco&f=true> (Junio, 2015)
36. Ibaza, L. (2013). *Estudio de la Compatibilidad de suspensiones de Esmalte Porcelánico crudo con la superficie de Piezas de Acero*. (Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniera Química). Quito: Ecuador.
37. Ibarrola, E. L. (2009). *Cátedra de Mecánica de los Fluidos UNCor*. Introducción a los fluidos no newtonianos: Recuperado de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r86786.PDF> (Marzo, 2014)

38. Indurama. (2015). *Cocinas de Inducción. Recipientes*. Quito, Ecuador. Recuperado de <http://www.indurama.com/induccion/C%C3%B3mo-funcionan/Recipientes> (Marzo, 2015)
39. INEN 690. (1982). *Norma Técnica Ecuatoriana. Mecánica de Suelos Determinación del Contenido de agua Método del Secado al Horno*. Quito, Ecuador.
40. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. (2010). *Máquinas para Fluidos 1*. (F. d. República, Ed.) Recuperado de [http://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/maq\\_flu\\_1/teorico/8-Compresores.2010.pdf](http://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/maq_flu_1/teorico/8-Compresores.2010.pdf) (Agosto, 2014)
41. Instituto nacional del emprendedor. (2015). *Guías empresariales. Flujo del proceso productivo y escalas de producción*: Recuperado de <http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14yguia=112&giro=8&ins=825> (Noviembre, 2014)
42. Kern, D. Q. (2006). *Procesos de Transferencia de Calor*. Recuperado de <http://www.casadellibro.com/libro-procesos-de-transferencia-de-calor/9789682610400/1089748> (Octubre, 2014)
43. KREMLIN REXSON. (2005). *Pistola neumática M22*. Obtenido de Características Técnicas. Recuperado de <http://notices.kremlinrexson-sames.com/dev/notices/575.009.190-d/fold/Notices/578.005.120-SP.pdf> (Septiembre, 2014)
44. LEROY MERLIN S.A. (2002). *Pintar con pistola neumática*: Recuperado de <http://www.biblioteca.org.ar/libros/211363.pdf> (Septiembre, 2014)
45. Lira Olivares, J., y Gonzáles Rodulfo, S. (diciembre de 2011). *Recubrimientos metálicos y cerámicos solucionan el problema económico y ambiental de países desarrollados y en desarrollo*. (SciELO, Ed.) Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 3(2).

46. López, G., y Polupan, G. (2007). *Diseño de un software para el cálculo térmico de los hornos de los generadores de vapor*. Mecánica Computacional, 3573-3589.
47. Márquez-Martínez, M. (2005). *Combustión y Quemadores* (1ra ed). España: NP Novaprodúctiva.
48. Martínez P., Rus E., *Operaciones de Separación en Ingeniería Química Métodos de Cálculo*: Departamento de Ingeniería Química Facultad de Ciencias Universidad de Málaga Recuperado de <https://dredgarayalaherrera.files.wordpress.com/2014/09/operaciones-de-separacion-en-ingenieria-quimica.pdf>. (Agosto, 2014)
49. McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mexico D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
50. Mera, L., Vásquez, P., y Bolaños, S. (2010). *Reutilización del vidrio de desecho para preparar esmaltes*. Revista Politécnica, 29.
51. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2013). *Matriz Energética*. Obtenido de <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/03/Web-Sectores-Estrate%CC%81gicos-para-el-Buen-Vivir-01.pdf>
52. Moreno, M. (2005). *Introducción a la Neumática*. Obtenido de Curso 021 Micro Capacitación: Recuperado de <http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual021IntroduccionalaNeumtica.pdf> (Noviembre, 2014)
53. Parra Márquez, C. (2013). *Indicadores técnicos de Mantenimiento y su Integración con los indicadores financieros. I Congreso Internacional de Mantenimiento ACP*. Panamá.
54. Perry, R. (2001). *Chemical Engineers' Handbook*. EEUU: The McGraw-Hill Companies, Inc.

55. Poveda Bonilla, R., Espín Tobar, A., y Tapia, L. (2013). *Avanzamos en el cambio de la Matriz Energética: Sectores Estratégicos 20(1)*, 1-20.
56. Poveda-Ramos, G. (2007). *Modelo matemático y dimensional para el planeamiento óptimo de industrias de procesos*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial ITM.
57. Quinceno-Villada, D., y Mosquera-Gutiérrez, M. (2010). *Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible*. (U. A. Occidente, Ed.) Recuperado de <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/1327/1/TME00462.pdf> (Marzo, 2014)
58. Ramírez Navas, J. S. (Diciembre de 2006). *Introducción a la Reología de los Alimentos*. Recuperado de [http://books.google.com.ec/books?id=IVCAQal\\_ePkC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.ec/books?id=IVCAQal_ePkC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false) (Marzo, 2014)
59. Reves Consult. (2012). *Acero Vitrificado*. Recuperado de <http://www.revesconsult.com/acero-vitrificado/>
60. Salas, A. F., & Urrestarazu, L. P. (2008). *Open course Ware Universidad de Sevilla*. Recuperado [http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial\\_25.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_25.htm)
61. Santamaría Ortiz, M. (2009). *Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniería Química. Estudio del efecto de la presencia de arcillas y de floculantes en esmaltes porcelánicos en suspensión para recubrimientos de piezas de acero*. Quito, Ecuador.
62. Sedel. (2010). *Compresores. Obtenido de Depósitos de aire comprimido*: Recuperado de [http://www.serviciotecnicocompresores.com/admin/spaw/uploads/files/depositos\\_air\\_comprimido\\_vertical.pdf](http://www.serviciotecnicocompresores.com/admin/spaw/uploads/files/depositos_air_comprimido_vertical.pdf) (Septiembre, 2014)

63. SIGMA ALDRICH. (2015). Copyright © 2015 Sigma-Aldrich Co. LLC. All Rights Reserved.
64. Sinnott, R. K. (2005). *Coulson & Richardson's Chemical Engineering Design* (cuarta ed., Vol. 6). Londres, Inglaterra.
65. Terrizzano, M. (2002). *El secado de sólidos en la industria química*. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=ixzo6i8ngC&pg=PR20&lpg=PR20&dq=s%C3%B3lido+seco&source=bl&ots=0T-X-QfEB4&sig=rYoEcCa4vchxWBXOBuT5eYaix7M&hl=es&sa=X&ei=\\_SV2VdnGCsTLyAPy9oGYBQ&ved=0CFoQ6AEwDA#v=onepage&q=s%C3%B3lido%20seco&f=true](https://books.google.com.ec/books?id=ixzo6i8ngC&pg=PR20&lpg=PR20&dq=s%C3%B3lido+seco&source=bl&ots=0T-X-QfEB4&sig=rYoEcCa4vchxWBXOBuT5eYaix7M&hl=es&sa=X&ei=_SV2VdnGCsTLyAPy9oGYBQ&ved=0CFoQ6AEwDA#v=onepage&q=s%C3%B3lido%20seco&f=true). (Junio, 2015)
66. The ceramic coating company. (2012). *Civil Engineering Handbook*. Evaluation of Porcelain Enameled Surfaces: Recuperado de <http://www.civilengineeringhandbook.tk/corrosion-resistance-3/evaluation-of-porcelain-enameled-surfaces.html> (Mayo, 2015)
67. The Linde Group. (2002). *Hoja de seguridad del material (MSDS)*. Recuperado de [http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/aire\\_comprimido.pdf](http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/aire_comprimido.pdf) (Marzo, 2014)
68. Urquizo, J., Acero, H., y Rodríguez, J. (2011). *Reemplazar el uso de diesel por cascarilla de arroz empleado para generación de vapor. Aspectos técnicos y económicos*. (ESPOL, Ed.) Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19195/1/resumen%20cascarilla%20de%20arroz.pdf>
69. Valverde G., A., Sarria L., B., & Monteagudo Y., J. (2007). *Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz*. (U. T. Pereira, Ed.) Scientia et Technica (37), 6.
70. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los Esmaltes*. Valencia: Reverté, S.A.



71. VITREX. (2009). *Vitreous enamelled steel products*. Recuperado de [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.vitrex.co.za%2Fpresentations%2FPresentation%2520\\_Specifying%2520Properties%2520and%2520Uses%2520Sep%252009.ppt&ei=fuMRVamVCbDgsATPoYCQAQ&u](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.vitrex.co.za%2Fpresentations%2FPresentation%2520_Specifying%2520Properties%2520and%2520Uses%2520Sep%252009.ppt&ei=fuMRVamVCbDgsATPoYCQAQ&u) (Marzo, 2014)
72. Vitrispan. (2014). *Arquitectura en acero esmaltado*. Obtenido de ¿Qué es el acero esmaltado vitrificado?: Recuperado de [http://www.vitrispan.net/empresa/ampliar.php/Id\\_contenido/93/v/0/](http://www.vitrispan.net/empresa/ampliar.php/Id_contenido/93/v/0/) (Marzo, 2014)
73. Wang D. (2009). Effect of crystallization on the property of hard enamel coating on steel substrate. *Applied Surface Science*, 255(8), 4640-4645. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.12.007
74. Wimpres, N. (2008). *Generalized method predicts fired-heater performance*. (U. N. Patagonia, Ed.) Recuperado de [http:// www.ing.unp.edu .ar/ asignaturas/ operaciones\\_fisicas\\_2/Versiones% 20PDF / Traduc ci%C3%B3n%20M%C3%A9todo%20de%20Wimpres- Ver%202008.pdf](http://www.ing.unp.edu.ar/ asignaturas/ operaciones_fisicas_2/Versiones%20PDF / Traduc ci%C3%B3n%20M%C3%A9todo%20de%20Wimpres- Ver%202008.pdf) (Noviembre, 2014)

## **ANEXOS**

## ANEXO I

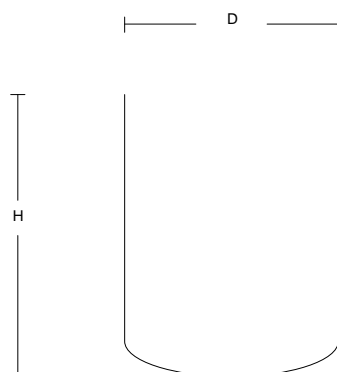
### DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE AGITADO

#### A.I. 1 BALANCE DE MASA PARA LA PREPARACIÓN DE LA SUSPENSIÓN PORCELÁNICA CON RELACIÓN S/L 53:47

Ejemplo de cálculo de la dosificación de las materias primas para la preparación de la suspensión porcelánica

- **Balance general de masa**

Los cálculos que a continuación se presentan se realizaron para una pieza metálica de diámetro de 0,3 m y una altura de 0,4 m.



**Figura AI. 1.** Piezas metálicas cilíndricas

$$A_{\text{esmaltada}} = A_{\text{lateral}} + A_{\text{fondo}} \quad [\text{A.I.1}]$$

$$A_{\text{esmaltada}} = 2\pi \times r \times H + \pi \times r^2 \times H$$

$$A_{\text{esmaltada}} = 2\pi \times \frac{0,3 \text{ m}}{2} \times 0,4 \text{ m} + \pi \times \left(\frac{0,3 \text{ m}}{2}\right)^2 \times 0,4 \text{ m} = 0,45 \text{ m}^2$$

Dado que la capacidad de la planta es de 100 m<sup>2</sup> de acero esmaltado se calculó el número total de piezas esmaltadas.

$$\text{Número total de piezas esmaltadas} = \frac{100 \text{ m}^2}{0,45 \text{ m}^2} = 222,22 \text{ piezas}$$

Se tomó en cuenta los tiempos de producción y de espera se esmaltará solamente 222 piezas.

Dado que se aplicarán 4 capas el área esmaltada será:

$$A_{\text{total esmaltada}} = (0,45 \text{ m}^2) \times 4 = 1,79 \text{ m}^2$$

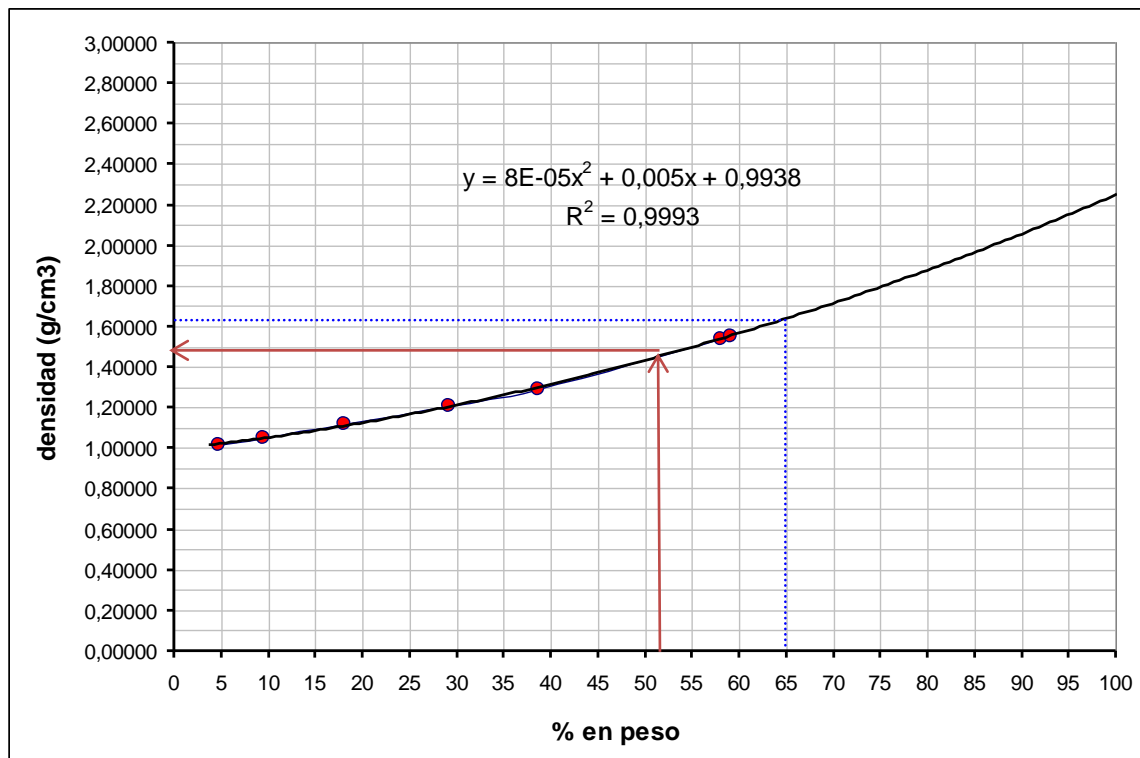
$$A_{\text{total esmaltada (222 piezas)}} = 1,8 \text{ m}^2 \times 222 = 397,537 \text{ m}^2$$

A partir del valor de la captación del esmalte en la pieza metálica de 7,55 g/dm<sup>2</sup> y el área de la pieza a esmaltar (se dio 4 aplicaciones a la pieza tanto internamente como externamente), se calculó el peso del esmalte para el total de piezas a esmaltar al día y los sólidos totales presentes en la sus pensión porcelánica.

$$P_{\text{esmalte}} = \text{Captación esmalte} \times \text{Área pieza} \quad [\text{A.I.2}]$$

$$7,55 \frac{\text{g}}{\text{dm}^2} \times \frac{1 \text{ dm}^2}{0,01 \text{ m}^2} \times 399,6 \text{ m}^2 = 300 \ 140,536 \text{ g}$$

Para el cálculo del volumen de la suspensión porcelánica necesaria para la producción de la suspensión porcelánica para el esmaltado de 100 m<sup>2</sup> de piezas metálicas se calculó la densidad en base a los ensayos realizados realizado en (Santamaría Ortiz, 2009, pp. 114,115).



**Figura AI. 2.** Variación de la densidad con respecto a la concentración de suspensiones de material vítreo tamaño -200+325  
(Santamaría, 2009, p. 114)

En la Figura AI. 2, se presenta la curva de la densidad con respecto a la concentración de las suspensiones de tamaño de partícula -200+325 mesh. Para determinar la densidad de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47, se trazará una línea perpendicular en la Figura AI. 2 desde el eje de las x que corresponde a la concentración en peso, en el punto de 53 %, hasta la cortar la curva, punto a partir del cual se trazó una línea hasta cortar el eje de las y que corresponde a la densidad de la suspensión para dicha formulación y tamaño de partícula. El mismo proceso se siguió para determinar la densidad para las suspensiones de tamaño de partícula -325+400 y -400. Con las diferentes densidades se calculó del promedio. En la Tabla AI. 1, se muestran los resultados.

**Tabla AI. 1.** Variación de la densidad de la suspensión porcelánica S/L: 53:47 de acuerdo al tamaño de partícula

Tamaño de partícula de la suspensión porcelánica	Densidad esmalte (g/cm <sup>3</sup> )
-200 +325	1,48
-325 +400	1,47
-400	1,44
<b>Promedio</b>	<b>1,46</b>

\*Calculado de (Santamaría, 2009, pp. 114,115)

El valor de la densidad de 1,46 se aproximó a  $1,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , con dicho valor y el peso del esmalte se determinó el volumen de la suspensión.

$$V = \frac{m}{\delta} \quad [\text{A.I.3}]$$

$$V = \frac{301\,140,54 \text{ g}}{1,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 200\,760,35 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{100^3 \text{ cm}^3} = 0,2 \text{ m}^3$$

- **Balance de masa por componentes**

Con los resultados del balance de masa que se muestra en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 se calculó la capacidad del tanque agitado para la producción de la suspensión porcelánica con relación S/L: 53:47, dichos cálculos se muestran a continuación:

$$P_{\text{sólidos totales}} = \% \text{sólidos} \times P_{\text{esmalte}} \quad [\text{A.I.4}]$$

Donde:

$P_{\text{sólidos totales}}$ , es el peso de los sólidos totales presentes en la suspensión porcelánica.

$P_{\text{esmalte}}$ , es el peso del esmalte.

$\% \text{sólidos}$ , es el porcentaje de sólidos presentes en el esmalte, es decir 53%.

$$P_{\text{sólidos totales}} = \frac{53}{100} \times 301698 \text{ g} = 159\,074,48 \text{ g}$$

Con base al peso de los sólidos totales se calculó la cantidad a utilizar de cada materia prima en la preparación de la suspensión porcelánica.

$$P_{\text{materia prima}} = P_{\text{sólidos totales}} \times \% \text{Materia prima} \quad [\text{A.I.5}]$$

- **Cálculo dosificación vidrio**

$$P_{\text{Vidrio}} = 159\,074,48 \text{ g} \times \frac{96,4 \text{ g vidrio}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 153\,347,803 \text{ g}$$

- **Cálculo dosificación bentonita**

$$P_{\text{Bentonita}} = 159\,074,48 \text{ g} \times \frac{3 \text{ g Bentonita}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 4\,772,24 \text{ g}$$

- **Cálculo dosificación tripolifosfato de sodio**

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio}} = 159\,074,48 \text{ g} \times \frac{0,5 \text{ g Tripolifosfato de sodio}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 795,37 \text{ g}$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio (PURO)}} = 795,37 \text{ g}$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio (IMPURO)}} = \frac{P_{\text{Tripolifosfato de sodio (PURO)}}}{\% \text{Pureza}} \quad [\text{A.I.6}]$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio (IMPURO)}} = \frac{795,37 \text{ g}}{\frac{94 \text{ g Tripolifosfato de sodio (PURO)}}{100 \text{ g Tripolifosfato de sodio (IMPURO)}}}$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio (IMPURO)}} = 846,141 \text{ g}$$

- **Cálculo dosificación carboximetilcelulosa**

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa}} = 159\,074,48 \text{ g} \times \frac{0,1 \text{ g Carboximetilcelulosa}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 159,07 \text{ g}$$

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa (PURO)}} = 159,074 \text{ g}$$

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa (IMPURO)}} = \frac{159,07 \text{ g}}{\frac{99,9 \text{ g Tripolifosfato de sodio (PURO)}}{100 \text{ g Tripolifosfato de sodio (IMPURO)}}} = 159,234 \text{ g}$$

- **Cálculo cantidad de agua**

$$P_{\text{agua}} = \frac{\% \text{Líquido} \times P_{\text{sólidos totales}}}{\% \text{Sólidos}} \quad [\text{A.I.7}]$$

$$P_{\text{agua}} = \frac{\frac{47 \text{ g líquido}}{100 \text{ g suspensión}} \times 159\,074,48 \text{ g sólido}}{\frac{53 \text{ g H}_2\text{O}}{100 \text{ g suspensión}}} = 141\,066,05 \text{ g}$$

$$\text{Volumen agua} = \frac{P_{\text{agua}}}{\text{Densidad agua}} \quad [\text{A.I.8}]$$

$$\text{Volumen agua} = \frac{141\,066,05 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 141\,066,05 \text{ cm}^3$$

## A.I. 2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE AGITADO

Dado que el volumen de una pieza se calcula bajo la siguiente expresión:

$$V = \pi \times r^2 \times H \quad [\text{A.I.9}]$$

Y colocándola en función de la altura del recipiente se pudo calcular tanto el diámetro como la altura del tanque agitado donde se preparará la suspensión porcelánica para la producción diaria.



$$V = \pi \times \left(\frac{Dt}{2}\right)^2 \times H$$

De la ecuación 2.2 queda:

$$H = Dt$$

Por lo tanto

$$V = \pi \times \left(\frac{H}{2}\right)^2 \times H$$

$$V = \frac{\pi \times H^3}{4}$$

Al despejar la ecuación anterior la altura, se encontró que esta tiene un valor de:

$$0,2 \text{ m}^3 = \frac{\pi \times H^3}{4}$$

$$H = 0,63 \text{ m}$$

Se tomará como criterio el sobredimensionamiento del 20 %

$$H = 0,76 \text{ m} \sim 0,8 \text{ m}$$

$$Dt = 0,63 \text{ m}$$

A partir de los valores de la altura y el diámetro y con las ecuaciones de la [2.1] a la [2.7], se pudo calcular las demás dimensiones del tanque agitado.

Debido a que la relación de  $\frac{Dt}{Da}$  se encuentra entre 1,33 y 3, se calculó el promedio que corresponde aproximadamente 2, por lo que:

$$Da = \frac{Dt}{2} = \frac{0,63 \text{ m}}{2} = 0,32 \text{ m}$$

$$W = Dt \times 0,1 = 0,63 \times 0,1 = 0,063 \text{ m}$$

$$j = \frac{Dt}{12} = \frac{0,63 \text{ m}}{12} = 0,05 \text{ m}$$

$$C = \frac{Dt}{3} = \frac{0,63 \text{ m}}{3} = 0,21 \text{ m}$$

$$W = Dt \times 0,1 = 0,63 \times 0,1 = 0,063 \text{ m}$$

$$L = \frac{Da}{4} = \frac{0,32 \text{ m}}{4} = 0,08 \text{ m}$$

$$Dd = \frac{2 Da}{3} = \frac{2 \times 0,32 \text{ m}}{3} = 0,213 \text{ m}$$

### A.I. 3. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL AGITADOR

- **Cálculo del número de Reynolds**

Dado que los estudios según (Ibaza, 2013, p. 64) se realizaron a 50 rpm se ocupó este valor para el cálculo del número de Reynolds. Las propiedades se tomaron de la Tabla 1.6.

$$Re = \frac{N \times Da^2 \times \delta}{\mu} \quad [A.I.10]$$

Dónde:

Re, número de Reynolds

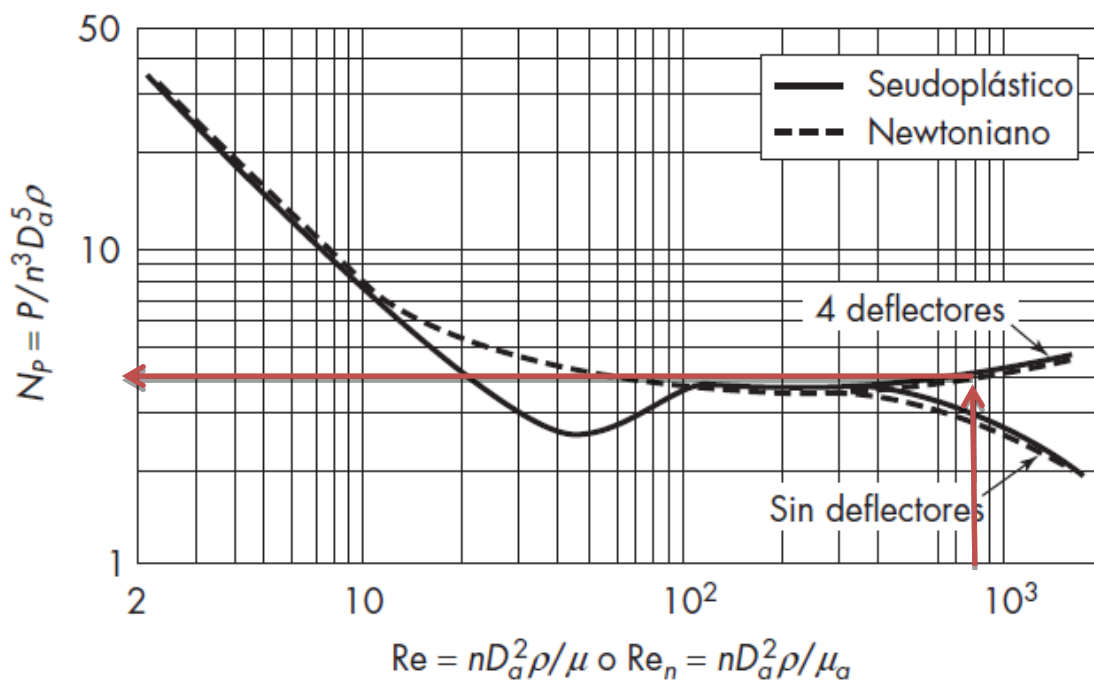
N, velocidad de corte (rpm)

$\delta$ , densidad de la suspensión porcelánica  $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$

$\mu$ , viscosidad (mPa.s)

$$Re = \frac{100 \text{ rpm} \times (0,2 \text{ m})^2 \times 1500 \text{ Kg/m}^3}{292 \text{ mPa.s} \times \frac{10^{-3} \text{ Pa.s}}{1 \text{ mPa.s}}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 876,71$$

Una vez calculado el número de Reynolds y con ayuda de la Figura A.I. 3 se calculó el número de potencia, que corresponde a un valor de aproximadamente 4,2.



**Figura AI. 3.** Cálculo del número de potencia mediante el gráfico de  $N_p$  vs.  $N_{Re}$  para líquidos pseudoplástico (McCabe, Smith, y Harriot, 2007, p. 281)

El número de potencia se define por la siguiente ecuación (Gelmi, 2006, p. 94):

$$N_p = \frac{P_T}{\delta \times N^3 \times Da^5} \quad [A.I.11]$$

Y al despejar, se pudo calcular la potencia teórica del agitador:

$$P_T = \delta \times N^3 \times Da^5 \times N_p$$

$$P_T = 1500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \left( \frac{100 \text{ rev}}{60 \text{ s}} \right)^3 \times (0,32 \text{ m})^5 \times 4,2 = 97,9 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 0,097 \text{ kW}$$

La potencia real del agitador es aproximadamente de 2 a 3 veces la potencia teórica por lo que:

$$P = 2 \times P_T \quad [A.I.12]$$

$$P = 2 \times 0,097 \text{ kW} = 0,194 \text{ kW}$$

Además debido se debe calcular la potencia con un factor de reserva o un sobredimensionamiento del 20% y una eficiencia del 80%, factor aceptado para la mayoría de equipos en la industria, por lo que la potencia calculada queda:

$$P = \frac{0,194 \text{ kW} \times 1,2}{0,8} = 0,291 \text{ kW}$$

## ANEXO II

### DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO USADO EN LA APLICACIÓN DEL ESMALTE

Las condiciones a las cuales la suspensión fue aplicada por el método de aspersión, se muestran en la Tabla 3.6. A continuación se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento del equipo usado en la aplicación del esmalte.

#### A.II. 1. CÁLCULO DE LOS CAUDALES DE AIRE COMPRIMIDO Y ESMALTE.

Para el dimensionamiento de la red de distribución de aire comprimido el esmaltado de las piezas de acero se tomará como criterio de diseño que la velocidad de circulación máxima de 8 m/s para la línea principal (Moreno, 2005, p. 31).

- **Cálculo del caudal**

$$Q = \frac{V}{t} \quad [ \text{AII.1} ]$$

O

$$Q = v \times A \quad [ \text{AII.2} ]$$

Donde:

Q, caudal  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

V, volumen ( $\text{m}^3$ )

t, tiempo (s)

v, velocidad fluido  $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

A, área tubería ( $\text{m}^2$ )

- **Cálculo del caudal de aire a una presión de 344,735 kPa**

En el ANEXO VII, se muestran las características técnicas de la pistola neumática que se utilizará, la misma que tiene un caudal de 29,7 m<sup>3</sup>/h. Para cumplir con las piezas esmaltadas, en esta unidad deberán trabajar 5 operarios, por lo que el caudal total será:

$$Q=29,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 5 \text{ operarios}=0,0412 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El coeficiente de utilización de la pistola neumática está dado por (Moreno, 2005, p. 29):

$$\text{coeficiente de utilización} = \frac{1 \text{ ciclo}}{\text{hora de trabajo}} \times 100\% = 8,33\% \quad [\text{All.3}]$$

$$\text{coeficiente de utilización} = \frac{40 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times 100\% = 66,7\%$$

Al caudal se deberá multiplicar por el coeficiente de utilización además de adicionar entre 5 al 10 % en caso de pérdidas por fugas. Por último se tomará en cuenta un 20 % en caso de futuras ampliaciones por lo que el caudal será de (Moreno, 2005, p. 29):

$$Q_{\text{utilizado}} = 0,667Q = 0,0275 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_T = 1,25 \times Q_{\text{utilizado}} = 0,0343 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El resultado del caudal total,  $Q_T$  deberá ser suplido por la capacidad del compresor, que como no funciona continuamente se calculará dicha capacidad con un coeficiente de demanda del 80 % (Moreno, 2005, p. 29), por lo que:

$$Q_C = \frac{Q_T}{\text{porcentaje demanda}} \quad [\text{All.4}]$$

$$Q_C = \frac{Q_T}{0,8} = \frac{0,0343 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,8} = 0,043 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- **Cálculo del caudal de esmalte a presión atmosférica**

Según el balance de masa el peso del esmalte aplicado para las cuatro capas es de 1,351 kg, por lo que:

$$Q = 1,351 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1500 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ pieza esmaltada}}{5 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 5 \text{ operarios} = 15,01 \text{E-}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

## **A.II. 2. CÁLCULO DE LOS DIÁMETROS DE LAS TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO**

Para determinar el diámetro de la tubería de aire comprimido, se realizaron las siguientes suposiciones:

- La tubería recta tendrá una pérdida por carga de 0,1 bar.
- La longitud de la tubería de trabajo de cada operador, es de 13 m.

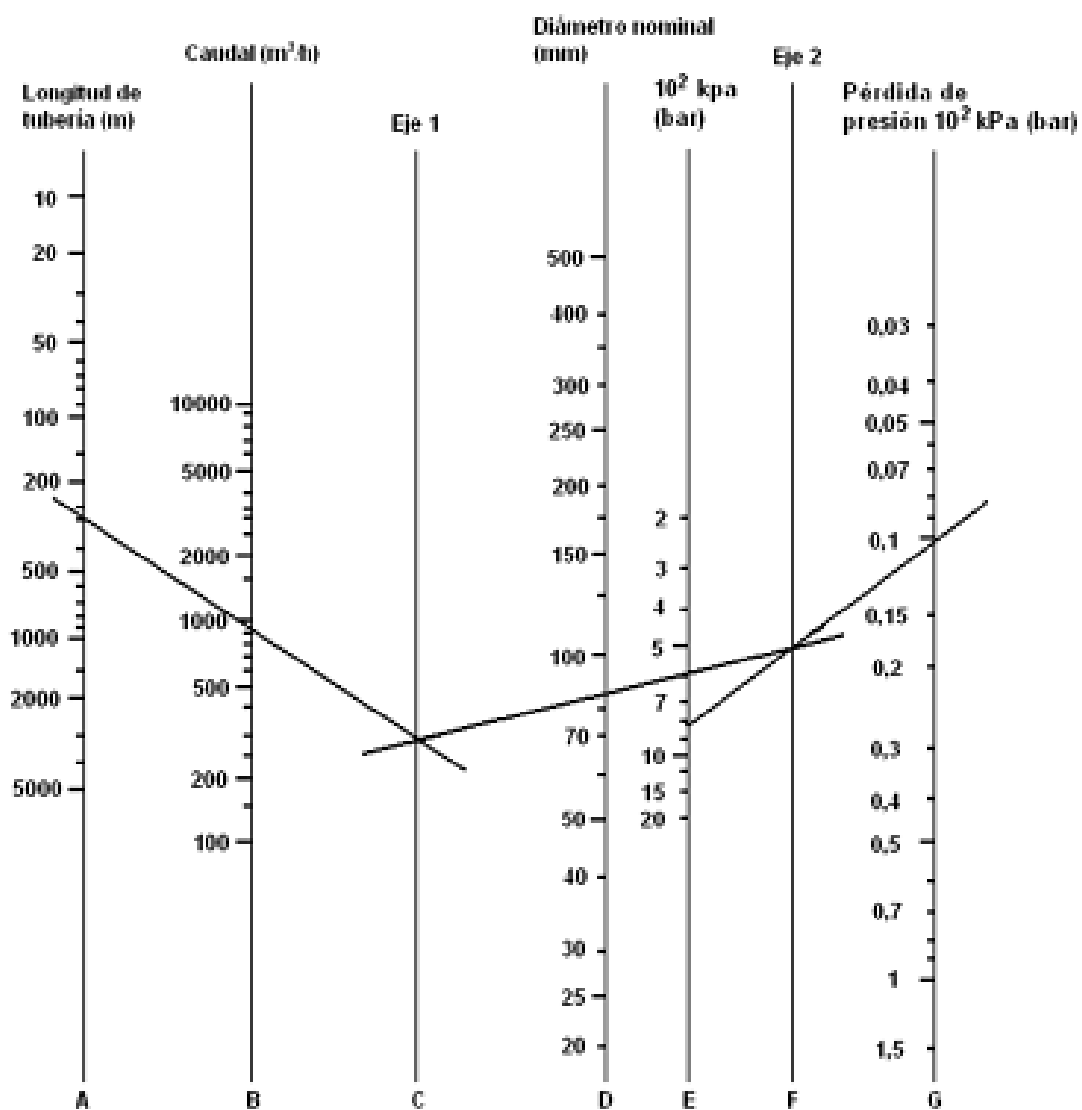
A continuación se describe los pasos para la determinar el diámetro de la tubería a partir del monograma de la Figura All. 1 (Poveda, 2007, p. 40):

- Trazar una línea entre los puntos de los ejes de la longitud de la tubería (A) y el eje del caudal (B), esta línea se alargará hasta cortar el eje 1.
- Trazar una línea entre los puntos de los ejes de la presión (E) y el eje de pérdidas de carga (G), esta línea cortara el eje 2.
- Por último unir los puntos del eje 1 y 2, con lo cual se obtendrá una línea que cortará el eje del diámetro nominal, con lo cual se obtuvo un diámetro de 28 mm.

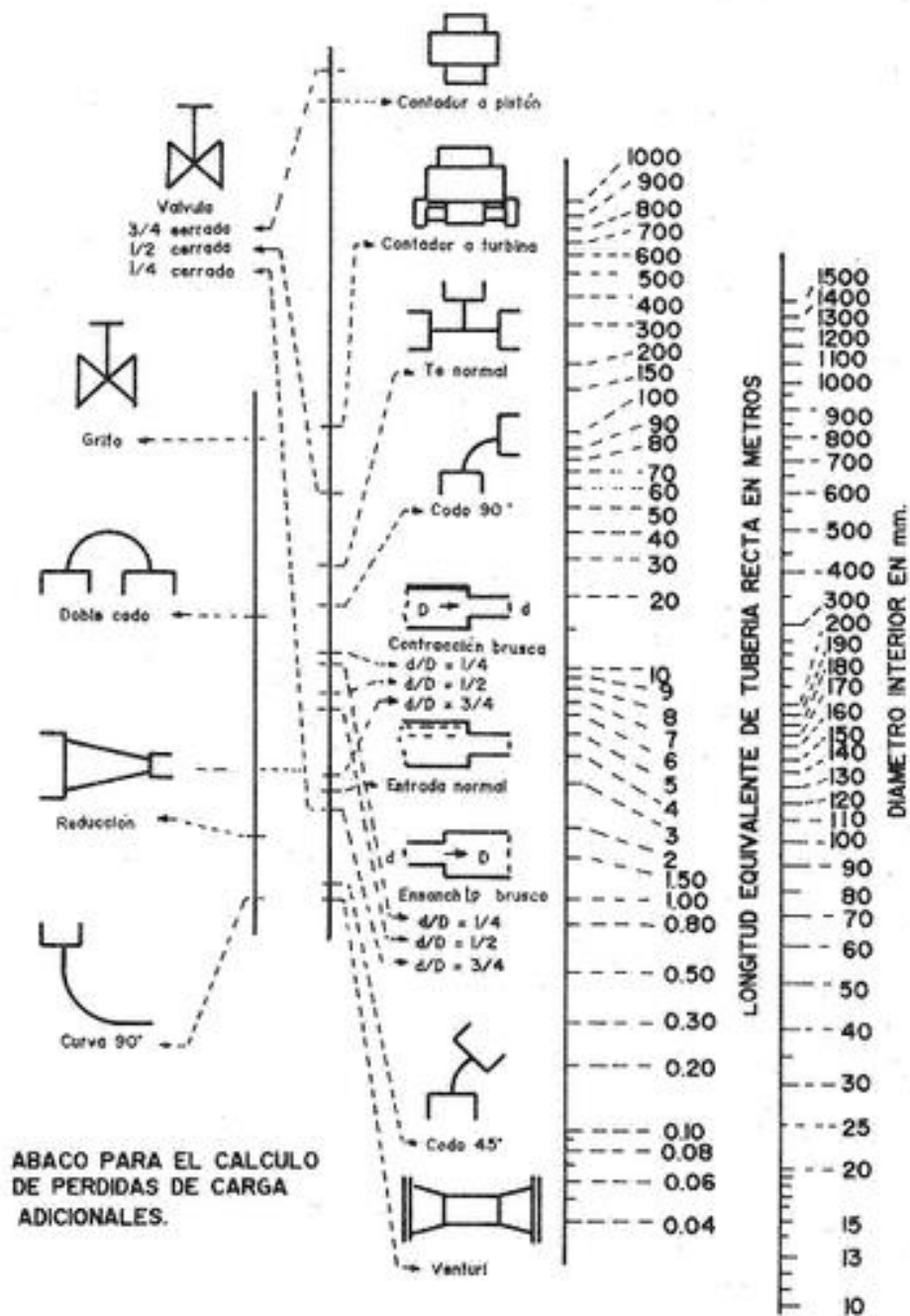
Ya que no se tomó en cuenta las pérdidas de carga debido a los accesorios, se determinó la longitud equivalente a partir del monograma de la Figura All. 2, para esto se unió los puntos del eje izquierdo correspondiente al accesorio con el eje derecho del diámetro de la tubería. Los resultados se muestran en la Tabla All.1.:

**Tabla AII. 1.** Longitud equivalente de los accesorios

ACCESORIOS	LONGITUD EQUIVALENTE (m)
Curva 90°	0,35
T	1,6

**Figura AII. 1.** Monograma para el cálculo del diámetro de tuberías  
(Poveda, 2007, p. 40)





**Figura AII. 2.** Nomograma para la determinación de pérdidas de carga localizadas (Salas y Urrestarazu, 2008, p. 2)

Las longitudes equivalentes de los accesorios calculados se deberán adicionar a la longitud de la tubería. Por lo que:

$$L = L_{\text{tubería}} + L_{\text{equivalente}}$$

[ AII.5 ]

$$L = 13 \text{ m} + 0,35\text{m} + (5 \times 1,6\text{m}) = 21,35 \text{ m}$$

La pérdida de carga por unidad de longitud será (Moreno, 2005, p. 33):

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{\text{admisible}}}{\text{Longitud tubería}} \quad [ \text{AII.6} ]$$

$$\Delta P = \frac{0,1 \text{ bar}}{13 \text{ m}} = 0,008 \frac{\text{bar}}{\text{m}}$$

Con la nueva longitud calculada, se debe multiplicar por la pérdida de carga por unidad de longitud y con el nuevo valor de pérdida de carga se regresará al monograma de la figura para calcular el nuevo diámetro de la tubería.

$$\Delta P = 0,008 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \times 21,35 \text{ m} = 0,17 \text{ bar}$$

Por lo tanto el diámetro de la tubería es de 26 mm.

Una vez calculados los diámetros de las tuberías y con ayuda de los catálogos se puede conocer los diámetros nominales y el tipo de tubería que se instalará en la planta.

TUBERÍA AZUL DE ALUMÍNIO ANODIZADO EN TIRAS DE 3 METROS

REFERENCIA	DIÁMETRO DE TUBO		ESPESOR DE PRESIÓN (*)		EMBALAJE
	OD	ID	PARED	MAX A 20°C	
AL-RM1513-3M-20B	15	13	1	30	20x3m=60m
AL-RM1816-3M-20B	18	16	1	30	20x3m=60m
AL-RM2220-3M-20B	22	20	1	30	20x3m=60m
AL-RM2826-3M-10B	28	26	1	30	10x3m=30m

**Figura AII. 3.** Catálogo de la tubería  
(Guest, 2011, p. 9)

### A.II. 3. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL COMPRESOR

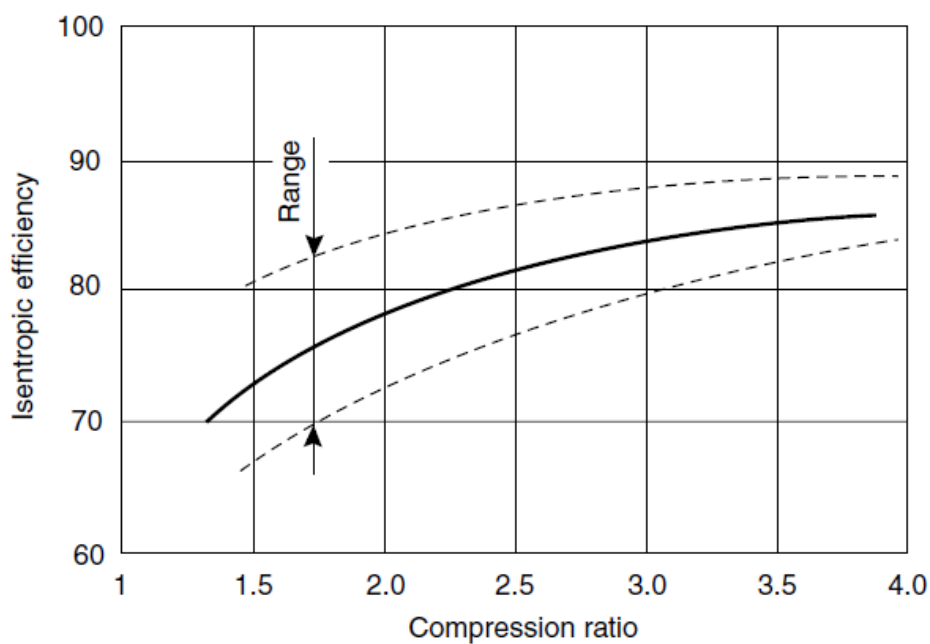
Para el cálculo de la potencia del compresor se parte de la ecuación [2.9] se tomará en cuenta que  $\gamma$  tiene un valor de 1,4 según la Tabla 2.1, por lo que:

$$w = \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{R \times T_1}{M} \times \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

$$w = \frac{1,4}{1,4-1} \times \frac{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \times \frac{1\,000 \text{ gmol}}{1 \text{ kgmol}} \times 298 \text{ K}}{28,84 \text{ kg/kgmol}} \times \left[ \left( \frac{344\,738}{101\,325} \right)^{(1,4-1)/1,4} - 1 \right]$$

$$w = 3\,630,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Una vez calculado el trabajo requerido por el compresor, será necesario calcular la eficiencia del compresor para el cálculo de la potencia requerida.



**Figura AII. 4.** Eficiencias típicas de compresores recíprocos  
(Sinnott, 2005, p. 84)

Con la figura, y la relación de presiones se pudo calcular que la eficiencia del compresor es de 85 %.

Para poder conocer el flujo másico de aire requerido para la aplicación de la suspensión porcelánica, se utilizará la ley de los gases ideales.

$$PV=nRT \quad [ \text{AII.7} ]$$

Expresión que también se puede escribir de la siguiente manera:

$$PV=\frac{m}{P_M} RT \quad [ \text{AII.8} ]$$

$$\dot{m}=\frac{P \times V \times P_M}{RT}$$

$$\dot{m}=\frac{101\,325 \text{ Pa} \times 0,043 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 28,84 \text{ kg/kgmol}}{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \times \frac{1\,000 \text{ gmol}}{1 \text{ kgmol}} \times 298 \text{ K}}$$

$$\dot{m}=0,051 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$PG=\frac{\dot{m} \times w}{\text{Eficiencia}} \quad [ \text{AII.9} ]$$

$$PG=\frac{0,051 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3\,630,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,85} = 216,71 \text{ kW}$$

## **A.II. 4. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO DEL COMPRESOR**

Para el cálculo del volumen del depósito del compresor se tomó en cuenta la siguiente ecuación (Gijón, 2005, p. 16):

$$V_{\text{depósito}} = \frac{\dot{V}_{\text{consumo}} \times t \times P_{\text{atm}}}{(p_1 - p_2)} \quad [ \text{AII.7} ]$$

Donde:

$V_{\text{depósito}}$ , es el volumen del depósito en ( $\text{m}^3$ )

$\dot{V}_{\text{consumo}}$ , es el caudal requerido por los 5 operarios ( $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ )

$t$ , es el tiempo de uso sin interrupciones (s)

$p_1, p_2$ , son las presiones absolutas máximas y mínimas que se alcanzan en el tanque.

$$V_{\text{depósito}} = \frac{0,0343 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 300 \text{ s} \times 101325 \text{ Pa}}{(1101065 \text{ Pa} - 446063 \text{ Pa})} = 1,6 \text{ m}^3$$

## ANEXO III

### PRUEBAS DE ESTABILIDAD DEL ESMALTE

Para determinar la estabilidad del esmalte se hicieron pruebas de estabilidad del esmalte, se medirá la concentración de sólidos en la suspensión S/L: 53:47 a diferentes intervalos de tiempo.

#### **Ejemplo de cálculo de la concentración de sólidos para la suspensión porcelánica**

$$\% \text{Concentración de sólidos} = \frac{\text{Peso del sólido}}{\text{Peso de la suspensión}} \times 100 \quad [\text{AIII.1}]$$

Dónde:

$$\text{Peso del sólido} = \text{Peso}_{\text{Frasco+sólido}} - \text{Peso}_{\text{Frasco}} \quad [\text{AIII.2}]$$

$$\text{Peso de la suspensión} = \text{Peso}_{\text{Frasco+suspensión}} - \text{Peso}_{\text{Frasco}} \quad [\text{AIII.3}]$$

$$\text{Peso del sólido} = 12,15 \text{ g} - 10,30 = 1,85 \text{ g}$$

$$\text{Peso de la suspensión} = 13,76 \text{ g} - 10,30 \text{ g} = 3,46 \text{ g}$$

$$\% \text{Concentración} = \frac{1,85 \text{ g}}{3,46 \text{ g}} \times 100 = 53,56 \%$$

Los datos de los pesos registrados para el cálculo de la concentración de la suspensión porcelánica se presentan en la tabla a continuación.

**Tabla AIII. 1.** Resultados ensayo de sedimentación de la suspensión S/L 53:47

# PRUEBA	TIEMPO (min)	Pf (g)	Pf+sus (g)	Pf+ sól (g)	P sus (g)	P sól (g)	Concentración de sólidos (%)
1	0	10,3089	13,6814	12,1183	3,3725	1,8094	53,65159377
2	20	10,463	14,503	12,628	4,04	2,165	53,58910891
3	40	10,4888	14,5281	12,6489	4,0393	2,1601	53,47708761
4	60	10,5567	13,5569	12,1633	3,0002	1,6066	53,54976335
5	90	10,4341	14,1092	12,3964	3,6751	1,9623	53,39446546
6	120	10,6822	14,6292	12,7898	3,947	2,1076	53,3975171
7	180	10,5318	13,9385	12,3491	3,4067	1,8173	53,34487921
8	240	10,3934	14,9379	12,8031	4,5445	2,4097	53,02453515
9	360	10,684	15,0331	12,9893	4,3491	2,3053	53,00636913

Pf: Peso del frasco vacío

Pf+sus: Peso del frasco con la suspensión

Pf+sól: Peso del frasco con sólido

P sus: Peso de la suspensión

P sól: Peso del sólido

## ANEXO IV

### DISEÑO DEL PROCESO DE SECADO DE LAS PIEZAS ESMALTADAS

#### A.IV. 1. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO

Para determinar la velocidad de secado durante la etapa a temperatura ambiente y a temperatura de 110 °C, se realizaron pruebas de secado en las cuales las piezas esmaltadas se pesaron a diferentes intervalos de tiempo, para determinar el contenido de agua se siguió la norma INEN 690 en la cual se describe el método de secado al horno (INEN 690, 1982).

#### **Ejemplo de cálculo del contenido de humedad en porcentaje determinados en cada intervalo de tiempo en el ensayo de secado**

Las ecuaciones para determinar el contenido de humedad se detallan según el método de secado (INEN 690, 1982, p. 3).

- **Cálculo contenido de humedad base húmeda**

$$\%X_{th} = \frac{W_w}{W_{sh}} \times 100 \quad [AIV.1]$$

Donde:

%X<sub>th</sub>, contenido de humedad en base húmeda (%).

W<sub>w</sub>, peso del agua contenido en la suspensión porcelánica (g), sin el peso de la pieza metálica.

W<sub>sh</sub>, peso de sólidos en la suspensión porcelánica (g), sin el peso de la pieza metálica.

$$W_w = \text{peso esmalte húmedo} - \text{peso esmalte seco} \quad [AIV.2]$$



Los cálculos que a continuación se presentan corresponden a los 10 minutos de la etapa de secado a temperatura ambiente.

$$W_{sh} = 41,157 \text{ g} - 37,125 \text{ g} = 4,032 \text{ g}$$

$$W_w = 4,032 \text{ g} - 1,654 \text{ g} = 2,378 \text{ g}$$

$$\%X_{th} = \frac{2,378 \text{ g}}{4,032 \text{ g}} \times 100 = 58,97 \%$$

- **Cálculo contenido de humedad base seca**

$$X_t = \frac{W_{sh} - W_s}{W_s} \quad [AIV.3]$$

$$X_t = \frac{(4,032 - 1,654) \text{ g}}{1,654 \text{ g}} = 1,437 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g sólido seco}}$$

- **Cálculo de la humedad libre**

$$X = X_t - X^*$$

$$X = 1,437 \text{ g} - 0,00024 \text{ g} = 1,437 \text{ g}$$

$$X_{\text{promedio}} = \frac{(1,437 + 1,901 + 1,409) \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g sólido seco}}}{3} = 1,582 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g sólido seco}} \quad [AIV.4]$$

- **Cálculo de la velocidad de secado**

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{(0,812 - 0,237) \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g sólido seco}}}{(30 - 20) \text{ min}} = 0,0287$$

$$W = -\frac{L_s}{A} \times \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

$$W = -\frac{1,239 \text{ g}}{0,025 \text{ m}^2} \times 0,0287 = 14,258 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{min m}^2}$$

#### A.IV. 2. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL SECADOR TIPO CABINA

Para el cálculo de la potencia del secador que se utilizará se tomarán en cuenta las siguientes ecuaciones:

- **Cálculo del volumen húmedo:**

$$V_H = (2,83 \times 10^{-3} + 4,56 \times 10^{-3} H) T \text{ (K)} \quad [\text{AIV.5}]$$

$$V_H = (2,83 \times 10^{-3} + 4,56 \times 10^{-3} \times 0,01) \times (110 + 273)$$

$$V_H = 1,101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}$$

- **Cálculo de la densidad del aire**

$$\rho = \frac{m_{\text{aire}} + m_{\text{agua}}}{V_H} \quad [\text{AIV.6}]$$

$$\rho = \frac{1 \text{ kg} + 0,01 \text{ kg}}{1,101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}} = 0,996 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Cálculo del flujo másico y del coeficiente de convección**

$$G = v \times \rho \quad [\text{AIV.7}]$$

$$G = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,996 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 4,08 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 14700,96 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}$$

$$h=0,0204 G^{0,8} \quad [AIV.8]$$

$$h=0,0204 \times \left(14700,96 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}\right)^{0,8} = 44,005 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- **Cálculo del calor utilizado por el secador**

$$Q=h \times (T-T_w) \times A \quad [AIV.9]$$

El área de exposición de secado se calculó a partir del área esmaltada y número de piezas.

$$A=A_{\text{piezas}} \times \text{número de piezas} \quad [AIV.10]$$

$$A=0,45 \text{ m}^2 \times 20=9 \text{ m}^2$$

$$Q=44,005 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times (383 \text{ K}-310 \text{ K}) \times 9 \text{ m}^2=28911,28 \text{ W}=28,9 \text{ KW}$$

A partir del calor necesario para el secado de las piezas, en los catálogos se escogió el tipo de secador.

Especificaciones técnicas de CT-C Horno de secado de aire circulante

Modelo	CT-C-O	CT-C-IA	CT-C-I	CT-C-II	CT-C-IIA	CT-C-III	CT-C-IIIA	CT-C-IV
Peso seco por lote (kg/lote)	30	60	120	240	240	360	360	480
Área de evaporación (m <sup>2</sup> )	4.7	7.1	14.1	28.3	28.3	42.4	42.4	56.5
Área de radiador(m <sup>2</sup> )	8	15	24	48	48	72	72	96
Consumo de vapor(kg/h)	7	15	20	40	40	60	60	80
Potencia de calefacción eléctrica(kw)	6-9	6-9	15	30	30	45	45	60
Flujo de ventilador (m <sup>3</sup> /h)	3450	3450	3450	6900	6900	10350	10350	13800
Potencia de ventilador(kw)	0.45	0.45	0.45	0.45×2	0.45×2	0.45×3	0.45×3	0.45×4
Tolerancia de temperatura dentro de horno(°C )	±1	±1	±2	±2	±2	±2	±2	±2
Dimensiones exteriores(m m) (A×L×H)	1400 ×1200 ×2000	1400 ×1200 ×2000	2300 ×1200 ×2000	2300 ×2200 ×2000	4280 ×1200 ×2270	2260 ×3200 ×2000	3240 ×2200 ×2000	4280 ×2200 ×2270
Carrito auxiliar de secado (set)	0	1	2	4	4	6	6	8
Bandeja auxiliar de (piezas)	16	24	48	96	96	144	144	192
Peso total (kg)	500	820	1580	1800	1880	2100	2210	2800

Figura AIV. 1. Catálogo secador tipo cabina

## ANEXO V

### DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO

#### A.V. 1. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ MOLIDA

##### Ejemplo de cálculo del poder calorífico de la cascarilla de arroz pulverizada

A partir de los resultados recogidos de los ensayos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.31, se calculó el poder calorífico con la ecuación que a continuación se presenta (DIN 51900), en el ejemplo se calcula el poder calorífico para la primera prueba se tomó en cuenta la masa sin residuo:

$$q_c = \frac{C \times (T_f - T_i) - q_z \times (L_o - L_f)}{m}$$

$$q_c = \frac{6897,459 \frac{\text{J}}{\text{°C}} \times (21,8 - 20,06) \text{°C} - 2,69 \text{ J/cm} \times (10 - 2) \text{ cm}}{0,172 \text{ g}} = 15495,119 \text{ J/g}$$

De la misma manera se procedió para el cálculo del poder calorífico del ácido benzoico.

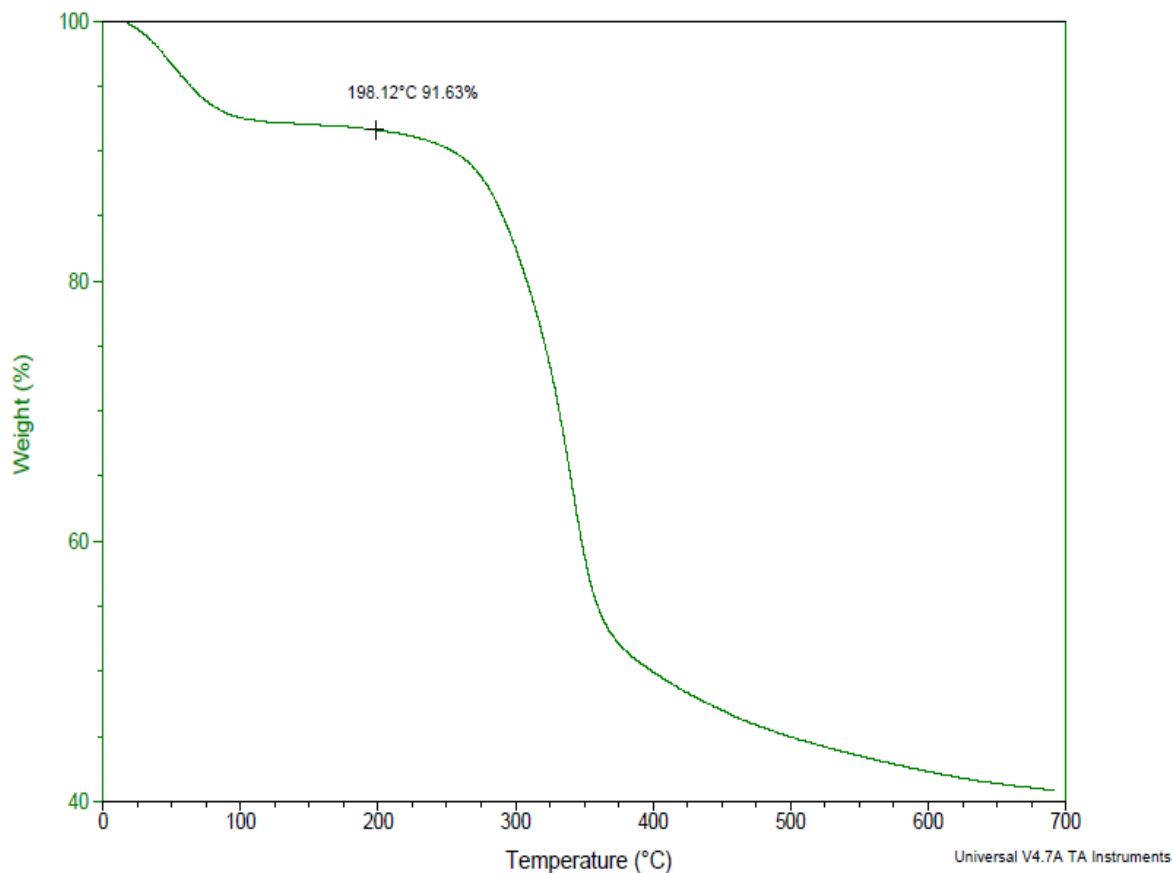
#### A.V. 2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Para determinar la humedad de la cascarilla de arroz proveniente de los molinos de Agrocomexport Cia. Ltda. que se encuentran en la ciudad de Machachi, se realizó un TGA. En la Figura AV. 1 se puede observar que la cascarilla tiene una humedad de 8,37 %, el análisis se realizó en los Laboratorios de Ciencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional

Sample: M1  
 Size: 15.5150 mg  
 Method: Ramp  
 Comment: M1

TGA

File: C:\TA\Data\TGA\Muestra Andrea.001  
 Operator: SGH  
 Run Date: 18-May-2015 12:59  
 Instrument: TGA Q500 V20.10 Build 36



**Figura AV. 1** TGA muestra cascarilla de arroz de Agrocomexport Cía. Ltda.

### A.V. 3. CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO

**Para los cálculos relacionados al dimensionamiento del horno y balance energético como energético como base de cálculo se tomó en cuenta la composición del combustible es combustible es decir la cascarilla de arroz, en la Tabla 1.9**

Tabla 1.9 se muestra la composición de la cascarilla de arroz

Para iniciar con los cálculos se seleccionó un horno tipo caja debido a que es el más conveniente para la cocción de las piezas esmaltadas. El horno constara de tubos horizontales con un diámetro exterior de los tubos es de 5" con longitud expuesta de 36 pies.

- **Estimación de la TG**

La temperatura media de los tubos en la sección radiante se estima en  $1\ 652\ ^\circ\text{F} = 900\ ^\circ\text{C}$

**Tabla AV. 1.** Valores típicos de la densidad promedio de flujo de calor en la zona radiante

TIPO DE HORNO	Densidad radiante promedio (W/m <sup>2</sup> )
Calentadores de crudo destilación atmosférica	31 400-44 000
Calentadores de crudo destilación al vacío	25 000-31 400
Reboilers	31 400-37 600
Hornos de hot oil	25 000-34 500
Hornos de reforming catalítico	23 500-37 600
Hornos de coque retardado	31 400-34 599
Desasfaltado de propano	25 000-2 800
Calentadores de carga a procesos de hidrotratamiento	31 400
Calentadores de carga a cracking catalítico	31 400-34 500
Sobre calentadores de vapor	28 200-40 000
Hornos de planta de gasolina	31 400-37 600

(Cao, 2004, p. 370)

Se supondrá que se trata de un sobrecalentador de vapor con una densidad de

flujo igual a  $34100\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  o  $10813,6\ \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}$

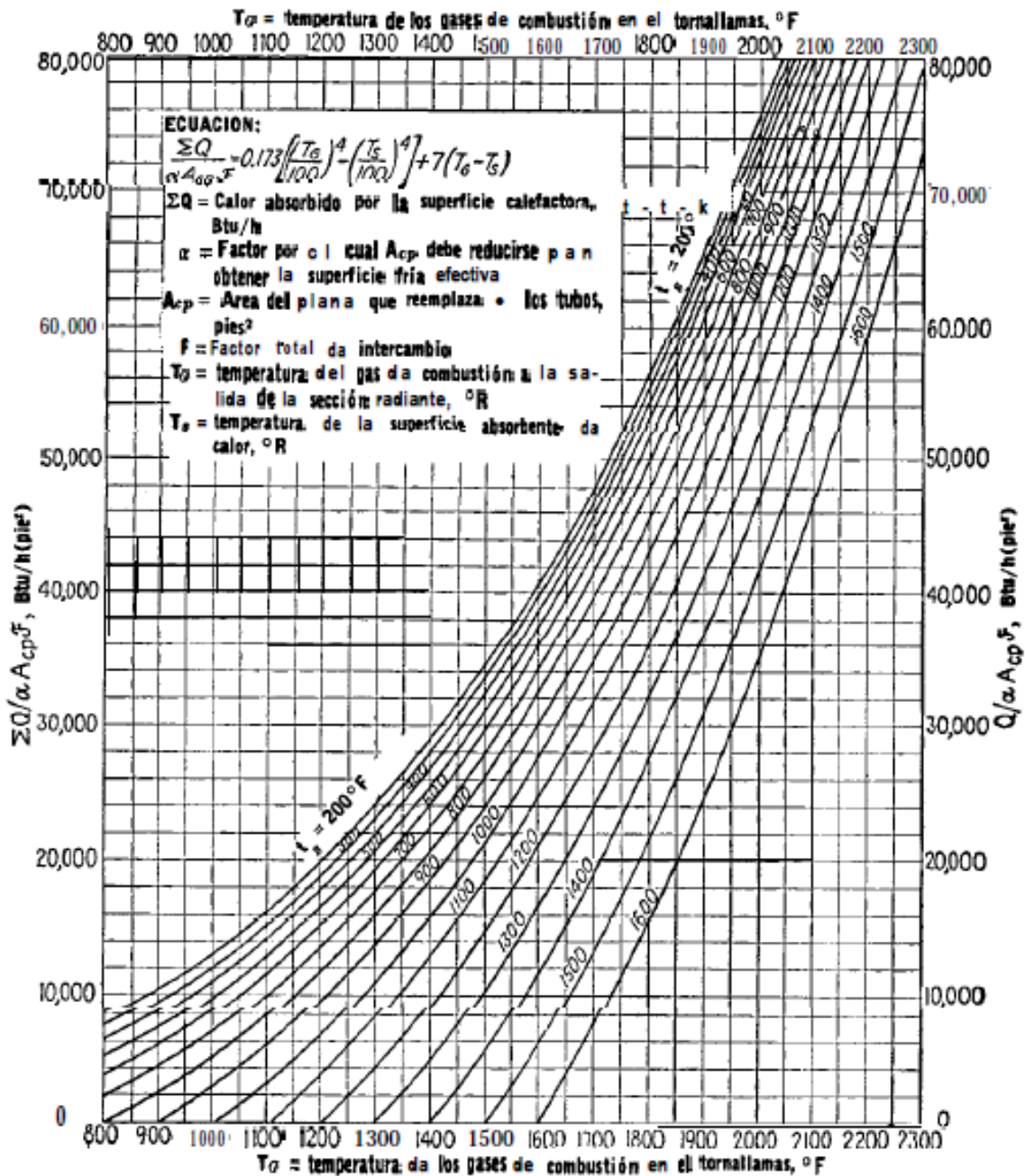
$$\frac{q}{\alpha A_{cp}} = 2 \times \text{densidad flujo promedio} \quad [\text{AV.1}]$$

$$\frac{q}{\alpha A_{cp}} = 2 \times \text{densidad flujo promedio} = 2 \times 10813,6\ \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2} = 21627,1\ \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}$$

F es aproximadamente 0,57 por lo que

$$\frac{q}{\alpha A_{cp} F} = \frac{21627,1\ \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}}{0,57} = 37942,4\ \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}$$

Con la temperatura promedio del tubo de la sección radiante y el flujo promedio se podrá calcular la temperatura de los gases T<sub>g</sub>, a partir de la Figura AV. 2.



**Figura AV. 2.** Flujo de calor en la sección radiante (Kern, 2006, p. 795)

Se encontró que la temperatura de los gases de salida fue de:

$$T_g = 2050 \text{ °F} = 1121,11 \text{ °C}$$



- **Cálculo del calor necesario para el calentamiento del sistema metal esmalte.**

El flujo promedio se calcula a partir del calor necesario para el calentamiento del sistema metal esmalte.

$$Q=m \times C_p \times \Delta T$$

**Tabla AV. 2.** Propiedades de la suspensión porcelánica con relación S/L 53:47

Masa esmalte (g) 20 piezas	27 039,688
Cp medio (J/g K)	0,4895

$$Q_1 = 27039,688 \text{ g} \times 0,4895 \frac{\text{J}}{\text{g K}} \times (1173 - 293) \text{ K}$$

$$Q_1 = 11647616 \text{ J} = 11647,6 \text{ kJ}$$

- **Cálculo del calor necesario para calentar las piezas metálicas**

**Tabla AV. 3.** Propiedades de las piezas metálicas

Masa pieza (g)	6 640,2
Cp medio (J/g K)	0,873

$$Q_2 = 6640,2 \text{ g} \times 0,873 \frac{\text{J}}{\text{g K}} \times (1173 - 293) \text{ K}$$

$$Q_2 = 5101267,25 \text{ J}$$

$$Q_2 = 5101267,25 \text{ J} \times 20 = 102025 \text{ kJ}$$

- **Cálculo del Calor total**

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$Q_T = 102025 \text{ kJ} + 11647,6 \text{ kJ} = 113673 \text{ kJ}$$

[AV.2]

- **Cálculo de la cantidad mínima de combustible necesario para un horno con el 75 % de eficiencia de combustión**

$$Q_T = \frac{113673 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{0,75} = 151564 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Q_T = m \times P_c \quad [AV.3]$$

$$m = \frac{Q_T}{P_c} = \frac{151564 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{15485,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 9,79 \text{ kg}$$

Se considera un 25 % de exceso para combustibles sólidos

$$\dot{m} = 1,25 \times 9,79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 12,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Cálculo del aire requerido para la combustión de la cascarilla de arroz**

$$\frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{combustible}}} = 13,185 \quad [AV.4]$$

$$m_{\text{aire}} = 13,185 \times m_{\text{combustible}} = 13,185 \times 12,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 161,31 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 355,64 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$Q_A = m_{\text{aire}} \times C_{\text{paire}} \times (T_i - T_f)$$

Se supondrá que el aire ingresara con una temperatura de 400 °F del precalentador.

$$Q_A = 355,64 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \times 0,2408 \times (400 - 80) = 27,40 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

- **Flujo de calor por unidad de área**

$$q = \frac{Q_T}{t \times A_T}$$

$$q = \frac{113673 \text{ kJ}}{3600 \text{ s} \times 0,45 \text{ m}^2} = 70,17 \frac{\text{kJ}}{\text{s m}^2} = 22252,4 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}$$

- **Carga total del horno**

Se considerará para la cocción de 240 piezas, debido a posibles fallas en las piezas y las piezas que salen del proceso para realizar el control de calidad.

$$Q_F = 70,17 \frac{\text{kJ}}{\text{s m}^2} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \times \frac{0,45 \text{ m}^2}{1 \text{ pieza}} \times 240 \text{ piezas} = 27,28 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Se considerará un 75 % de eficiencia de operación del horno, se tiene:

$$Q_F = \frac{27,28 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{0,75} = 3,5 \times 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

- **Cálculo del calor perdido a través de las paredes del horno, se supondrá un 2% de pérdidas**

$$Q_W = Q_T \times 2\% \quad [\text{AV.5}]$$

$$Q_W = 1,44 \times 10^5 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \times 2\% = 3,2 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

- **Cálculo del calor neto**

$$Q_{\text{neto}} = Q_T + Q_A - Q_W \quad [\text{AV.6}]$$

$$Q_{\text{neto}} = 1,44 \times 10^5 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} + 22,4 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} - 3,2 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 1,72 \times 10^5 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

- **Cálculo del calor de los gases de salida**

$$Q_G = mg \times C_p \times (T_g - 288)$$

$$mg = m_{\text{aire}} + m_{\text{combustible}} + m_{\text{vaporización}} \quad [\text{AV.7}]$$

Para la masa debida a la vaporización se considera que esta será el 30% de la masa de los gases de combustión.

$$m_{\text{vaporización}} = m_{\text{combustible}} \times 0,3 \quad [\text{AV.8}]$$

$$m_{\text{vaporización}} = 12,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 0,3 = 3,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{G}} = 161,31 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 12,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 3,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 177,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 390,68 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{G}} = 177,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 0,4895 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (1394,11 - 288) \text{K}$$

$$Q_{\text{G}} = 9,59 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 9,09 \times 10^4 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q = Q_{\text{F}} + Q_{\text{neto}} - Q_{\text{G}}$$

$$Q = 3,32 \times 10^7 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

- **Cálculo geometría del sistema**

$$S = \frac{Q}{10813,6 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}} \quad [\text{AV.8}]$$

$$S = \frac{3,32 \times 10^7 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{10813,6 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2}} = 3074,45 \text{ ft}^2$$

- **Estimación del número estimado de tubos**

$$N_t = \frac{S}{\pi d_o L} \quad [\text{AV.9}]$$

$$N_t = \frac{3074,45 \text{ ft}^2}{\pi \times 0,417 \text{ ft} \times 36 \text{ ft}} = 65,19$$

$$N_t \sim 65$$

- **Cálculo de la superficie del plano frío**

Se consideró como distancia centro-centro SL de los tubos un valor de 8 in”

$$A_{cp} \text{ por tubo} = \frac{8}{12} \times 36 = 24 \text{ ft}^2$$

$$\frac{\text{centro a centro}}{DE} = \frac{8''}{5''} = 1,6$$

A partir del cociente calculado y con la consideración de que se trata de una hilera simple se calculó el valor de  $\alpha$  en la Figura AV. 3.

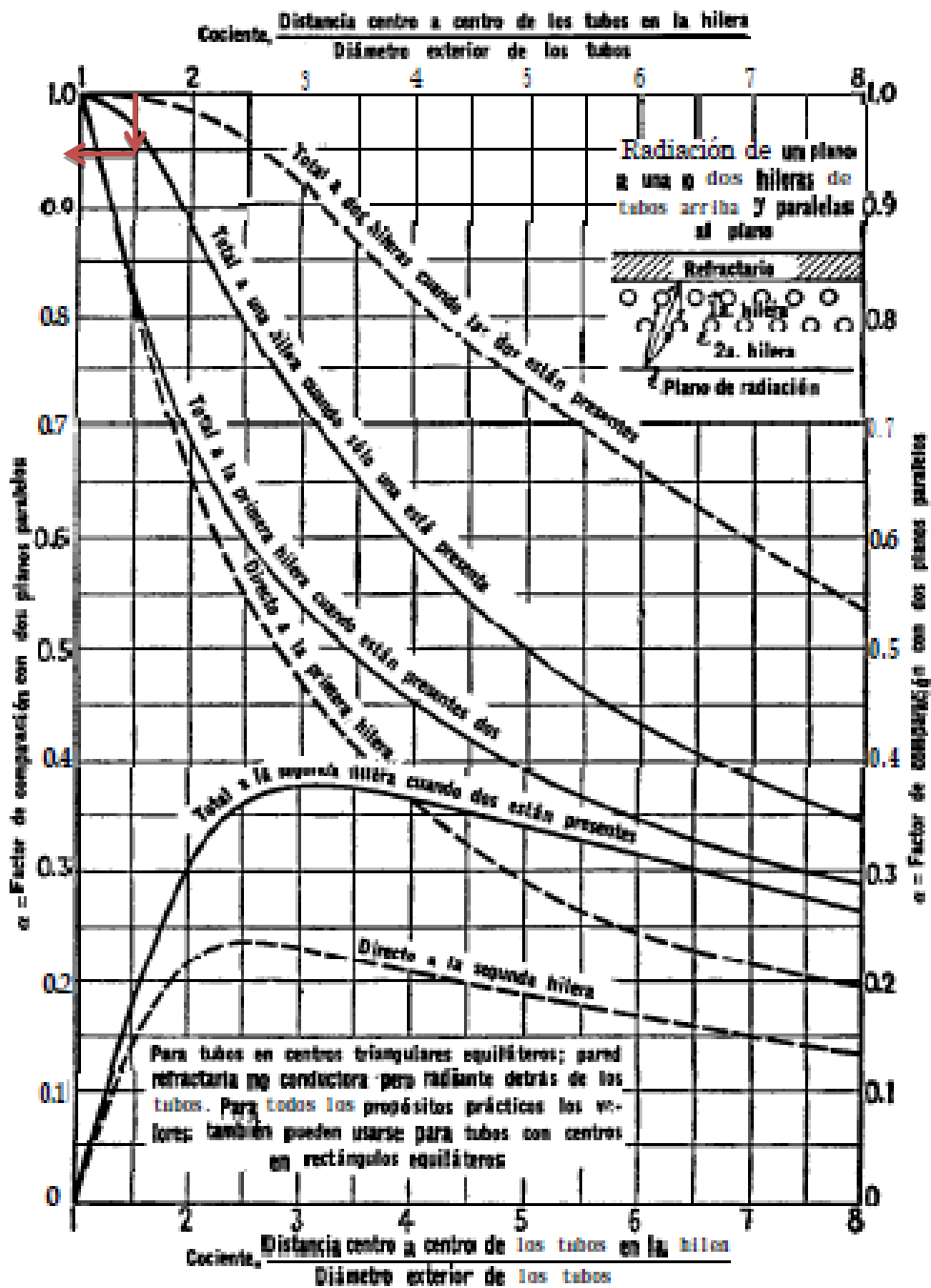


Figura AV. 3. Radiación entre un plano y una o más hileras de tubos paralelas al plano (Kern, 2006, p. 783)

Se calculó un valor de  $\alpha=0,95$

Por lo tanto:

$$\alpha A_{cp, \text{por tubo}} = 22,8 \text{ ft}^2$$

Como son 65 tubos entonces,

$$\alpha A_{cp} = \alpha A_{cp} \text{ por tubo} \times N_t$$

$$\alpha A_{cp} = 22,8 \text{ ft}^2 \times 65 = 1482 \text{ ft}^2$$

- **Comprobación de la temperatura de los gases de salida:**

$$\frac{Q}{\alpha A_{cp}} = \frac{3,32 \times 10^7 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{1482 \text{ ft}^2} = 22402,15$$

A partir de la Figura AV. 2, se encuentra que la temperatura de salida de los gases es igual a 1900 °F, dado que dicha temperatura es muy cercana a la calculada inicialmente con una desviación del 7 %, no se realizara ningún cálculo adicional.

- **Cálculo de las pérdidas de calor**

Las pérdidas de calor que se dan en el proceso de calentamiento del horno se dan debido a la acumulación de energía por las paredes, disipación con los gases de chimenea y radiación que emite la mezcla de materias primas y la pieza metálica.

#### 1. *Calor en la sección convectiva*

Debido a que la transferencia de calor por convección en la zona de radiación no representa la mayor contribución y no puede calcularse con demasiada precisión, se pueden hacer algunas simplificaciones.

$$q_c = h_c A (T_G - T_S) \quad \text{[AV.10]}$$

Como  $h_c$  es  $2,39 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2\text{K}}$

A es alrededor de dos veces  $\alpha A_{cp}$

$$A=2 \times \alpha A_{cp}$$

$$A=2 \times 1482 \text{ ft}^2=2964 \text{ ft}^2=265,36 \text{ m}^2$$

$$q_c=2,39 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2\text{K}} \times 265,36 \text{ m}^2 \times (1394,11-1173)\text{K}=140,23 \times 10^6 \text{W}$$

## 2. Calor en la sección radiante

$$q_r=F_A F_\epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{AV.11}]$$

O

$$q_r=F \alpha A_{cp} \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad [\text{AV.12}]$$

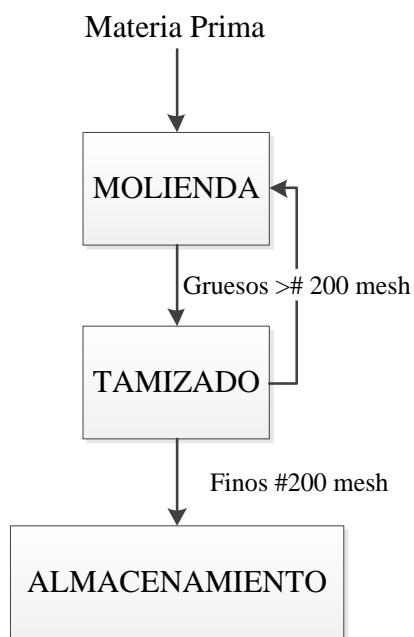
$$q_r=0,57 \times 137,68 \text{ m}^2 \times 5,6704 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \times (1394,11^4 - 1173^4)=8,38 \times 10^8 \text{W}$$



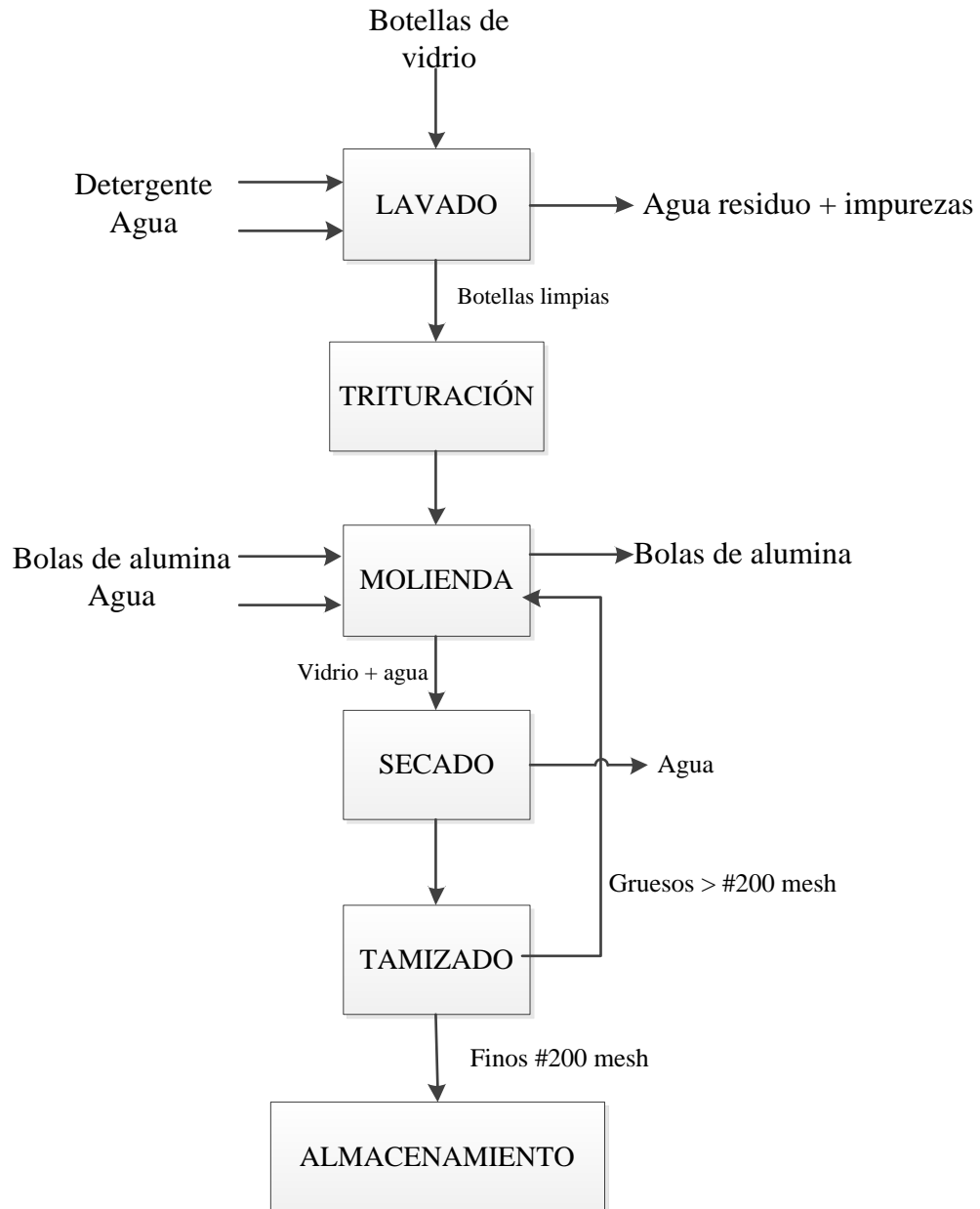
## ANEXO VI

### ESQUEMAS

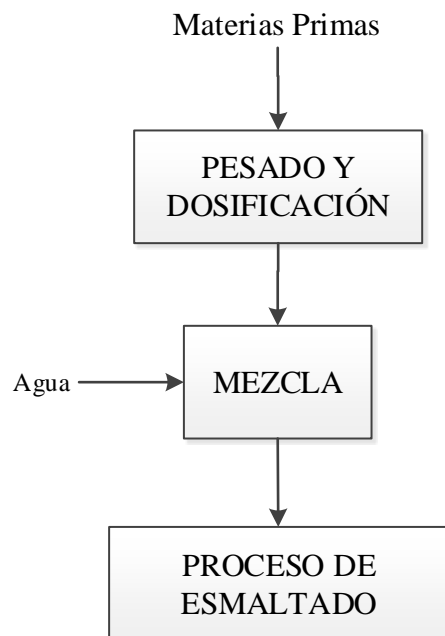
#### A.VI. 1 ESQUEMAS DEL PROCESO



**Figura AVI. 1.** Preparación de materias primas



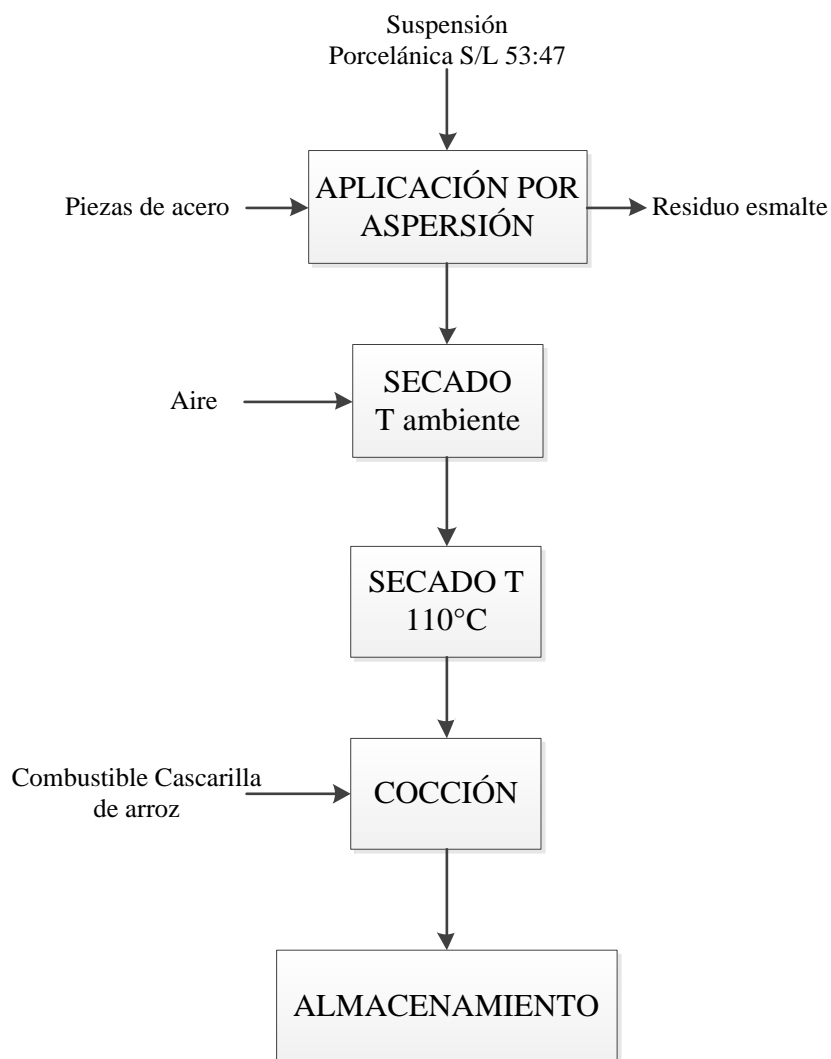
**Figura AVI. 2.** Preparación de botellas



**Figura AVI. 3.** Preparación de esmalte porcelánico



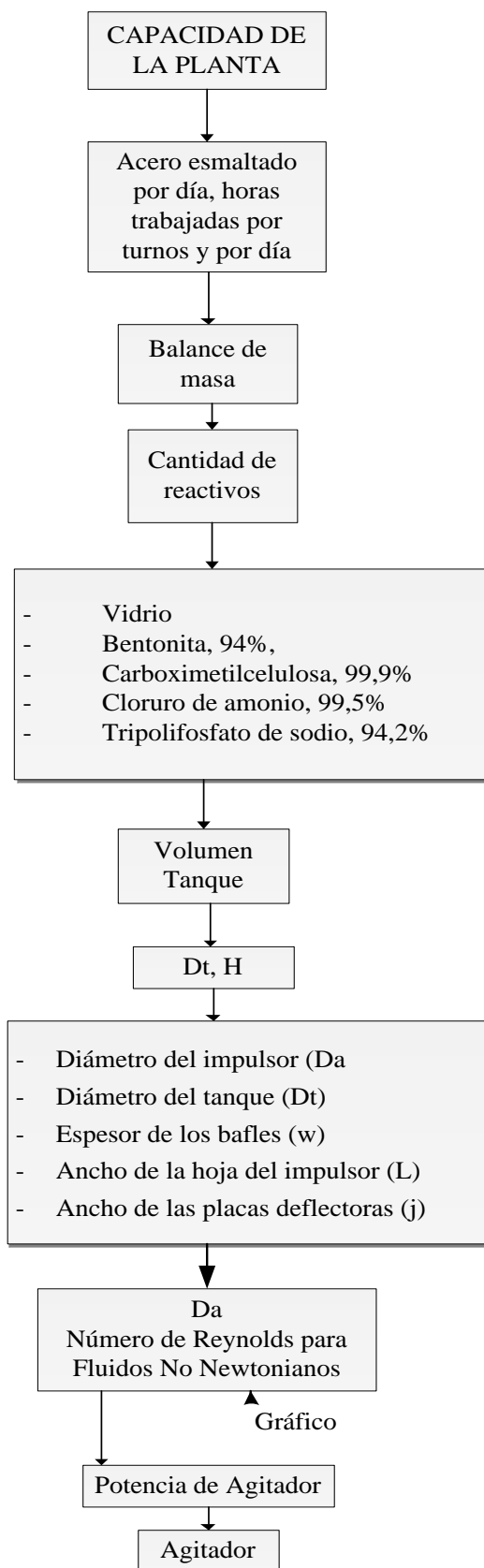
**Figura AVI. 4.** Preparación de piezas de acero



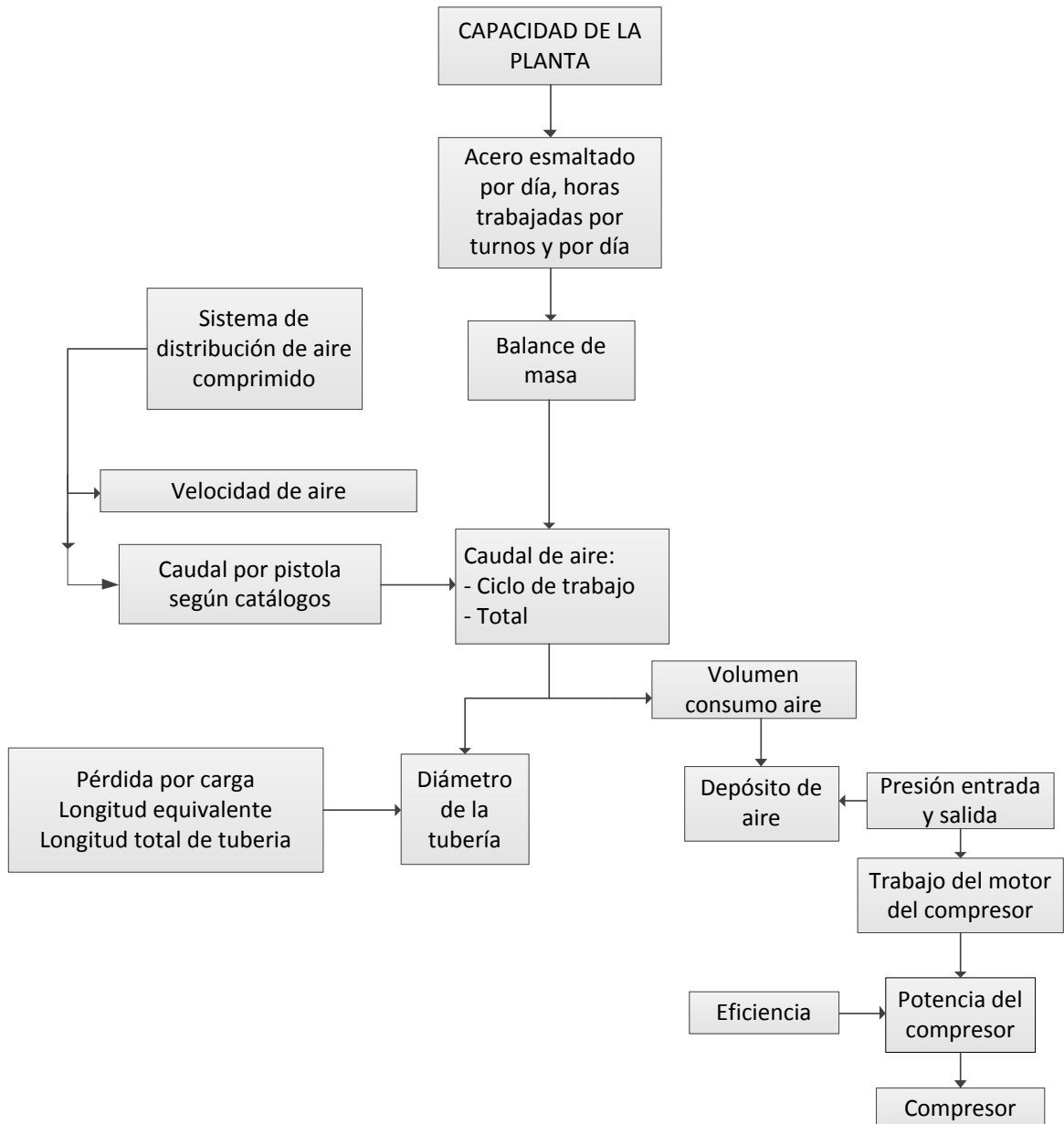
**Figura AVI. 5. Proceso de esmaltado**

## **A.VI. 2 ESQUEMAS DE LA METODOLOGÍA DEL PROCESO DE DISEÑO DE LA PLANTA**

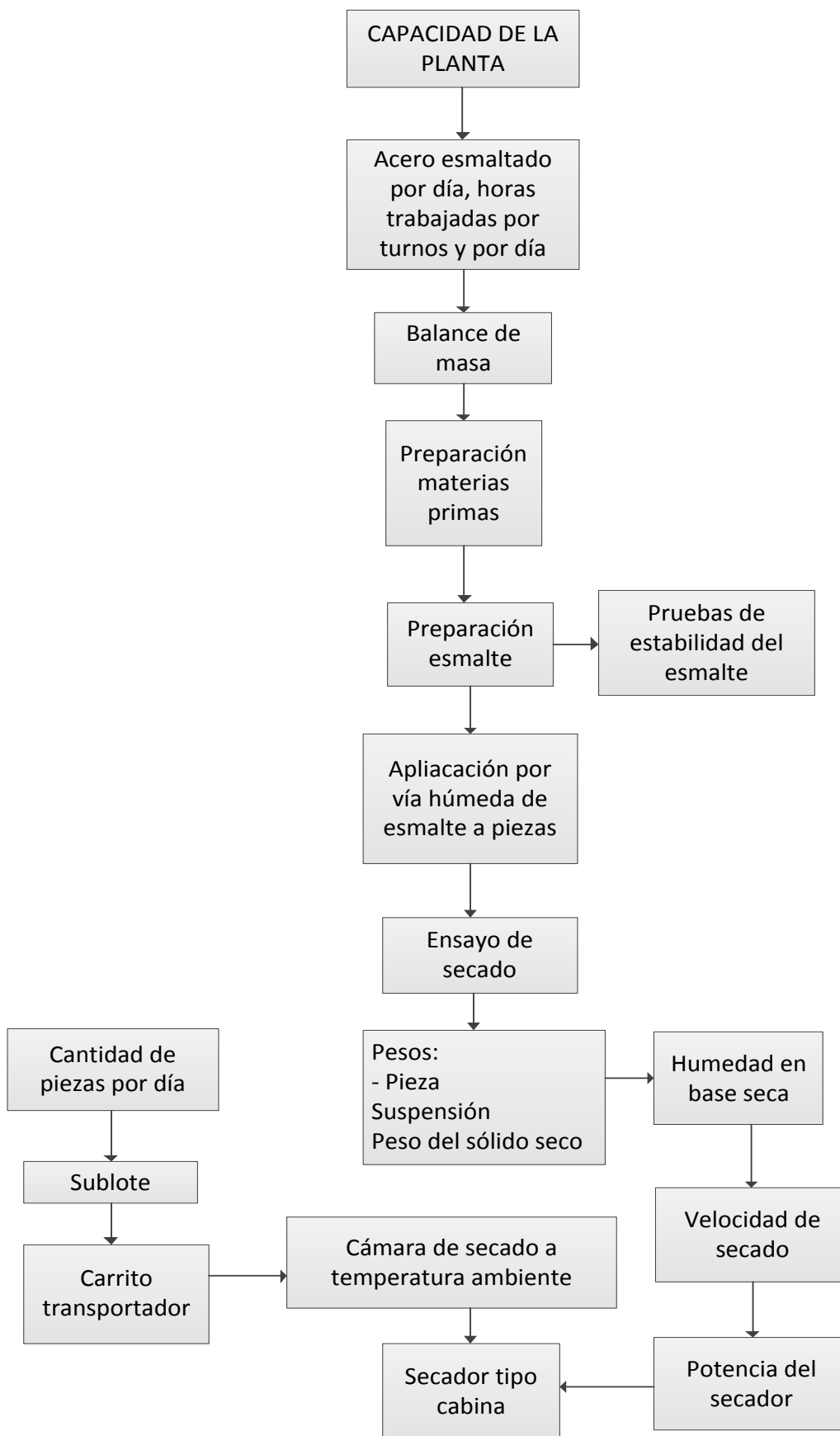
A continuación se muestra los esquemas de la metodología utilizada en el dimensionamiento de cada uno de los equipos que operan en las unidades del proceso de esmaltado.



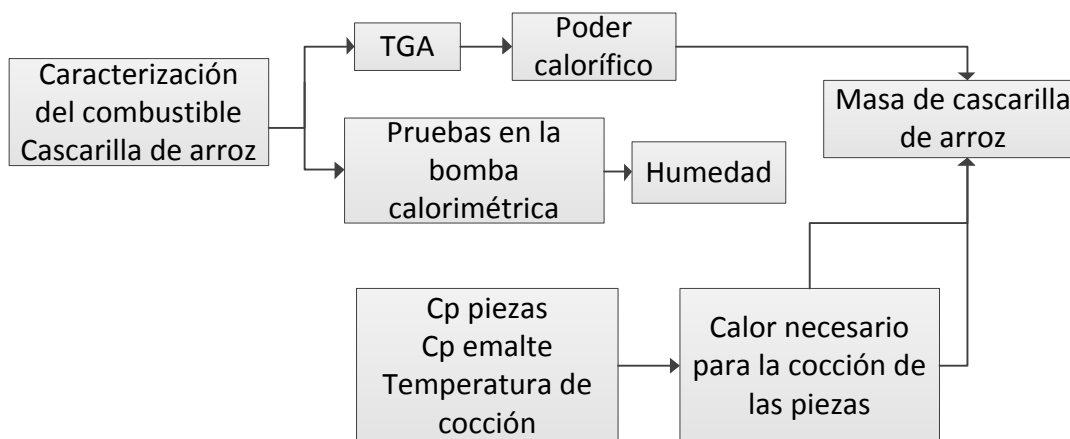
**Figura AVI. 6.** Metodología del dimensionamiento del tanque y agitador



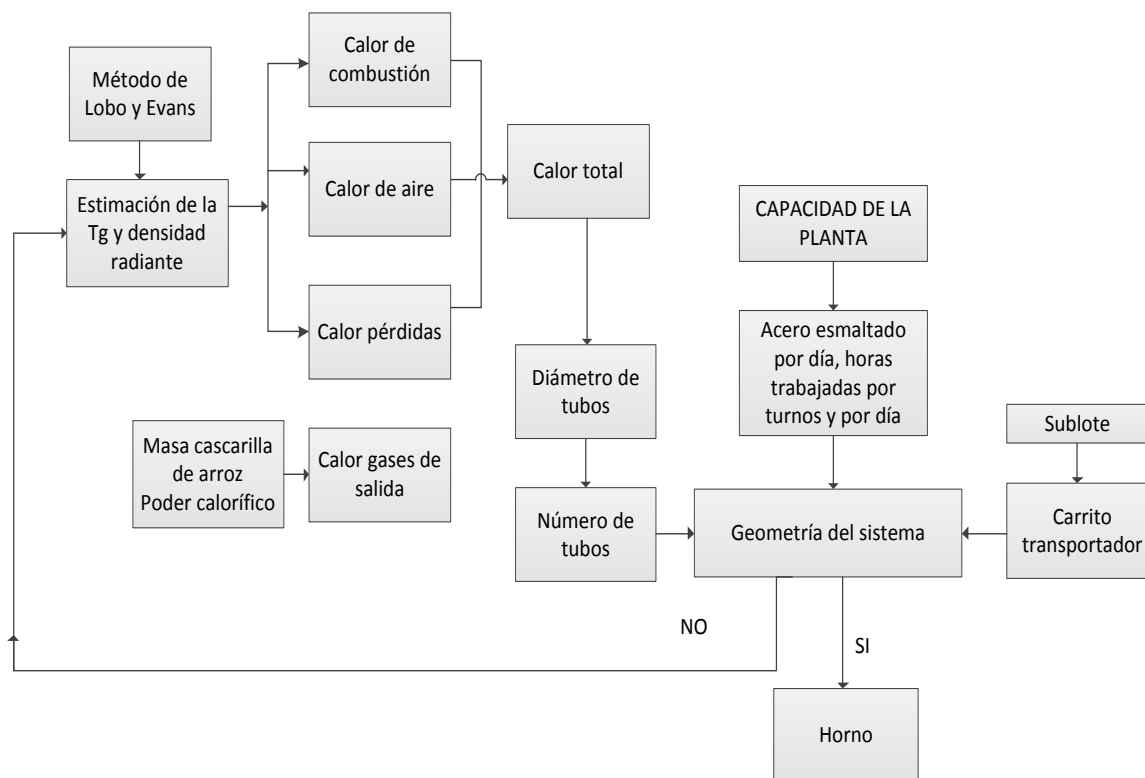
**Figura AVI. 7.** Metodología del dimensionamiento de los equipos utilizados en la aplicación del esmalte



**Figura AVI. 8.** Metodología del diseño del proceso de secado



**Figura AVI. 9.** Metodología de la caracterización de la cascarilla de arroz y obtención de la masa requerida en el proceso de la cocción



**Figura AVI. 10.** Metodología del dimensionamiento del horno tipo caja



## ANEXO VII

### CATÁLOGOS

#### A.VII. 1. AGITADOR

**Parameter of Stainless Steel Agitated Agitator Agitation Leaching Tank**

Specification	Chute inner dimension		Effective cubage (m <sup>3</sup> )	Mixer		Motor		Total weight (kg)
	Diameter (mm)	Depth (mm)		Diameter (mm)	Rotate speed (r/min)	Model	Power (kw)	
XB-750	750	750	0.26	240	530	Y90S-4	1.1	550
XB-1000	1000	1000	0.58	240	530	Y90L-4	1.5	700
XB-1200	1200	1200	1.14	400	320	Y100L <sub>2</sub> -4	3	980
XB-1500	1500	1500	2.2	400	320	Y100L <sub>2</sub> -4	3	1330
XB-2000	2000	2000	5.46	550	230	Y132M <sub>2</sub> -6	5.5	2100
XB-2500	2500	2500	11.2	650	200	Y160L-6	11	3438
XB-3000	3000	3000	19.1	700	210	Y225S-8	18.5	5100
XB-3500	3500	3500	30	850	230	Y225M-8	22	7900

[http://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Agitated-Agitator-Agitation-Leaching\\_1816745691.html?s=p](http://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Agitated-Agitator-Agitation-Leaching_1816745691.html?s=p)

#### A.VII. 2. CABINA DE ESMALTADO

Yantai Clear Electromechanical Equipment Co., Ltd

Name: [Helen Liu](#) Email: [helen@clear88.com](mailto:helen@clear88.com) Skype: [Helen.liu1982](#) Web: [www.clear88.com](http://www.clear88.com)



HX-500 Paint Booth

**Factory Net Price:US\$5800**

Outside Size (mm)	7000x5350x3430 (LXWXH)		
Inside Size (mm)	6900x4000x2800 (LXWXH)		
Wall panel	EPS (epispastics polystyrene)colorful steel skin board,50 mm thick, tongue & groove style compound construction, Aluminum-alloy frame, anti-flame and heat- insulation, galvanized steel roof panel		
Basement	galvanized steel sheet and square steel pipe assembling, grid & embossed plate, three embossed steel ramps		
Air Circulation System	Inlet Fan	Blower capacity:	24,000 m <sup>3</sup> /h
		Power:	4 kw/set
		Quantity:	2 sets
NO Outlet Fan			
Air Volume: 24,000 m <sup>3</sup> /h; Air Speed: 0.35 m/s, Air Recycling times: 280 times/h;			
Purification System	Dual Filtering Structure, The Primary Filter Can Capture Granules Larger than 10 μm. Ceiling Filter Capture Granules Bigger than 4μm. Its filtering ratio reaches 98%. air pressure balance gauge, TSP≤1.4mg/m <sup>3</sup>		
Heating system	Riello Brand G20 diesel burner, 200,000 Kcal/h, SUS304 stainless steel heating exchanger, argon arc welding; max temp:80°C; heating time: 4-6 min (20-60°C), fuel consumption:4-5 kg/vehicle		
Lighting System	ceiling Light: 32 pcs 36W Philips lamp; 800Lux		
Control system	Micro-computer programmed controlling, spray & baking switch, light switch, emergency stop, breakdown alarm		

Environmental System	Multi-layers fiberglass filter, active carbon
-------------------------	---

Tel: 0086-535-3609967 Fax: 0086-535-6394657 Mobile: 0086-15953572490----Helen Liu (Export Manager)

### A.VII. 3. PISTOLA NEUMÁTICA

**Descripción M 22 BASIK:** Pistola robusta, varios usos para trabajos intensivos. Hay 3 tipos de pistolas: gravedad, aspiración y presión.

**Tabla AVIII. 1.** Características técnicas

CARACTERÍSTICAS	M 22 G BasiK (cabezal BA 5)	M 22 A BasiK (cabezal BA 2)	M 22 P BasiK (cabezal BA 3)
Tipo	Pistola gravedad HPA	Pistola aspiración HPA	Pistola presión HPA
Presión máxima de alimentación en aire (red)	6 bar		
Presión de aire a la empuñadura de la Pistola	De 2 a 4 bar		
Caudal de aire (m <sup>3</sup> /h) (a 3 bar)	28	24	30
Presión máxima de alimentación en Producto	Bote gravedad (0,6 l)	Bote aspiración SM 6 (1 l)	6 bar máx.
Peso (g)	690	1000	530
Tasa de transfer (Norma EN 13966-1) (±)	65 % ± 2	62 % ± 2	63 % ± 2
Material en contacto con el producto	Inox	Inox	Inox
Boquilla / Aguja	Inox / Inox tratado		
Bote	poliacetale	aluminio	-
Temperatura máxima del producto	50°C		

(±) : Viscosidad pintura : 20 s CA n° 4 - 20°C / Distancia cabezal de la pistola - objeto de pintar : 20 cm

**Tabla AVIII. 2.** Conexiones en aire y producto

<b>Pistola</b>	<b>Producto</b>	<b>Aire</b>
<b>M 22 G BasiK</b>	Bote gravedad (0,6 litro) de poliacetale (color	
	blanco) para pinturas hidro y disolventadas	Racor pistola : M 1/4 NPS
<b>M 22 A BasiK</b>	Racor pistola : M 3/8 NPS + bote aspiración	(+ racor MM 1/4 BSP no
	SM6 (1 litro, aluminio)	montado)
	Racor pistola : M 3/8 NPS	⇒ Tubería aire (calidad
<b>M 22 P BasiK</b>		antiestática)
	⇒ Tubería producto : Ø 7 mm int. mínimo	Ø 7 mm int. <b>mínimo</b> (para una
	(para una longitud de 7,5m),	longitud de 7,5 m)

<http://notices.kremlinrexson-sames.com/dev/notices/575.009.190-d/fold/Notices/578.005.120-SP.pdf>

## A.VII. 4. COMPRESOR

**DENAIR** Shanghai Denair Compressor Co.,LTD

Model		DA-220GA			
Air delivery	m3/min	37.0	34.5	31.5	28.5
Working pressure	Bar	7	8	10	13
Motor power	KW	220			
	HP	300			
Noise	dB(A)	75±2, measured according to the international GB/T4980-2003 standard			
Outlet Diameter	mm	G2"			
Cooling method		Air cooled			
Driven method		Direct driven			
Cooling air flow	m <sup>3</sup> /h	900			
Oil content of discharged air		<3 ppm			
Electric motor (under conditions of air suction)	Temperature	℃	Ambient temperature + 15 ℃		
	Pressure	Mpa	0.1033		
	Rotation speed	rpm	2980		
	Starting method		Star Delta starting		
	Protection class		IP54		
	Insulation class		F class		
	Electricity		220V/60HZ/3PHASE		
Dimension(mm)	L*W*H	3330*1850*1935mm			
Weight	KG	4250			

## A.VII. 5. DEPÓSITO DE AIRE

**A**EOMACHINE **GUANGZHOU AEMACHINE EQUIPMENT CO.,LTD**



ATTN: ing.Mao E-MAIL/MSN: sales02@aemachina.com

TEL: +86 - 20 - 3802 3807 MOBILE: +86 - 13025071004

FAX: +86 - 20 - 3802 3807 SKYPE: aemachinasales02

WEBSITE: www.aemachina.com / www.aemachina.cn

ADDRESS: Room 170#45 No.2 Yuan Cun West Street, Tian He District, Guangzhou, China.


### QUOTATION

ATTN: Andrea Vaca

DATE: 24th Dec 2014

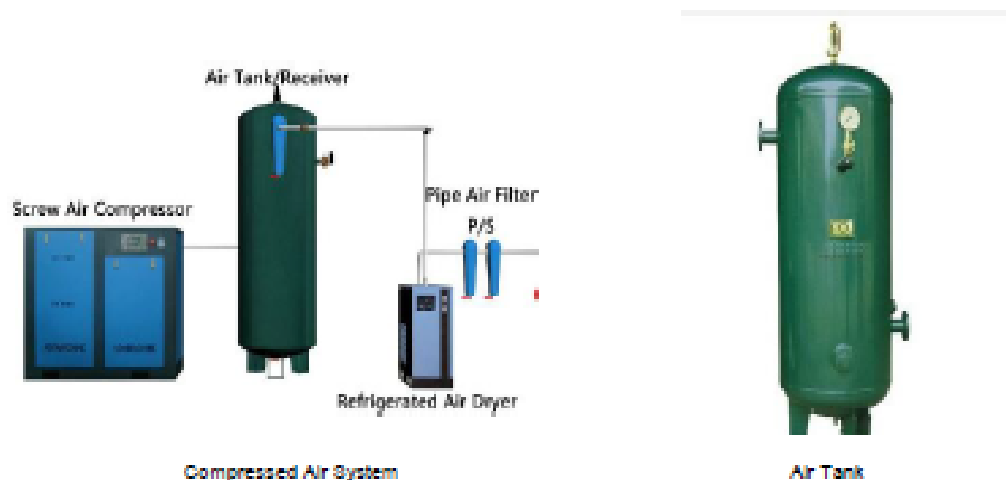
The undersigned Seller and Buyer have agreed to conclude the following transactions according to the terms and conditions stipulated below:

#### A) DESCRIPTION OF GOODS:

ITEM	DRAWING & SPECIFICATION	QTY	FOB PRICE	SUB-TOTAL
Vertical Air Receiver / Air tank (HS code: 7311 0090 00)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model: AEO-AT2.0-8</li> <li>- Volume: 2.0 m3 (2,000 Liters) /8 bar</li> <li>- Design pressure: 8 bar (116 psi)</li> <li>- Design temperature: 100 °C</li> <li>- Dimension (DiameterxH):1,000x2,820 mm (39.4x111.0Inch)</li> <li>- Weight: 425 kg (937 lb)</li> </ul>	1	US\$1,322	US\$1,322
<b>TOTAL AMOUNT</b>				<b>US\$1,322</b>
SAY TOTAL AMOUNT USD THIRTEEN HUNDRED TWENTY TWO ONLY.				

#### B) PAYMENT TERMS & CONDITIONS:

1. Price: FOB Guangzhou.
2. Lead time: Within 1 days after receipt of amount.
3. Package: Standard export package, plywood case.
4. Payment terms: 100% T/T in advance.
5. Valid period: this quotation is valid in 30days.



# **DENAIR** SHANGHAI DENAIR COMPRESSOR CO., LTD (DNR)

Building 5, Baosheng International Fortune Center, No.18, Baosheng Road, Songjiang District Shanghai China

Website:<http://www.denairgroup.net> Email:[allen@denaircompressor.net](mailto:allen@denaircompressor.net) Tel:86 021 3783 1829 Fax: 86 021 60405929

To:  
Attn.: Mr.Andrea

From: DENAIR Overseas Business Division  
Contact: Allen  
Quotation No: DNR14122401 Date:Dec 24<sup>th</sup>  
2014

## 220KW direct driven double screw air compressor

ITEM	DESCRIPTION OF GOODS	MODEL	QTY	MANUFACTORY	UNIT PRICE (USD)	TOTAL PRICE (USD) FOB Shanghai
1	<p>Belt driven double screw air compressor</p> <p>Air delivery(m3/min): 37.0, 34.5, 31.5, 28.5</p> <p>working pressure(BAR):7                    8            10            13</p> <p>Motor power: 220KW</p> <p>Power supply: 220V/3ph/60Hz</p> <p>Type of cooling: Air cooled</p> <p>Exhaust temperature:ambient temperature+15℃</p> <p>Oil content of discharged air:&lt;3ppm</p> <p>Cool air volume: 900m3/h</p> <p>Out pipe diameter:G2"</p> <p>Dimension:3330*1850*1935mm</p>	DA-220A/W	1UNIT	DENAIR	33800.00	33800.00
2	Spare parts for DA-220A/W in one year					

# **DENAIR** SHANGHAI DENAIR COMPRESSOR CO., LTD (DNR)

Building 5, Baosheng International Fortune Center, No.18,  
Baosheng Road, Songjiang District Shanghai China

Website:<http://www.denairgroup.net> Email:[allen@denaircompressor.net](mailto:allen@denaircompressor.net) Tel:86 021 3783 1829 Fax: 86 021 60405929

	Air filter element	LB588835220	3pcs	DENAIR	110.00	330.00
	Oil filter element	LB588865220	3pcs		65.00	195.00
	Oil gas separator element	LB588895220	2pcs		500.00	1000.00
<b>Total:</b>	<b>US dollars thirty-five thousand three hundred and twenty-five only</b>					<b>3532.50</b>

#### Remarks:

1. Trade term: FOB Shanghai
2. Delivery time: within 30 days after receiving the prepayment.
3. Payment method: 30% T/T in advance, 70% before delivery.
4. Guarantee period: one year for the whole machine (Except maintenance consumables).
5. HS Code: 8414809090
6. Packing type: seaworthy packing.
7. Packing data: DA-220A/W Gross weight of goods: 4250KG volume of goods: 12.5 CBM, all goods can be loaded by LCL
8. Voyage period: From Shanghai to Guayaquil shipping time about 20 days.
9. Certification: CE, ISO9001.
10. Quotation valid: for 30 days.
11. Sincerely invite you to visit DENAIR factory in Shanghai, China.



## A.VII. 6. CATÁLOGO SECADOR

### Especificaciones técnicas de CT-C Horno de secado de aire circulante

Modelo	CT-C-O	CT-C-IA	CT-C-I	CT-C-II	CT-C-IIA	CT-C-III	CT-C-IIIA	CT-C-IV
Peso seco por lote (kg/lote)	30	60	120	240	240	360	360	480
Área de evaporación (m <sup>2</sup> )	4.7	7.1	14.1	28.3	28.3	42.4	42.4	56.5
Área de radiador(m <sup>2</sup> )	8	15	24	48	48	72	72	96
Consumo de vapor(kg/h)	7	15	20	40	40	60	60	80
Potencia de calefacción eléctrica(kw)	6-9	6-9	15	30	30	45	45	60
Flujo de ventilador (m <sup>3</sup> /h)	3450	3450	3450	6900	6900	10350	10350	13800
Potencia de ventilador(kw)	0.45	0.45	0.45	0.45×2	0.45×2	0.45×3	0.45×3	0.45×4
Tolerancia de temperatura dentro de horno(°C )	±1	±1	±2	±2	±2	±2	±2	±2
Dimensiones exteriores(m m) (A×L×H)	1400 ×1200 ×2000	1400 ×1200 ×2000	2300 ×1200 ×2000	2300 ×2200 ×2000	4280 ×1200 ×2270	2260 ×3200 ×2000	3240 ×2200 ×2000	4280 ×2200 ×2270
Carrito auxiliar de secado (set)	0	1	2	4	4	6	6	8
Bandeja auxiliar de (piezas)	16	24	48	96	96	144	144	192
Peso total (kg)	500	820	1580	1800	1880	2100	2210	2800

<http://www.chinadrier.es/pdf/1-drying-oven-1.pdf>

## A.VII. 7. HORNO



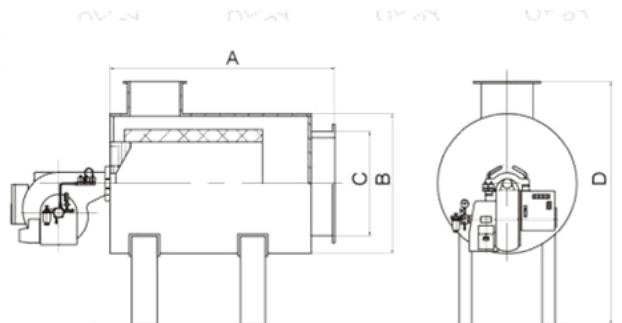
**Qingdao Olympia Heat Energy Equipment Co., Ltd.**

### Fuel oil and gas air furnace (CFY series)

#### Character:

1. Power saving. The furnace contains several groups of fans, air supplying system start by groups.
2. Burner efficiency. Single-shot short flame, burn completely.
3. Reasonable control. Adopt PLC control type.
4. Balanced wind system. When the combustion zone oxygen deficiency, the furnace can supply air by balanced wind valves, to ensure burn completely.

#### Technology Parameters:



Model	Power(kw)	A (mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)
CFY-1.5	174	909	550	360	13500
CFY-3	369	1009	620	510	1350
CFY-5	581	1109	700	565	1450
CFY-7	814	1269	820	650	1550
CFY-10	1163	1409	960	760	1700
CFY-15	1744	1859	1150	860	2000
CFY-20	2326	2500	1500	1140	2220
CFY-25	2907	2800	1660	1270	2400
CFY-30	3488	3000	1800	1390	2530
CFY-35	4070	3500	1940	1510	2770