



Diseño, desarrollo y simulación numérica de la progresión de formación y rodillos de la tubería circular 5/8” calibre 16, basada en principios de roll-forming y FEM.

Pablo González Díaz

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor interno

Jhon Fredy Hincapié Montoya, Magíster (MSc) en ingeniería

Asesor de la empresa AAMetals S.A.S

Juner Leandro Carvajal Usme, Especialista (Esp) en preparación y evaluación de proyectos, Ingeniero mecánico.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	(González Díaz, 2021)
Referencia	González Díaz, (2021). <i>Diseño, desarrollo y simulación numérica de la progresión de formación y rodillos de la tubería circular 5/8" calibre 16, basada en principios de rollforming y FEM.</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de documentación ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Caspesdes.

Decano: Jeus Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema	12
2 Justificación.....	12
3 Objetivos	13
4 Marco teórico	14
4.1 Rodillos de deformación o Herramental:	15
4.1.1 Diseño de los rodillos.....	17
4.1.2 Progresión de formación o Flor de formación:	19
4.1.3 Estándares de diseño	21
4.2 Problemas que pueden surgir por mal diseño de los rodillos:	23
4.3 Materia prima	26
4.4 Método de elementos finitos (FEM)	27
4.4.1 La metodología de análisis por FEM	27
4.4.2 Discretización del sistema:	29
4.4.3 Análisis no lineales	31
4.4.3.1 Contacto entre elementos en análisis no lineales.	32
4.4.3.2 Método para cálculo de contacto entre piezas.....	32
5 Metodología	34
5.1 Diseño de rodillos.....	34
5.2 Metodología FEM.....	37
5.2.1 Simplificaciones del modelo CAD	37
5.2.2 Materiales y sus interacciones	38
5.2.3 Mallado	39

5.2.4 Configuración de movimientos.....	40
6 Resultados	42
6.1 Diseño de rodillos.....	42
6.2 Análisis de elementos finitos.....	42
6.2.1 Calidad de malla	42
6.2.2 Esfuerzos en el proceso de formación.	44
6.2.3 Medida del tubo	48
6.2.4 Independencia de malla.....	48
7 Discusión y recomendaciones	50
8 Conclusiones	52
Referencias	53
Anexos.....	54

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades del acero usado en los rodillos. Acero Böhler W302 – AISI H 13.....	17
Tabla 2. Propiedades del acero usado de materia prima. Acero Cold Roll Grade 30.	26
Tabla 3. Rangos aceptados para los parámetros de calidad de malla.	31
Tabla 4. Diámetro de formación (a) y su verificación.	35
Tabla 5. Distancia entre ejes de rodillos.....	42
Tabla 6. Evaluación de parámetros de calidad para la malla.	44
Tabla 7. Esfuerzos en el tubo a través del tiempo.	45
Tabla 8. Comparación de esfuerzos de von-mises para los dos casos de velocidades.	47
Tabla 9. Independencia de malla.	49

Lista de figuras

Figura 1. Sistema de Formadora de Tubos, ampliando Forming y Sizing. (Interno, 2021).....	15
Figura 2. Paso vertical o de tracción de la Formadora de tubos (Moreno, 2005).	16
Figura 3. Paso lateral y paso de tracción de la formadora de tubos.	16
Figura 4. Deformación del fleje (Halmos, 2005).	18
Figura 5. Flor de formación (Interno, 2021)	19
Figura 6. Progresión correcta de la flor de formación (Cheng, 2020).	20
Figura 7. Progresión incorrecta de la flor de formación (Cheng, 2020).	21
Figura 8. Diseño de rodillos.	23
Figura 9. Solapamiento del tubo.	24
Figura 10 Rodillo con desgaste y grano.	24
Figura 11. Rayas en tubería.	25
Figura 12. Problema de soldadura en el tubo.	25
Figura 13. Ancho de fleje.	26
Figura 14. Flujo de análisis por FEM (Kim, 2018).	28
Figura 15. Proceso de trabajo por FEM (Ramírez, 2018).	29
Figura 16. Discretización del sistema.	30
Figura 17. Contacto de penalización.	33
Figura 18. Método de multiplicadores de Lagrange.	33
Figura 19. Pasos del Sizing para perfil circular 5/8”	34
Figura 20 Flor de formación de la zona sizing.	35
Figura 21. Modelado de rodillos laterales y de tracción.	36
Figura 22. Sistema sizing modelado en Ansys.	37

Figura 23. Simplificaciones de los rodillos.....	38
Figura 24. Configuración de contacto entre el rodillo y el tubo.	39
Figura 25. Discretización del sistema a estudiar.	40
Figura 26. Valores del Jacobian Ratio para la malla (Tabla generada por el software Ansys).....	43
Figura 27. Valores de Orthogonal Quality para la malla (Tabla generada por el software Ansys).	43
Figura 28. Valores de Aspect Ratio para la malla (Tabla generada por el software Ansys).....	44
Figura 29. Esfuerzo máximo en el tubo. Paso 18.....	46
Figura 30. Alineación de ejes para torres de tracción, paso 18.	51

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Esp.	Especialista
FEM	Análisis de elementos finitos (Finite element análisis)
MSc	Magister Scientiae
MPa	Mega pascales
PhD	Philosophiae Doctor
Pulg	Pulgadas
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

En este informe de prácticas académica, se desarrolla el análisis por medio de elementos finitos de los rodillos para la sección de “sizing” de una maquina formadora de tubos (Se le nombra “sizing” a la sección de la maquina donde se da lugar a la forma última del tubo, en esta parte se deforma el tubo madre formado en la sección del “forming”), con el fin de mejorar el proceso de fabricación y cumplir con los estándares de calidad requeridos para la referencia de tubo circulas de 5/8”.

En el software CAD Inventor se modelaron y parametrizaron los rodillos utilizados actualmente en la empresa AAMetals S.A.S para la referencia de tubo circular 5/8” calibre 16, con el propósito de establecer su progresión geométrica y desarrollar la flor de formación de la sección del sizing. Además, se presenta a la empresa los planos de los rodillos para los pasos del 15 al 20 pertenecientes a la maquina formadora de tubos y que son los responsables de dar la forma final al tubo. Se encontró que los rodillos para la referencia deseada están dentro de los parámetros de diseño y cuenta con los estándares para el desarrollo de la referencia, cumpliendo con los porcentajes de deformación para cada paso.

Se evidenció por medio del análisis de elementos finitos la efectividad del diseño de los rodillos presentando valores de esfuerzos cercanos a los necesarios para una adecuada deformación, concluyendo que los picos más altos de esfuerzos se presentan cuando se van a tocar por primera vez el tubo y los rodillos. En síntesis, los rodillos aplican la energía necesaria para deformar el tubo y su diseño permite dejar la referencia de tubo con las medidas exigidas por los estándares de calidad.

Se plantearon recomendaciones para aumentar la eficiencia de producción y mejorar el estado de algunas partes de la sección “sizing”, que afectan significativamente la calidad del producto final. Entre esas se encuentran; generar una guía de montaje y desmontaje de herramental con las medidas estándares de calibración para la referencia circular 5/8”.

Palabras claves: Formado de tubos, Elementos finitos, Diseño de rodillos, Simulaciones numéricas.

Introducción

La empresa AAMetals S.A.S es una empresa metalmeccánica y manufacturera que fabrica tubos de acero laminado en frio, y distribuye láminas de acero, láminas de galvanizado, láminas de aluminio y láminas de galvalum. También distribuye rollos con anchos variables de hasta ocho toneladas de masa, llamados flejes, dependiendo de la necesidad y uso de los clientes. Entre sus productos, AAMetals S.A.S ofrece un catálogo variado de tubos, con diferentes perfiles; circulares, ovalados, cuadrados y rectangulares, de varios diámetros y con diferentes calibres (espesor de lámina), todos hechos en acero laminado en frio.

La manufactura de tubería es realizada por su máquina principal llamada Abbey Etna. Donde los flejes son la materia prima que alimenta la formadora de tubos. Para realizar la progresión de formación de los tubos la maquina cuenta con veinticuatro pasos, en los cuales se va deformando el fleje hasta llegar al perfil deseado. Esto es posible gracias a la matricería de la máquina, compuesta por rodillos formadores. Los rodillos están diseñados para que la deformación sea progresiva y el fleje vaya adquiriendo la forma interior de los rodillos. Este proceso se describirá en la sección del marco teórico.

La máquina Abbey Etna no cuenta con una automatización avanzada y es reducida su documentación sobre el sistema eléctrico y de control. También existe poca información sobre el proceso de conformado, desarrollo de la progresión de formación y diseño de rodillos. Haciendo necesario la contratación de terceros para realizar el diseño del sistema de rodillos y mejoras del sistema de formado.

Uno de los principales propósitos que tiene AAMetals S.A.S es alcanzar altos estándares de calidad para lograr certificación de fabricación para el sector de autopartes. Posicionándose como una de las empresas líderes en fabricación de tubería mecánica y aumentar el número de clientes potenciales. Por esta razón, en este trabajo, se revisará y se expondrán los estándares técnicos necesarios para la adecuada fabricación de tubería, obteniendo un marco teórico con el cual será posible crear la progresión de formación y diseñar los rodillos.

Adicionalmente, se realizarán simulaciones numéricas por elementos finitos del proceso de conformado en el software Ansys, con el fin de analizar el comportamiento de deformación que presentado en el fleje en cada uno de sus pasos; siendo esta la forma más adecuada y moderna de observar a profundidad el fenómeno de deformación plástica de metales sin la necesidad de invertir

en materiales y pruebas de destrucción con grandes montajes físicos que requieren de una mayor inversión económica y tiempo. Se presenta las simplificaciones en cuanto a diseño y simulación del proceso de formado de tubos basada en las necesidades y problemas que tiene la empresa AAMetals S.A.S. Se revisarán los resultados con el fin de proponer recomendaciones al proceso de conformado para el correcto formado de la tubería de 5/8" calibre 16. Alcanzando en lo posible una mayor eficiencia y estándares de calidad exigidos por el sector autopartes.

En cuanto a las limitaciones que se presentan en el proyecto se encuentra la baja capacidad de cómputo para hacer las simulaciones numéricas, afectando el tiempo de trabajo y número de simulaciones a realizar. Por esta razón se analizará a fondo solo las zonas y rodillos que están afectando la calidad del producto terminado. También se resalta, el proceso de formado de tubo cuenta con soldadura a alta frecuencia en sus lados laterales, pero, para este informe el proceso de soldadura no se estudiará ya que se sale de los alcances del proyecto.

1 Planteamiento del problema

La formadora de tubos Abbey Etna propiedad de la empresa AAMetals S.A.S es la maquina principal para la creación de sus productos. La empresa debe cumplir unos estándares de calidad en cuanto al diseño, medidas y características físicas del producto final, en este caso los tubos fabricados en cold roll y con diferentes formas dependiendo de la necesidad del cliente, entre las cuales hay circulares, cuadrados, rectangulares y ovalados. Además, la empresa proyecta certificarse con la norma internacional ISO/TS 16949 para proveedor de piezas autopartistas y por tal motivo buscan mejorar su proceso para que el producto terminado obtenga siempre características adecuadas, ya que en este momento se tienen problemas de fabricación que conllevan a paros de producción y no alcanzar los estándares de calidad del producto final. Por tal motivo se busca encontrar el problema más ocurrente en el formado de tubo enfocándonos en los rodillos de la sección de “sizing”, para hacer un análisis buscando una solución que aumente la confiabilidad en la calidad de los tubos.

2 Justificación

Los paros no planeados en la producción son muy comunes en la industria manufacturera, incurrir en perdida de material y tiempos muerto de máquinas y personal. En AAMetals S.A.S se busca reducir estos paros por mala calidad en la producción de tubos, por esta razón se analizará el proceso de formado de tubos con rodillos, con el fin de disminuir los tiempos muertos, mejorar la calidad del producto y aportar conocimiento en el formado de tubos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar, desarrollar y simular numéricamente por elementos finitos la formación de tubería mecánica circular 5/8" calibre 16, basada en principios de roll forming, proponiendo mejoras al proceso de manufactura ya implementado en la empresa AAMetals S.A.S. con base en el análisis de resultados obtenido para la formadora de tubos Abbey Etna.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar los estándares técnicos utilizados en el diseño de rodillos (matricería), necesarios para la progresión de formación, los cuales son utilizadas en la fabricación de tubería mecánica, basándose en bibliografía y estado de arte.
- Establecer la progresión de formación para el desarrollo de la tubería circular 5/8" calibre 16 en acero laminado en frío.
- Desarrollar el diseño de los rodillos de formación de la tubería circular 5/8" calibre 16, en el software Autodesk Inventor.
- Realizar la simulación en el software Ansys de la formación de la tubería redondea 5/8", mostrando todo el desarrollo de la lámina en cada paso a analizar.
- Analizar resultados obtenidos por elementos finitos y proponer cambios necesarios en la formadora de tubos de la empresa AAMetals S.A.S para el correcto formado de la tubería de 5/8" calibre 16. Alcanzando en lo posible una mayor eficiencia y estándares de calidad exigidos por el sector autopartes.

4 Marco teórico

AAMetals S.A.S. es una empresa manufacturera de metales, cuenta con tres procesos principales para la fabricación de sus productos. El primer proceso llamado “Corte longitudinal”, está compuesto por una maquina conocida como “Slitter” o máquina de corte longitudinal. Su función es procesar las bobinas de metal dejando como producto final un rollo de metal con el ancho requerido, llamado fleje. Estos flejes son comercializados localmente y también son la materia prima para la manufactura de tubería. El segundo proceso llamado “Corte transversal”, está compuesto por una maquina conocida como “CTL” o laminadora. Su función es cortar transversalmente las bobinas y flejes dejando como producto final una lámina o chapa a un largo deseadas.

Por último, el tercer proceso llamado “Formado de tubos”, está compuesto por una formadora de tubos Abbey Etna. Su función es la fabricación de tubos utilizando una técnica continua de laminación y deformación del metal, que involucra una serie de esfuerzos en secuencia y repetidos aplicados a la lámina para que se logre una deformación plástica hasta conseguir un perfil deseado (Cheng, 2020).

La formadora de tubos está compuesta por varios procesos, siendo cada uno de estos indispensable para el adecuado funcionamiento del sistema y la correcta fabricación de tubos. El proceso empieza con el “Uncoiler”, que es el encargado de portar y desenrollar los flejes que entraran a producción. Seguido por un soldador de colas, que tiene el deber de soldar el final de un fleje con el inicio de otro. Luego se presenta el “Looper” o acumulador, el cual, acumula material dándole tiempo al soldador de unir los flejes y así asegurar el continuo trabajo de la máquina. La lámina o fleje pasa luego por el proceso de “Forming”, donde se inicia la deformación plástica. En este proceso el fleje atraviesa por 14 pasos, nombrados del “P1” al “P14”, estos generan la deformación inicial del tubo hasta dejarlo en la forma denominada “tubo madre”. Luego pasa a una sección de enfriamiento, compuesta por una piscina con refrigerante para bajar la temperatura del tubo debido a la deformación y la soldadura. Al salir del sistema de enfriamiento entra al proceso de “sizing”, compuesto por 10 pasos, nombrados del “P15” al “P24”. Estos se encargan de dar la forma del perfil final al producto, ya sea circular, ovalada, cuadrada o rectangular. Al salir, pasan por la Cut-off, donde se corta a la medida requerida. Por último, los tubos se embalan en la Zona de empaque (ver *Figura 1*)

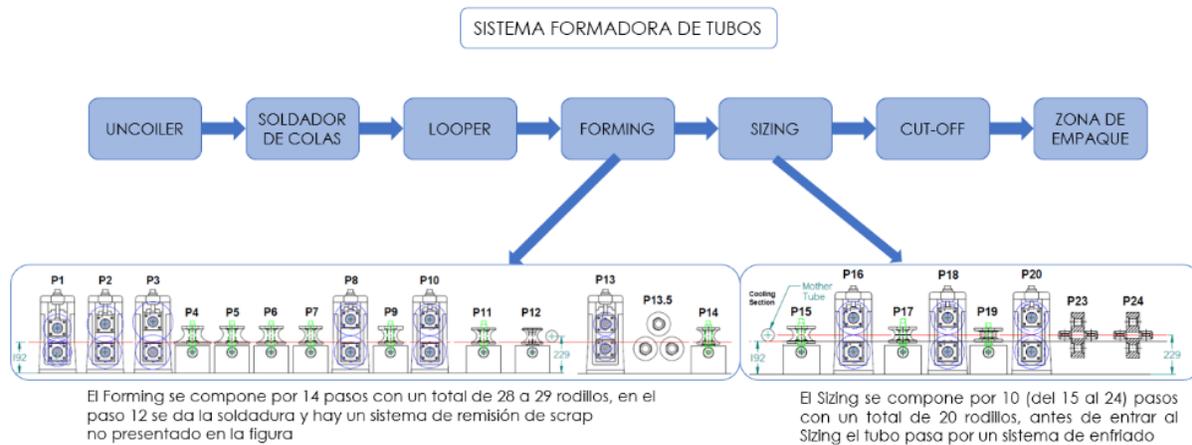


Figura 1. Sistema de Formadora de Tubos, ampliando Forming y Sizing. (Interno, 2021)

4.1 Rodillos de deformación o Herramental:

Los procesos de forming y “sizing”, están compuestas por 14 y 10 pasos respectivamente. Los cuales tienen la tarea de deformar progresivamente el fleje hasta que se obtenga la forma del producto final. Cada paso está compuesto por dos torres integradas con un par de ejes en los cuales se apoyan los rodillos. Los rodillos son parte fundamental del proceso ya que aplican la fuerza necesaria al fleje para deformar plásticamente y obtener la forma del perfil.

Se tiene dos disposiciones para los ejes y rodillos. En la primera disposición se presentan las torres de forma vertical, soporta dos ejes en los que van los rodillos, los cual generan la tracción que arrastra el fleje. Una de estas dos torres verticales va conectada por medio de caja de engranajes a un sistema motor que le brinda la energía necesaria para mover el fleje y deformarlo mientras avanza (ver Figura 2).

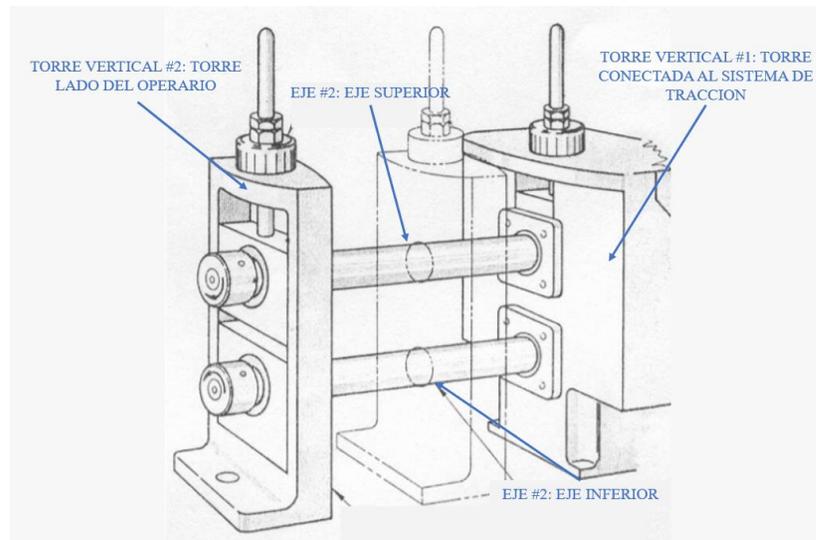


Figura 2. Paso vertical o de tracción de la Formadora de tubos (Moreno, 2005).

La segunda disposición cuenta con una sola torre apoyada horizontalmente en la estructura de la máquina, con dos ejes y par de rodillos a los laterales que se encargan de mantener el tubo alineado y evitan que se genere un cambio geométrico a la pieza llamado “springback” (ver Figura 3) (Moreno, 2005).

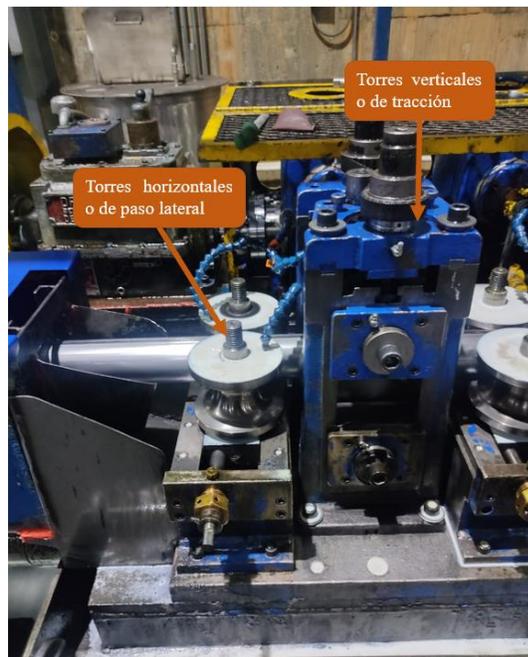


Figura 3. Paso lateral y paso de tracción de la formadora de tubos.

El springback es una distorsión geométrica que se evidencia después de que se le deja de aplicar la fuerza a la pieza. La cantidad del springback depende de las propiedades del material, como son el punto de fluencia y módulo de elasticidad. Dependiendo del material a procesar se diseñan los rodillos con un sobre formado, generando una mayor deformación a la calcula pieza, esto debido a que el springback permitirá llegar a la medida deseada. Sin embargo, para cold roll no se usa este método, por el contrario, se diseñan los rodillos laterales para evitar que el springback cambie la medida de formación luego de los pasos de tracción.

Las propiedades mecánicas del material de los rodillos deben ser necesariamente superiores al del material a deformar, con capacidad de resistir altas temperaturas y con la dureza necesaria para que la vida útil de estos sea alta y no se genere sobre costos por mantenimiento de rodillos o sea necesario reemplazarlos muy a menudo. El material más común mente usado en los rodillos es el acero AISI H 13 o D2 con un tratamiento térmico que aumenta su dureza entre 53 y 60 HRC (Interno, 2021). Este material es común mente usado en herramientas de altos esfuerzos y de trabajo continuo. En la siguiente tabla se dejan las características del material utilizado en este informe.

Tabla 1. *Propiedades del acero usado en los rodillos. Acero Böhler W302 – AISI H 13*

PROPIEDADES	VALOR
Densidad	7.60 g/cc
Resistencia a la tracción, Ultima.	1100-1380 MPa
Resistencia a la fluencia	1000-1380 Mpa
Módulo de elasticidad	176 Gpa

* Tabla del material se obtiene de la página Matweb, especializada en materiales de ingeniería.

4.1.1 Diseño de los rodillos

La información sobre diseño y fabricación de los rodillos utilizados en estos procesos cada empresa la maneja de manera reservada y no hay reglas de diseños guiadas por una norma. Sin embargo, la empresa ha recopilado información importante sobre estándares de diseño para rodillos de formación en los que se puede basar para desarrollar los rodillos (Moreno, 2005) (Halmos, 2005). Además, se tenía información en la empresa sobre el diseño de sus rodillos para el perfil 73x38mm y 3x1 ½ pulg rectangular, realizados por la empresa LOYAL Colombia, que fue de

mucha ayuda en cuanto a bases de diseño. Esta información es reservada por parte de la empresa y no hace parte del informe presentado.

Durante la formación de la tubería, el fleje se forma gradualmente hasta llegar al perfil deseado. El desarrollo del perfil se basa en la deformación teórica que puede tener la lámina al pasar por la máquina. Se deforma el fleje de un punto “A” a un punto “B” con una distancia de separación “L”. El borde del fleje viaja en un patrón helicoidal en la misma separación deformándose hacia arriba (Ver Figura 4). La longitud de esta curva “s” es calculada según: (Halmos, 2005)

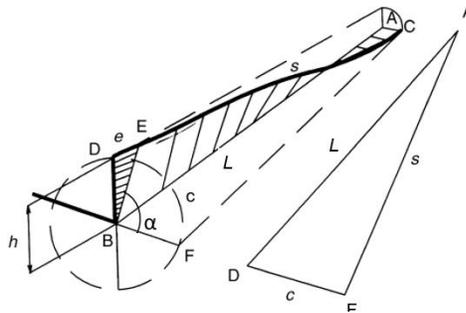


Figura 4. Deformación del fleje (Halmos, 2005).

$$s = \sqrt{L^2 + c^2} \quad \text{Ec 1}$$

Donde “c” es la longitud del arco entre el punto “F” y “D”, siendo “h” la distancia ente “B” y D”. Obtenida a partir de:

$$c = \alpha \text{ (rad)} * h \quad \text{Ec 2}$$

Al reemplazar la Ec 2 en Ec 1 se tiene:

$$s = \sqrt{L^2 + (\alpha \text{ (rad)} * h)^2} \quad \text{Ec 3}$$

El porcentaje de elongación o deformación de la lámina se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$e = \frac{s-L}{L} 100\% \quad \text{Ec 4}$$

La relación de “h” con “s” es muy importante ya que por cada unidad que aumente “h”, “s” aumentara aproximadamente el doble (Halmos, 2005). De la misma manera si se reduce a la mitad la separación entre el punto “A” y “B”, nombrada como “L”, la deformación o alargamiento aumentara cuatro veces, influyendo de manera relevante el buen comportamiento de los rodillos y la pieza ya que a grandes deformaciones mayores serán los esfuerzos que se aplican al tubo.

Se sugieren elongaciones máximas para cada uno de los procesos. En el caso del proceso de forming el valor máximo sugerido es $e = 0.15$ y para el proceso de “sizing” el valor máximo es $e = 0.08$ (Halmos, 2005).

4.1.2 Progresión de formación o Flor de formación:

Los rodillos son la herramienta que se usa para la formación del tubo en la forma del perfil del producto. Sin embargo, para el diseño de estos se deben tener varios factores en cuenta, como son: el número de pasos que tiene la maquina formadora, el calibre de los flejes, el diseño de la progresión de formación o “flor de formación” y el material tanto de la tubería como de los rodillos (Santa, 2008). La flor de formación es el nombre que se le atribuye al desarrollo progresivo que se da al material por cada fase que conforma la máquina, este describe el cambio en la forma de la lámina por cada paso de la máquina formadora de tubos. (ver Figura 5).

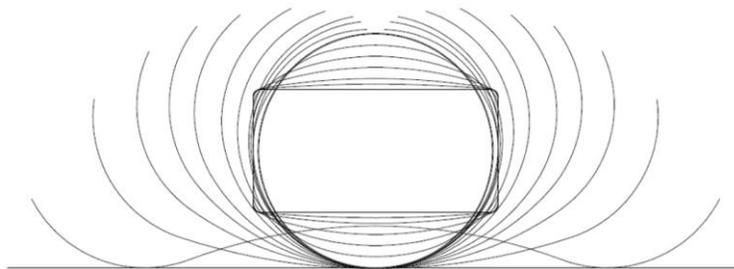


Figura 5. Flor de formación (Interno, 2021)

El desarrollo de la flor se genera según el número de pasos que tenga la formadora de tubo, para el caso de la formadora Abbey Etna de la empresa AAMetals S.A.S, ya está configurada para tener un máximo de 24 pasos, así que la flor de formación tendrá un total 24 secciones. Esta flor empieza con el fleje de forma plana y termina con la forma del perfil del producto deseado ya sea circular, cuadrada, rectangular o cualquier otra figura. Las principales consideraciones en el desarrollo de la flor son: las propiedades del material a deformar, el número de pasos con los que está configurada la maquina y la dificultad del perfil a realizar, siendo los rectangulares y cuadrados

más difíciles de realizar por las aristas y las altas deformaciones en la sección del “sizing” ya que debe pasar del tubo madre circular a un perfil cuadrado o rectangular (Moreno, 2005).

La cantidad de trabajo, o formación realizada de cada paso a paso debe ser pareja y progresiva. Además, los ejes y rodillos de cada paso deben estar espaciados en forma pareja y simétrica. La Figura 6 ilustra la correcta formación de la lámina de acero de bajo en carbono utilizando un diseño estándar de forma de borde (Moreno, 2005).

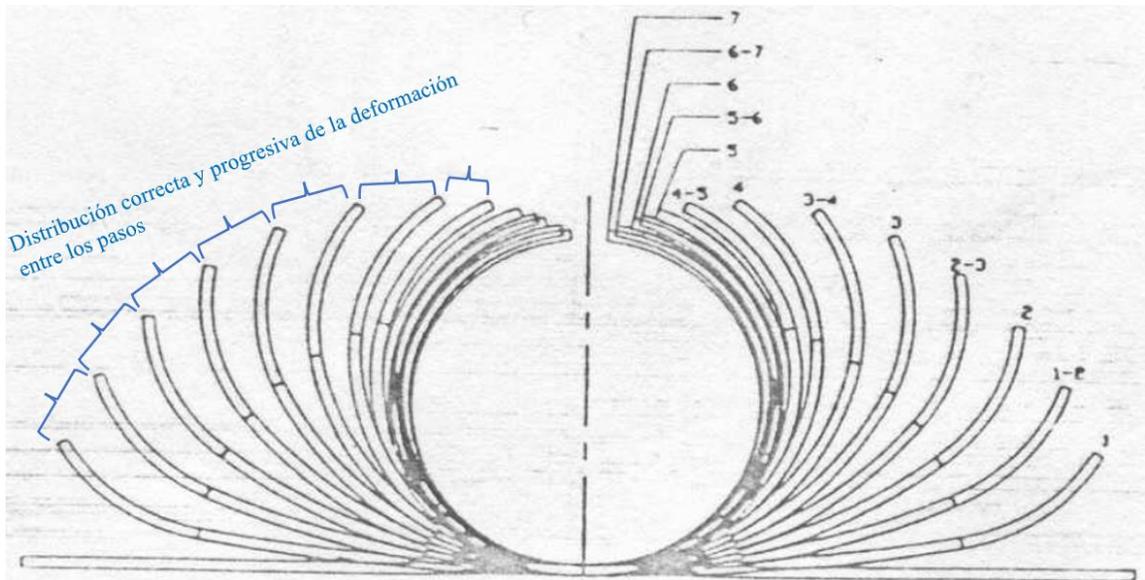


Figura 6. Progresión correcta de la flor de formación (Cheng, 2020).

A continuación, en la Figura 7 se muestra una formación incorrecta de la lámina para el mismo tamaño de tubo, material y configuración de la formadora. El espaciado irregular entre los pasos indica sobrecarga de trabajo en algunos pasos y menor trabajo en otros. Genera problemas de marcas en el tubo, desliz, pandeo, mala soldadura y tamaños incorrectos.

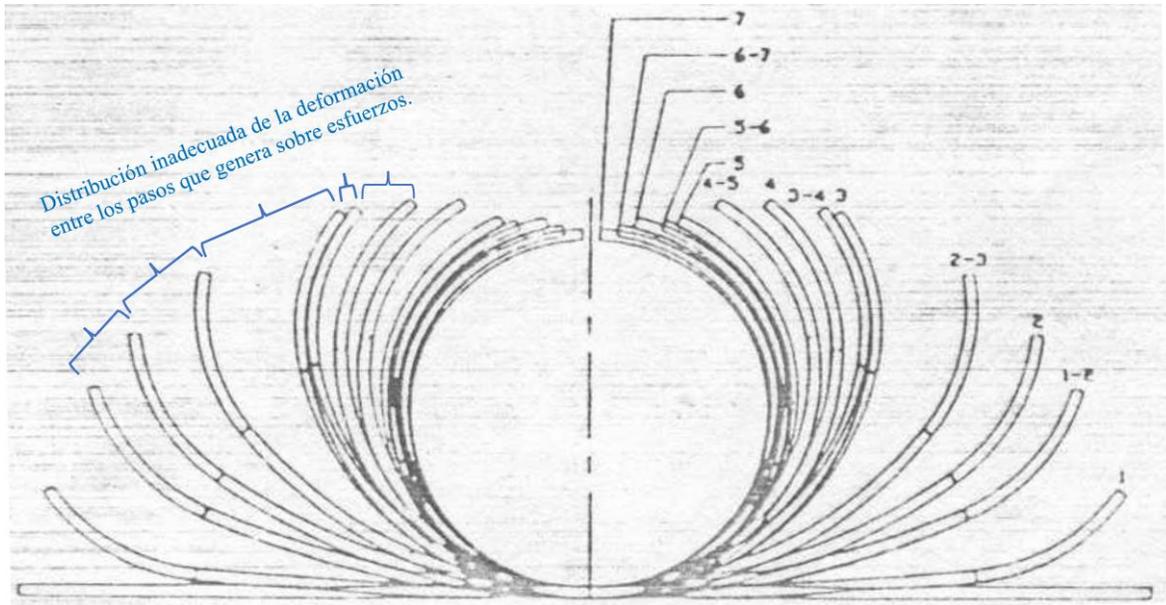


Figura 7. Progresión incorrecta de la flor de formación (Cheng, 2020).

La flor de formación presenta los datos necesarios para calcular las elongaciones y deformaciones permitidas en el diseño de rodillos, en la sección 4.1.1, se presenta el cálculo de estas elongaciones y los mayores máximos permitidos.

4.1.3 Estándares de diseño

Para el diseño de los rodillos se debe calcular los siguientes parámetros:

- Diámetro de formado (a): Es el diámetro de la sección del rodillo que tiene contacto con el tubo (ver Figura 8), realizando la deformación de este. Para el cálculo de este diámetro es necesario determinar el perfil a fabricar, el número de pasos, estos ya se encuentran determinados por la maquina formadora de tubos, los cuales para la sección “forming” son 14, del P1 al P14 y para la sección “sizing” 10 del P15 al 24 (ver Figura 1). Para calcular estos diámetros de formado (a) de la sección del “forming”, se debe tener presente el diámetro del tubo madre (D_{mad}) como medida última. El tubo madre es la medida final luego de pasar por el proceso de soldadura al final del “forming”. Para el caso de la referencia circular de 5/8”, el diámetro del tubo madre es:

$$D_{mad} = 0.625" + C \quad Ec 5$$

Donde C es el valor de crecimiento que debe tener el tubo madre, para luego entrar a la sección del “sizing” y ser refinado hasta la medida del tubo final, cumpliendo los parámetros de

calidad. El valor de C debe ser entre, 0.020” y 0.040” (Moreno, 2005). En este informe se tomó un valor de “C” igual a 0.035”. El diámetro del tubo madre se calcula de la siguiente manera:

$$D_{mad} = 0.625 + 0.035 = 0.660" \quad Ec 6$$

De lo anterior se tiene que los diámetros de formación (a) debe llevar una progresión geometría hasta llegar un valor de 0.660” de diámetro último, cumpliendo con la elongación o porcentaje de deformación máxima que debe haber entre cada paso de tracción, el cual sería de $e=0.15$, según sección 4.1.1.

Para el caso de la sección de “sizing” se debe formar el diámetro del tubo madre desde un valor de 0.660” a un valor de 0.625”. Cumpliendo con la elongación o porcentaje de deformación máxima que debe haber entre cada paso de tracción, el cual sería de $e=0.08$, según sección 4.1.1.

-Luz (b): La luz es la separación que debe haber entre los dos rodillos del paso (ver Figura 8), esta luz debe tener máximo un valor de 0.125” y mínimo de 0.031”(Moreno, 2005).

- Centro de formado (c): Es la distancia a la que se mide el diámetro de formado con respecto a la cara exterior del rodillo (ver Figura 8) (Moreno, 2005). Se calcula:

$$c = b/2 \quad Ec 7$$

Siendo la mitad de la separación entre rodillos (b).

-Redondeo (d): Los redondeos del rodillo no pueden superar 1/16” de radio, ya que puede llegar el material a deformar y afectar la medida (Moreno, 2005)

Para el caso del Diámetro, Garganta, Largo superior, Largo inferior, señalados en la Figura 8, con un asterisco (*) son valores intrínsecos de la maquina y dependen del tamaño de las torres entre los pasos 15 al 24.

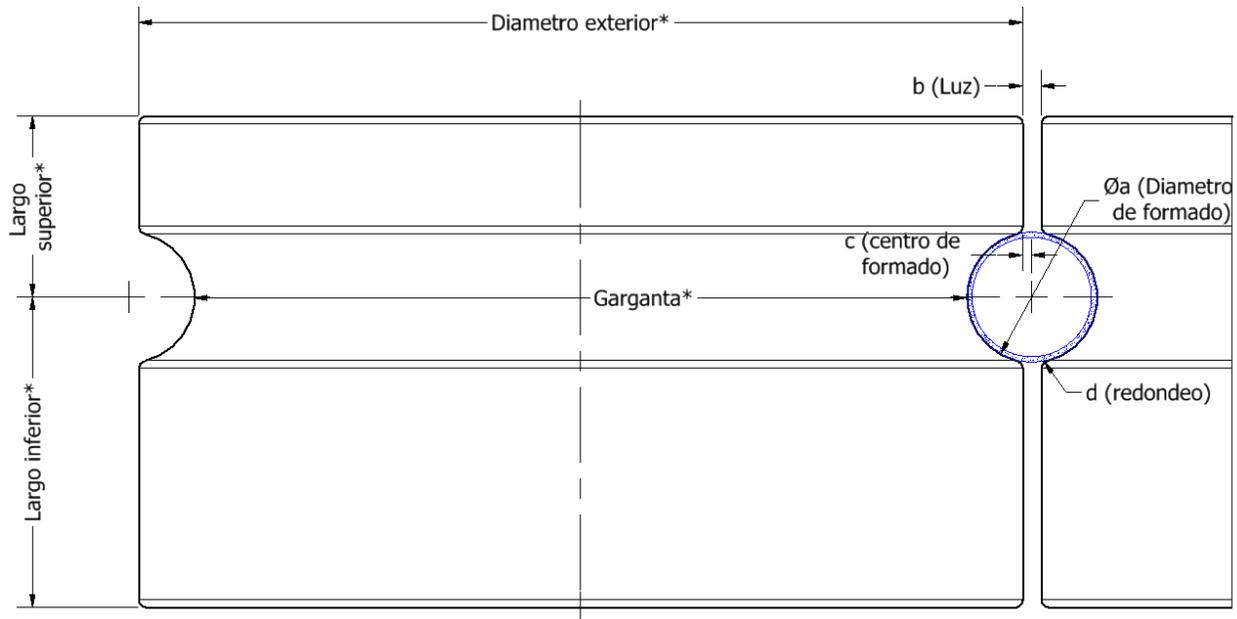


Figura 8. Diseño de rodillos.

4.2 Problemas que pueden surgir por mal diseño de los rodillos:

Son muchas las situaciones no deseadas al momento de empezar una producción en línea de una referencia de tubería, que te obligan a parar el proceso, causando un paro en la producción y daño del material que se traducen en costos para la empresa. En esta subsección se presentarán las más comunes en la empresa AAMetals S.A.S

Malas medidas en el tubo: El inconveniente más común a la hora de montar un herramental para una referencia determinada es que el tubo no salga en el rango de medidas permitido por los estándares de calidad de la empresa, esto debido a que se debe calibrar la maquina en cada cambio de referencia y en este proceso se pueden presentar errores en la distancia entre los rodillos que causan que el tubo salga con dimensiones no aceptadas.

Solapamiento: Otro de los problemas más comunes al arrancar a trabajar la formadora de tubos, es el solapamiento ente laterales de la lámina (ver Figura 9). Esto debido a que la soldadura no se realiza y la tubería no entra sellada al área del “sizing” causando así deformaciones mayores, solapando un lateral de la lámina por encima del otro. En ocasiones también se presenta en la zona del forming generado por el desalineamiento de los rodillos que causan que el fleje ente con ángulo a los rodillos.



Figura 9. Solapamiento del tubo.

Rayas en la tubería: A diferencia de los problemas antes comentados, este se genera en cualquier momento de la producción causando paros y pérdida de material inesperados (ver Figura 11). Las rayas son generadas por rodillos que presentan grano o desgaste (ver Figura 10 Rodillo con desgaste y grano.Figura 10). El grano es material de la materia prima impregnado al rodillo debido a constantes esfuerzos en una zona específica del herramental o también velocidades relativas entre el rodillo y el tubo que saca material del fleje y lo agrega al rodillo. Por lo general se presenta en los rodillos de las torres de tracción debido a que estos son los que generan la tracción y hacen la tarea de deformar el material.



Figura 10 Rodillo con desgaste y grano.

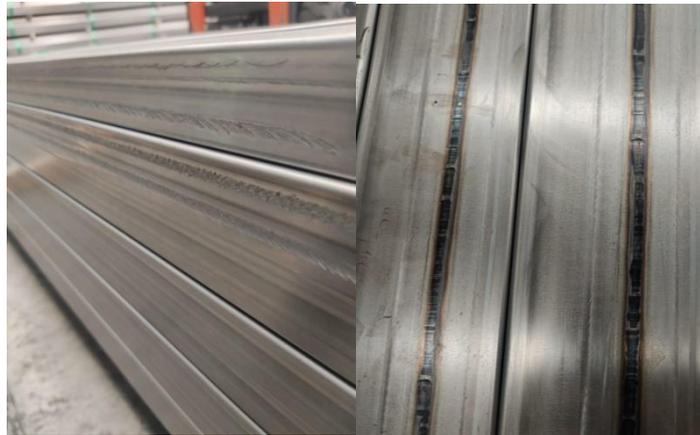


Figura 11. Rayas en tubería.

Soldadura inadecuada: Al igual que las rayas, la soldadura es un proceso que puede presentar problemas en algún momento de la producción. Consiste en mal acoplamiento de los laterales de la lámina que permiten que el campo magnético sobre caliente y cree acumulación de material en los laterales de la pieza a soldar o por el contrario deje orificios (ver Figura 12). Las razones de esto son principalmente, mal calibración de los rodillos de forming, cambio en los parámetros de la soldadura, o paro no planeado en el proceso que genera recalentamiento en el tubo.

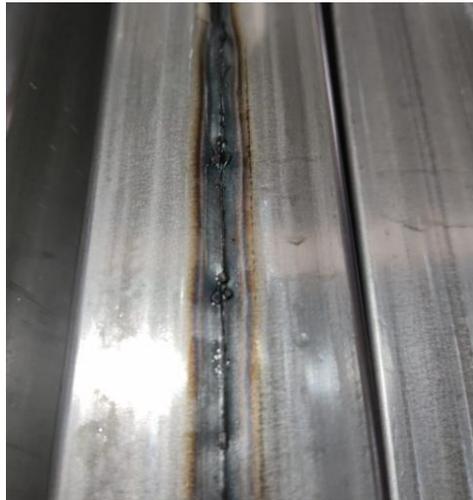


Figura 12. Problema de soldadura en el tubo.

4.3 Materia prima

En la industria de tubos formados por rodillos se utilizan gran cantidad de materiales dependiendo de las necesidades y la demanda en el mercado en el que se encuentran. Los materiales más usados son el bronce, aluminio, acero cold roll, acero hot roll y acero inoxidable. En la empresa AAMetals S.A.S, se fabrica solo en acero cold roll grade 30. A continuación se presentan las propiedades de este material.

Tabla 2. Propiedades del acero usado de materia prima. Acero Cold Roll Grade 30.

PROPIEDADES	VALOR
Densidad	7.87 g/cc
Resistencia a la tracción, Última.	310 MPa
Resistencia a la fluencia	205 Mpa
Módulo de elasticidad	200 Gpa
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo volumétrico	1.66×10^8 Mpa
Módulo de cizalla	7.69×10^7 Mpa

* Tabla del material se obtiene de la página Matweb, especializada en materiales de ingeniería.

Como se muestra al comienzo del marco teórico la materia prima de la formadora se conoce como fleje y es fabricada en la maquina llamada Slitter. Para cada referencia de tubo comercializado se fabrica un fleje con un ancho diferente, el cual depende del espesor del material (“e”) y el área transversal del tubo:

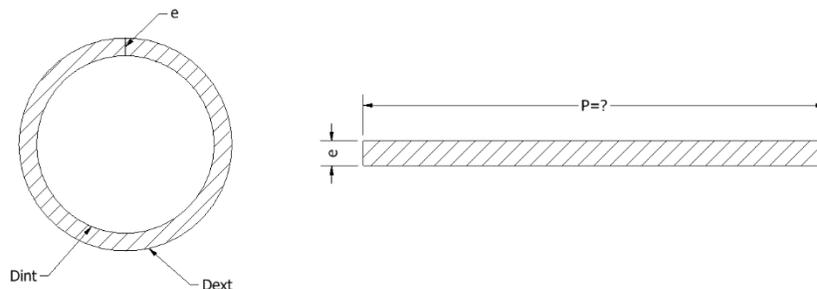


Figura 13. Ancho de fleje.

El área total del tubo en un corte transversal (A_t) es calculado a partir de:

$$A_t = A_{ext} - A_{int} \quad \text{Ec 8}$$

Donde A_{ext} es área del círculo de diámetro D_{ext} y A_{int} es área del círculo de diámetro D_{int} . El diámetro interior (D_{int}) se expresa como:

$$D_{int} = D_{ext} - 2e \quad \text{Ec 9}$$

De la Ec 6 en la Ec 5 se tiene:

$$A_t = \frac{\pi}{4} D_{ext}^2 - \frac{\pi}{4} D_{int}^2 \quad \text{Ec 10}$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} D_{ext}^2 - \frac{\pi}{4} (D_{ext} - 2e)^2 \quad \text{Ec 11}$$

$$A_t = \pi(D_{ext} * e - e^2) \quad \text{Ec 12}$$

El perímetro (P) de la circunferencia dándonos como resultado del ancho que debe tener el fleje, para lograr la geometría deseada en el tubo, es encontrado a partir de:

$$P = \frac{dA_t}{de} \quad \text{Ec 13}$$

$$P = \pi(D_{ext} - 2e) \quad \text{Ec 14}$$

4.4 Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos o FEM (finite element method), se ha vuelto muy popular en el área de ingeniería y las ciencias exactas ya que permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que representan matemáticamente problemas planteados en muchos hábitos ingenieriles, abarcando áreas como la resistencia de materiales, transferencia de calor, mecánica de fluidos y campos electromagnéticos (Kim, 2018).

La razón por la que cada vez son más empresas e ingenieros implementan FEM es que garantizan un producto más confiable, eficaz y rentable gracias a la información que se puede obtener según el análisis desarrollado.

4.4.1 La metodología de análisis por FEM

El planteamiento del problema debe estar claro y se deben definir de una manera precisa el sistema a analizar con todas las restricciones de soportes y fuerzas que se busca analizar con el modelo de elementos. Al simplificar el problema facilitara los cálculos computacionales que llevaran a resultados esperado, pues el FEM no es una réplica del modelo físico sino una representación matemática del problema en específico.

Se parte de tener definido el sistema físico que se va a analizar. Se realizan las simplificaciones necesarias para tener una simulación adecuada a las necesidades e incógnitas planteadas. Se realiza el montaje y discretización del modelo computacional determinando las fuerzas y soportes del sistema, por último, se realiza la verificación de los resultados y validación física de la simulación (ver Figura 14).

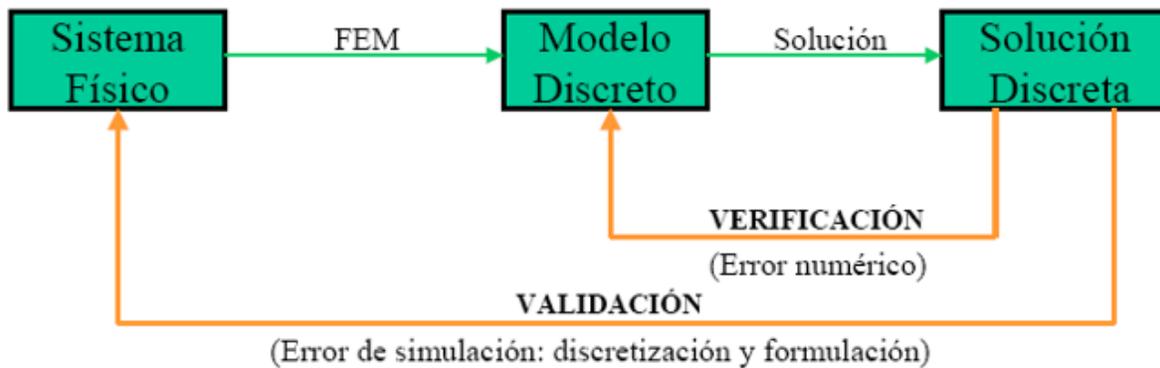


Figura 14. Flujo de análisis por FEM (Kim, 2018).

El análisis computacional está compuesto por pasos que permiten llegar a la solución del problema propuesto. Se comienza con el planteamiento del problema, luego se realizan las simplificaciones necesarias para una adecuada simulación, eliminando elementos del sistema que no se deseen analizar o que no aportan nada al adecuado desarrollo de la simulación. Se discretizan los elementos y se determina el método de cálculo por elementos finitos. Para el caso de análisis no lineales también se plantea la discretización del tiempo, determinado en cuantos pasos temporales se calculará el estado del sistema. A continuación, se realiza la solución calculando cada paso temporal. En caso de divergencia el procedimiento se vuelve a iniciar, analizando las simplificaciones realizadas y oportunidades de optimizar aún más el problema. Se refina la malla del sistema al igual que el paso temporal y se vuelve a simular. Por último, se analizan los resultados con el fin de verificar si la simulación se acerca a valores reales. (Ver Figura 15)

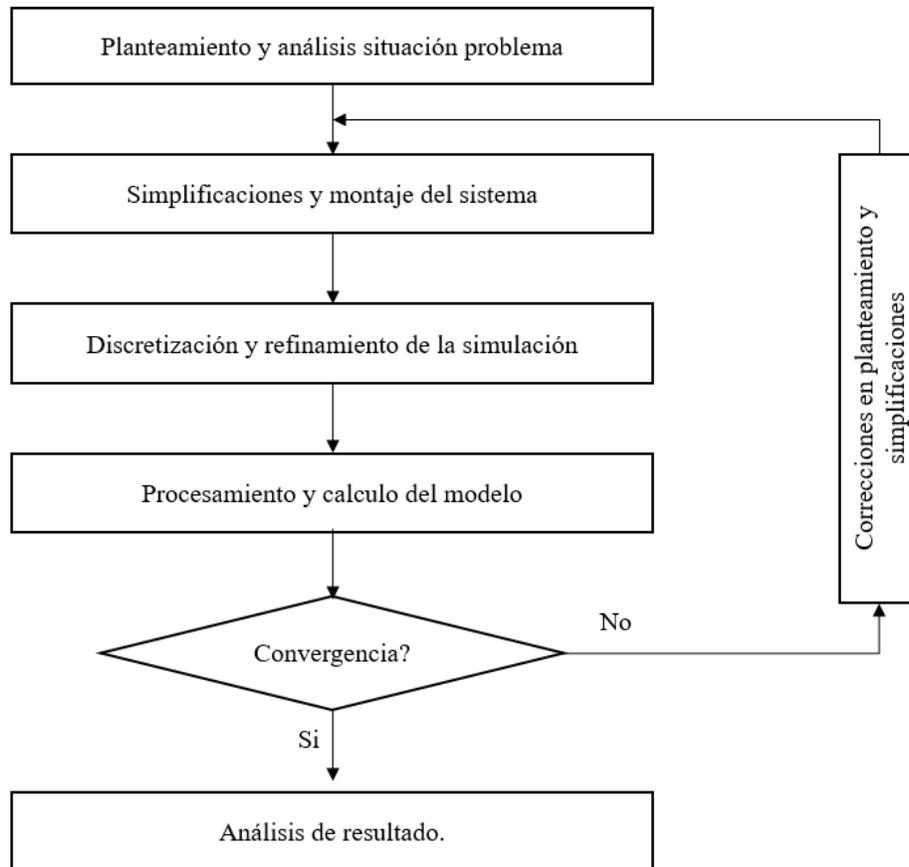


Figura 15. Proceso de trabajo por FEM (Ramírez, 2018).

Para cualquier sistema o problema a trabajar se debe definir, el dominio que consiste en el espacio geométrico que se va a analizar, las condiciones de contorno las cuales son variables conocidas, cargas, desplazamientos, temperatura, voltajes, contactos, focos de calor. Por ultimo las incógnitas que son variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema, desplazamientos, esfuerzos, temperatura, deformaciones (Kim, 2018).

4.4.2 Discretización del sistema:

La discretización es el conjunto de elementos finitos que representan la pieza o sistema a analizar, a este conjunto de elementos se le nombra malla. Los elementos pueden ser de varias formas dependiendo a las geometrías del sistema. La malla está compuesta por geometrías básicas y fáciles de usar para los cálculos numéricos, para el caso del 1D la geometría usada es la línea. En

el caso del 2D se usan elementos triangulares y cuadrados. Para el 3D se malla con elementos tetraédricos y hexagonales (Ver Figura 16)

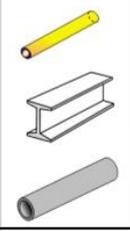
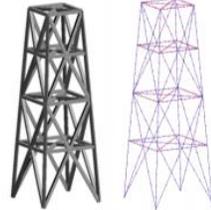
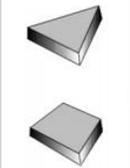
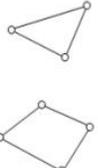
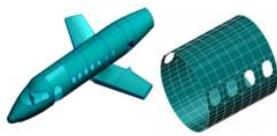
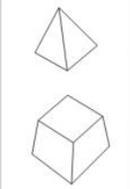
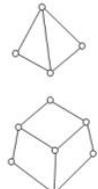
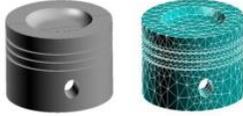
	Geometría	Nombre	Elemento finito	Ejemplo
1D		Elemento barra		
2D		Elemento triangular Elemento Cuadrado		
3D		Elemento Tetraedro Elemento Hexagonal		

Figura 16. Discretización del sistema.

La discretización del dominio en elementos de geometrías sencillas no puede necesariamente representar a cabalidad todos los detalles de la frontera del dominio global, constituyendo esto una primera aproximación del método. Sin embargo, esta aproximación es mejorable aumentando el número de elementos que se utilizan en la discretización del dominio, denominado refinamiento de la malla. También cumpliendo con que los siguientes parámetros de calidad de malla:

1. El Jacobian Ratio o cociente jacobiano representa cómo de deformados están los elementos en zonas con curvaturas donde deben adaptarse a geometrías complejas. Se trata de conseguir elementos poco deformados, fundamentalmente en aquellas zonas que sean de interés para el estudio. Un valor de 1.4 puede ser aceptable, sin embargo, un valor por debajo de 2 como máximo puede ser aceptable (Ramírez, 2018).
2. El Orthogonal Quality o Calidad ortogonal, es el parámetro que se deriva directamente del tipo de elementos y estrategia de discretizado. Siendo el valor ideal 1 y recomendando que el valor mínimo que se tenga sea 0.15 (Ramírez, 2018).

3. El Aspect Ratio o Relación de aspecto es la proporción que guarda dos medidas características de la celda o elemento. En el caso bidimensional, la relación de aspecto es la proporción entre la altura y el largo de cada elemento. Por otro lado, en el caso tridimensional es la relación entre las áreas. Siendo el valor máximo recomendado 10 (Ramírez, 2018).

Tabla 3. Rangos aceptados para los parámetros de calidad de malla.

PARAMETRO	RANGO ACEPTADO
JACOBIAN RATIO	< 2
ORTHOGONAL QUALITY	> 0.15
ASPECT RATIO	< 10

*Rangos tomados de (Ramírez, 2018).

4.4.3 Análisis no lineales

Cuando realizamos análisis por Elementos Finitos tenemos que entender los conceptos referentes a análisis no lineal y su diferencia con un análisis lineal. La Rigidez, es quien define la diferencia entre los tipos de análisis, marcando un antes y un después en la fiabilidad. La rigidez varía dependiendo de tres factores; la forma, el material y los apoyos o soportes, que sostienen el elemento analizado. Elegir entre un análisis lineal o no lineal es decisión del ingeniero y depende del problema a desarrollar, por esto se debe ver el FEM como una herramienta de cálculo que debe ser utilizada rigurosamente y analizando cada paso y resultado.

En el análisis lineal la rigidez de un elemento no cambia, los modelos se someten a un cálculo único sin tener en cuenta la deformación plástica en caso de pasar el esfuerzo de fluencia, esto favorece la rapidez de los cálculos en estructura grandes. Se usa comúnmente en análisis estructurales. (Ramírez, 2018).

La forma de abarcar el sistema en un análisis no lineal es diferente a uno lineal. Para el análisis no lineal la matriz de rigidez (K) deja de ser constante, depende de la forma, el material y los apoyos y se debe evaluar el sistema a medida que progresa la deformación con respecto al tiempo. La geometría no lineal o no linealidad geométrica se genera cuando los cambios en la rigidez provienen exclusivamente de los cambios de forma. (Avilés, 1998).

4.4.3.1 Contacto entre elementos en análisis no lineales.

Cuando dos superficies se tocan entre sí de forma que se vuelven tangentes la una a la otra se dice que están en contacto, esta acción cumple características entre las cuales esta, la no penetración una en otra. En esta interacción se transmiten fuerzas normales compresivas y fuerzas tangenciales de fricción, además, no se transmiten fuerzas normales a tensión. Estas situaciones de contacto altamente no lineales y se clasifican en dos clases:

1. Contacto Rígido a Flexible: En la cual una o más superficies de contacto se trata como rígida, en este caso la pieza tratada como rígida es de una materia con características mucho más altas en cuanto a resistencia mecánica que el material flexible. La mayoría de análisis de conformado de metal entran en esta categoría, siendo el caso también para el formado de tubos. Para nuestro análisis se utilizará este tipo de contacto, donde la pieza rígida será los rodillos, dado las características del material, y la pieza flexible será el tubo a formar.
2. Contacto Flexible a Flexible: Ambos o todos los cuerpos en contacto se deforman, esto debido a que su rigidez es similar o muy cercanas en valor.

Para prevenir que las superficies de contacto se penetren la una en la otra se debe establecer una relación de contacto entre ambas. La penetración ocurre si no se fuerza compatibilidad en el contacto.

Para el análisis de contacto entre pizas hay tres tipos de elementos de contacto que se comportan entre sí de diferentes maneras:

1. Nudo-a-Nudo: Esto implica que la localización final del contacto es conocida de antemano.
2. Nudo-a-Superficie: Las áreas de contacto son desconocidas y se permite el deslizamiento.
3. Superficie-a-Superficie: Las áreas de contacto son desconocidas y se permite gran cantidad de deslizamiento. Tiene ventajas computacionales sobre la formulación nodo a superficie (Avilés, 1998).

4.4.3.2 Método para cálculo de contacto entre piezas.

El método de Penalización usa resortes para forzar la compatibilidad en el contacto. La rigidez del resorte o la rigidez del contacto es conocido como parámetro de penalización.

El resorte se deflactará una cantidad Δ tal que el equilibrio es satisfecho,

$$F = k \Delta \quad \text{Ec 15}$$

Entre más alta la rigidez del contacto (k) menor ocurrirá la penetración en la superficie de contacto. Sin embargo, un valor muy alto puede llevar a problemas de convergencia de la solución.

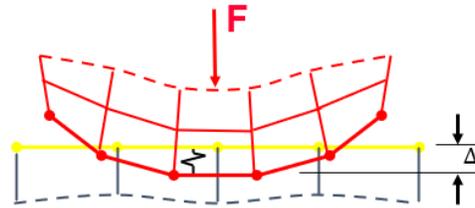


Figura 17. Contacto de penalización.

Un método alternativo es el de multiplicadores de Lagrange. Este añade un grado de libertad adicional (la presión de contacto λ), para satisfacer la condición de impenetrabilidad de las superficies.

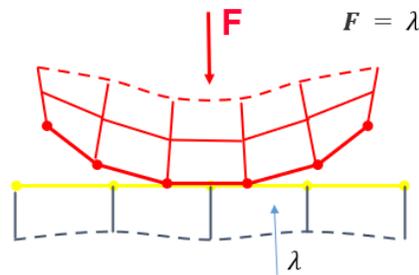


Figura 18. Método de multiplicadores de Lagrange.

La combinación de ambos métodos, el de penalización y el de multiplicadores de Lagrange, para garantizar la compatibilidad se denomina el Lagrangiano Aumentado.

$$F = k \Delta + \lambda \quad \text{Ec 16}$$

En las primeras iteraciones, el contacto es determinado con base en la rigidez de la penalización. Una vez el equilibrio es establecido se verifica la tolerancia a la penetración. En este punto si es necesario, se aumenta la presión de contacto y se continúan las iteraciones.

5 Metodología

Para evaluar la situación en la que está el proceso de formación de tubos la empresa AAMetals S.A.S, se inició con un análisis en campo, junto con los operarios y encargados de calidad, observando que problemas se generaban en el proceso de fabricación de la tubería circular 5/8". Se encontró que la zona de "sizing" presenta problemas para desarrollar las deformaciones deseadas y para calibres altos se generaba grano en los rodillos que rayaban el tubo, causando paros y perdidas tanto de tiempo como de material. Se decide plantear el diseño y simulaciones numéricas en esta zona del proceso. Para reducir el tiempo de trabajo computacional, se analiza 6 de 10 que tiene el "sizing", para hacer un análisis más exhaustivo de este proceso.

5.1 Diseño de rodillos

La sección del "sizing" tiene 10 pasos nombrados del paso 15 al 24, cada uno tiene 2 rodillos formadores para un total de 20 rodillos que transforman el tubo madre en la forma deseada. Para el perfil circular 5/8" calibre 16 se usan 6 pasos de los 10 nombrados anteriormente, debido a que los pasos restantes se usan para definir las aristas de los perfiles cuadrados y rectangulares (ver Figura 19).

El tubo madre es formado y soldado longitudinalmente en la sección del "forming", de esta sección sale con altas temperaturas, por lo tanto, pasa por una piscina de enfriamiento y lo dispone a entrar al "sizing".

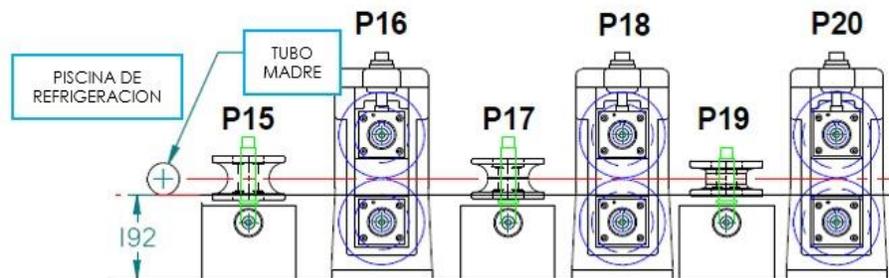


Figura 19. Pasos del Sizing para perfil circular 5/8".

Se realiza un estudio de los rodillos presentes en la empresa AAMetals S.A.S de la sección de "sizing", con el fin de rediseñar teniendo en cuenta los estándares presentados en la sección 4.1 y los datos obtenidos para los rodillos ya presentes.

Se inicio midiendo el diámetro de formación (a) que tiene cada rodillo presente en la empresa, para crear la flor de formación a partir de las medidas mostradas en la Figura 20:

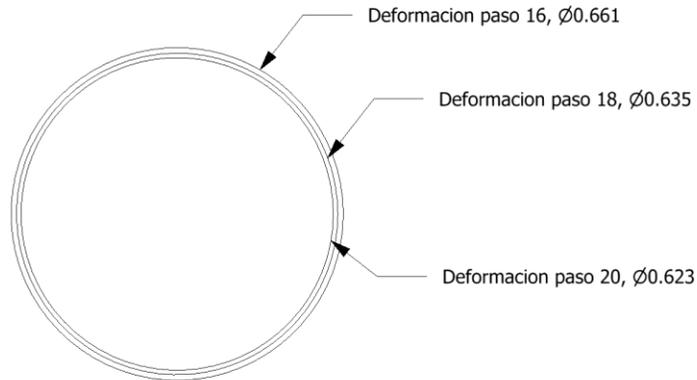


Figura 20 Flor de formación de la zona sizing.

En la siguiente tabla se presentará el porcentaje de elongación o deformación en cada uno de los pasos verticales, para verificar el estándar de diseño para el diámetro de formación (a) de los rodillos presentes en la empresa.

Tabla 4. Diámetro de formación (a) y su verificación.

PASO	Diámetro de formación (a) pulg	ELONGACION (e%)	e% < 0.08
Tubo Madre	0.66	0	Cumple
Paso 16	0.661	-0.001515152	Cumple
Paso 18	0.635	0.037878788	Cumple
Paso 20	0.623	0.056060606	Cumple

En la tabla se presenta un valor negativo de la elongación en el paso 16 de la sección “sizing”, esto debido a que se deja un rango de tolerancia por encima del valor de diámetro exterior del tubo madre, dado que en la sección de “forming” se genera la soldadura y la temperatura del tubo se eleva hasta el punto de fusión, generando así una expansión en el material no controlable, causando un cambio en las medidas a pesar de que luego pase por una piscina de enfriamiento, por esta razón la medida en el paso 16 es un poco mayor a la del tubo madre. Ahora bien, este paso como los demás están por debajo del valor máximo de deformación (ver Sección 4.1) en la sección del “sizing” $e=0.08$, por consiguiente, los rodillos cumplen con este parámetro de diseño, en la Tabla 4 se presenta en la columna 4 el cumplimiento del parámetro.

Para el caso de la luz (b), el valor de este para todos los rodillos es de $3/32$ ” estando este entre los valores máximos permitidos presentados en la sección 4.1.3.:

$$\frac{1}{32}'' < b = \frac{3}{32} > \frac{1}{8}'' \quad Ec 17$$

En cuanto al centro de formación (c) este tiene un valor según Ec 7 de:

$$c = \frac{b}{2} = \frac{3}{64} \text{ pulg} \quad Ec 18$$

Los radios de los rodillos (d) tiene un valor de 5/128” estando por debajo del máximo permitido.

$$d = \frac{5}{128} \text{ pulg} < \frac{1}{16}'' \quad Ec 19$$

Para los demás parámetros que dependen de la máquina, sus valores se presentan en los planos de la sección de Anexos.

Se modelan en el software inventor los 12 rodillos del proceso “sizing” entre el paso 15 al 20 (ver Figura 21), con el objetivo de tener los planos y la flor de formación de esta zona.

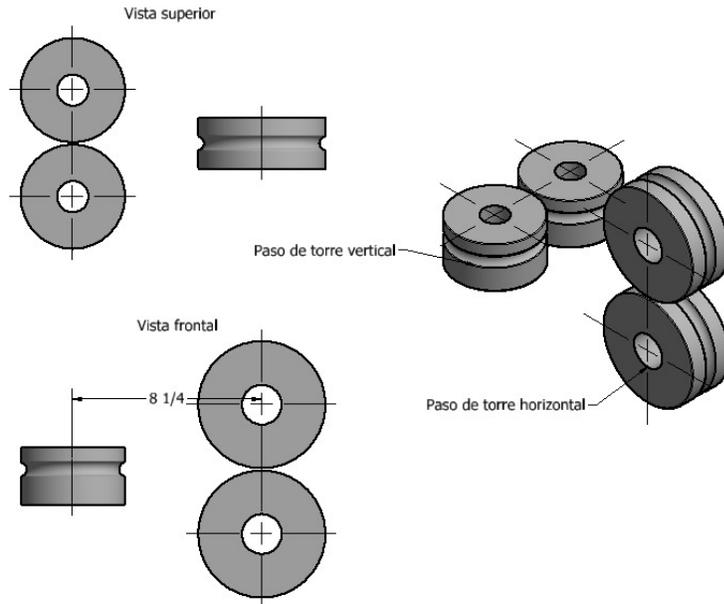


Figura 21. Modelado de rodillos laterales y de tracción.

Se encuentra que los rodillos cumplen con las características para poder diseñar el perfil circular 5/8 pulg, su desarrollo es uniforme, esto se puede apreciar en la flor de deformación (ver Figura 20), cumple con los porcentajes máximos de deformación analizados en la sección 4.1.2. De esta manera se procede a realizar la simulación de elementos finitos y corroborar que se deformará el tubo de una manera progresiva en cada uno de los pasos y con las medidas requeridas por los

estándares de calidad. El tubo madre llega a esta sección del proceso con un diámetro exterior (Dext) de $\varnothing 0.660$, se modela el tubo en formato CAD según cálculos de la Ec 6 presentada en la sección 4.1.1.

5.2 Metodología FEM

Desde el software Inventor, se genera el sistema conjunto de los pasos del 15 al 20 de la sección “sizing”. También se modela el tubo madre que sale de la piscina de enfriamiento, para entrar al paso 15 del “sizing”. En el sistema se coloca cada paso separado $8 \frac{1}{4}$ ” como se tiene configurado en la maquina formadora de tubos ya que la distancia entre un paso a otro afecta significativamente los esfuerzos y deformaciones y debe ser igual al sistema real, Figura 22. Sistema sizing modelado en Ansys. Este CAD fue importado al software Ansys en donde se realizó todo el análisis de elementos finitos, discretizando el sistema y desarrollando la formación del tubo.

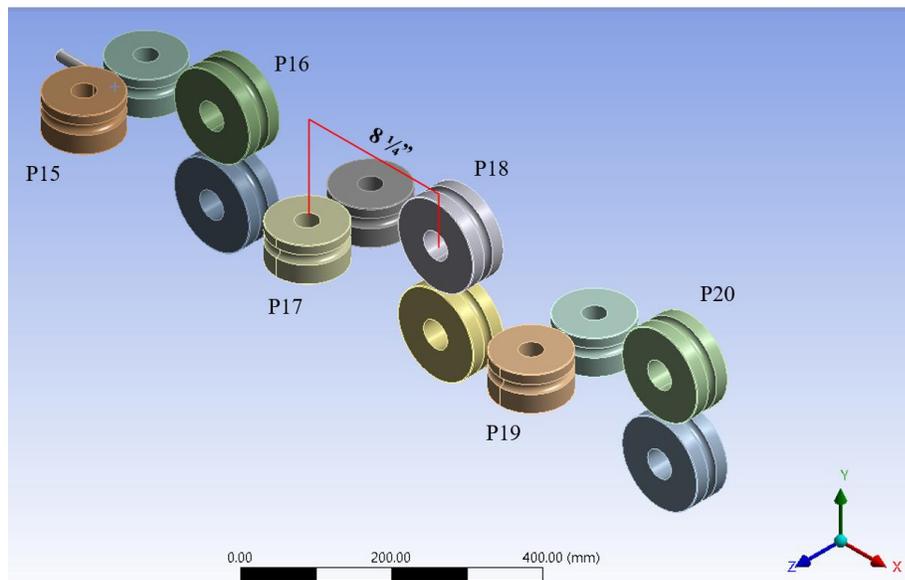


Figura 22. Sistema sizing modelado en Ansys.

5.2.1 Simplificaciones del modelo CAD

Los rodillos presentan un redondeo de $1/16$ ” en las aristas, estas no aportan esfuerzos a al tubo y además en caso de dejarlas en el software Ansys, dificultaran el mallado del sistema lo que puede causar errores en los resultados, por esta razón se eliminan de la pieza (ver Figura 23)

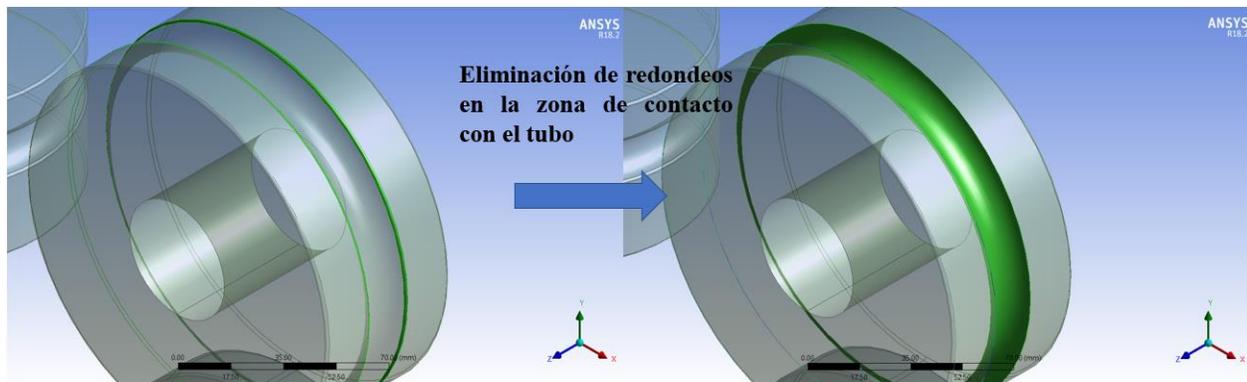


Figura 23. Simplificaciones de los rodillos.

De esta manera el mallado se hará solo para la cara del rodillo que tiene contacto con el tubo. Eliminar esos redondeos favorece el mallado de dichas caras y permite realizar una discretización que cumpla con los parámetros presentados en la sección 5.1.3.

Para el formado de tubo el proceso realizado es continuo y no hay cortes del material en la sección del sizing, sin embargo, para la simulación no es posible modelar un fujo continuo y de largas longitudes de tubería, por esta razón se modela un tramo de 4 pulg de longitud, con la medida del tubo madre que sale de la sección del forming

5.2.2 Materiales y sus interacciones

Al tubo madre se le asignan las características del acero cold roll grado 30 (ver Tabla 2), por otro lado, a los rodillos se le asigna el Acero Böhler W302 – AISI H 13 (ver Tabla 1). Al ser los rodillos 6 veces más resistentes que la materia prima, estos se plantean como elemento rígido y no sufre ninguna deformación en las simulaciones realizadas, siendo esta una de la primera simplificación realizadas al modelo computacional. Sin embargo, esta es acertada ya que debe realizarse mucho esfuerzo para que el fleje pueda afectar físicamente a los rodillos. De acuerdo con lo anterior la interacción entre lamina y rodillo se plantea como un sistema “*frictional*” de contacto entre un elemento rígido, rodillos, y el elemento flexible, tubo madre (ver Figura 24). Este modelo cuenta con un valor de coeficiente de fricción estático con un valor de 0.2, tomado de Matweb.

Además de utilizar la interacción con el contacto “*fictional*”, se determinó el método con el que se realizaran los cálculos de contacto y deformación, de acuerdo con lo planteado en la metodología (ver Sección 4.4.3.2) se seleccionó el método *Lagrangiano Aumentado*. Siendo este

el más adecuado para largas deformaciones, teniendo la cualidad de plantear en las primeras iteraciones el contacto con base en la rigidez de la penalización.

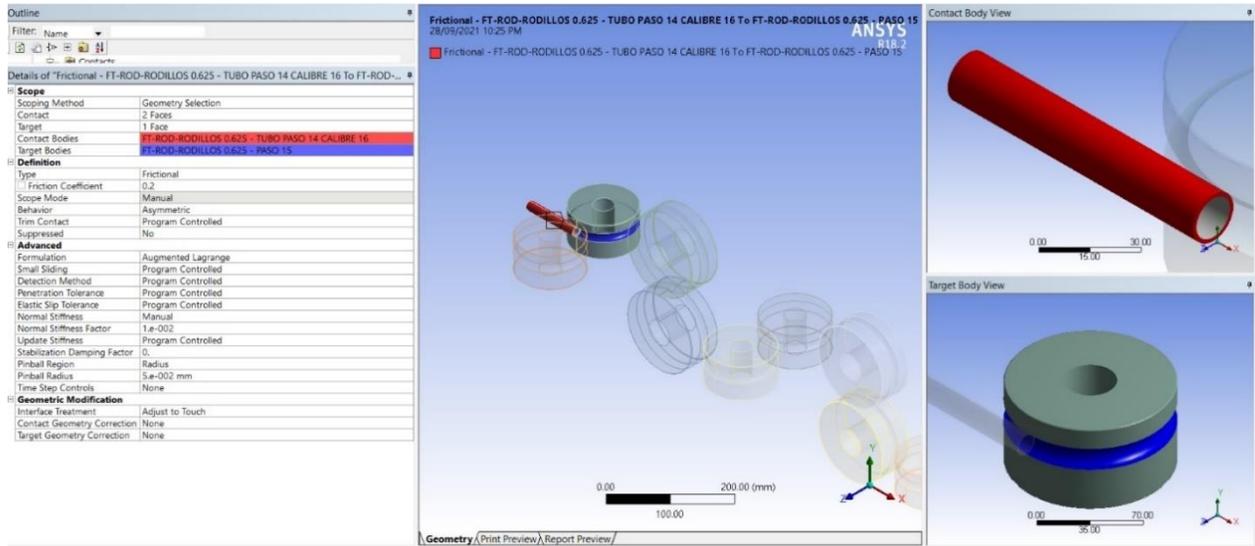


Figura 24. Configuración de contacto entre el rodillo y el tubo.

A los rodillos se le aplica un par cinético de revolución alrededor del su eje axial, restringiendo los movimientos traslacionales en los tres ejes (x,y,z) y los movimientos rotacionales en los dos ejes trasversales. En cuanto al tubo, este tiene una interacción traslacional ya que la muestra de tubo es de una longitud reducida se debe aplicar el movimiento a través de los ejes para que logre avanzar por los pasos que no se genera tracción, esta velocidad es la que le daría los rodillos de tracción, así pues, la velocidad longitudinal del tubo es proporcional a la velocidad angular de los rodillos.

5.2.3 Mallado

Para le dominico computacional se tienes dos mallas que se comportan diferente en el análisis no lineal. La primera es una malla de cuerpo, aplicada al tubo, esta necesariamente debe ser 3D ya que se debía estudiar la deformación completa del tubo. La segunda es una malla de superficie aplicada a las caras de los rodillos en contacto con el tubo, esto debido a que se toma como cuerpo rígido y nos interesa solo la superficie en contacto con nuestra materia prima.

Para el tubo se usa una discretización con elementos hexagonales ya que estos cumplen mucho más fáciles los parámetros de calidad de malla. Para los rodillos se generan elementos cuadrados, que también cumplen por lo general con los parámetros de calidad. En cuanto al refinamiento o tamaño de malla, este es un parámetro que se varió para comprobar la independencia de malla y la confiabilidad de los resultados.

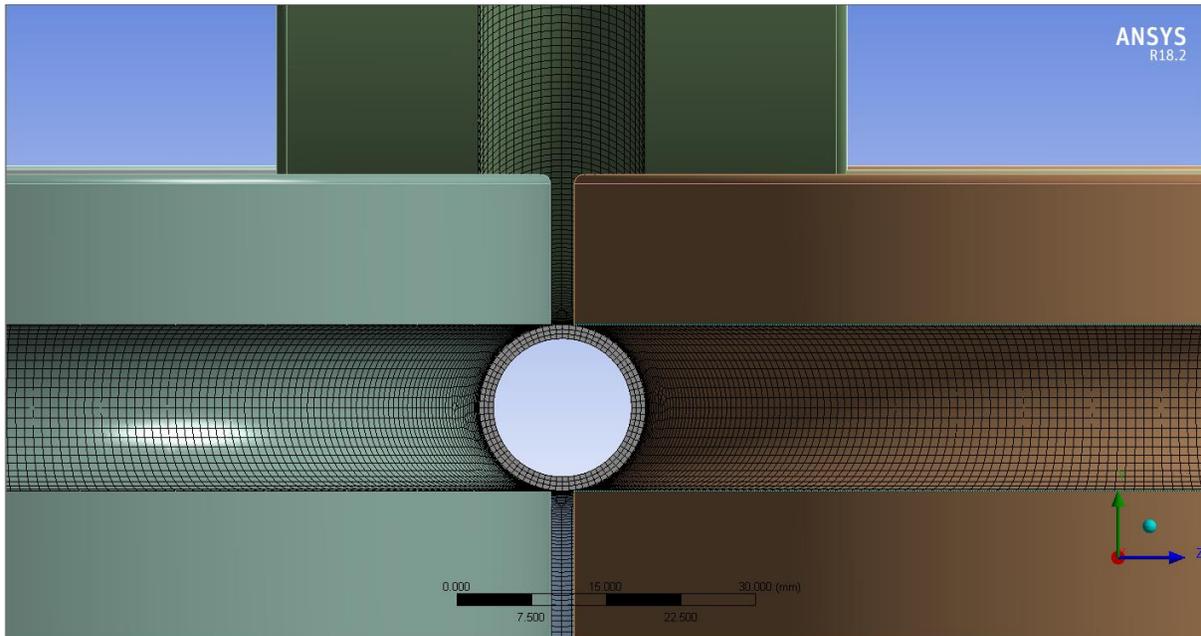


Figura 25. Discretización del sistema a estudiar.

5.2.4 Configuración de movimientos

Los rodillos que entregan tracción son aquellos que están en torres verticales Figura 2, a estos se les impone una entrada “Rotation” como condición de frontera, esta representa la velocidad con la que giran los rodillos. La velocidad de fabricación de tubos en la maquina Abbey Etna es de 8 tubos por minuto, cada tubo tiene una longitud de 6 metros, por lo tanto, la velocidad se calcula de la siguiente forma:

$$v = 8 \frac{\text{uni}}{\text{min}} * 6 \text{ m} = 48 \frac{\text{m}}{\text{min}} \quad \text{Ec 20.}$$

$$v = 800 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad \text{Ec 21}$$

Donde v es la velocidad con la que se forma el tubo, conociendo el radio de acción del rodillo (r) se puede sacar la velocidad de giro de los rodillos de tracción de la siguiente manera:

$$r = 63.398 \text{ mm} \quad \text{Ec 22}$$

$$\omega = \frac{800 \frac{mm}{s}}{63.398 \text{ mm}} = 12.618 \frac{rad}{s} \quad Ec 23$$

Se aplica entonces al modelo computacional la velocidad angular (ω) para los rodillos de torre de tracción y para el tubo la velocidad lineal (v). El tubo demora 2 segundos en pasar del paso 15 al 20, así que se realiza la simulación en un espacio temporal de 2.2 segundos, refinando la simulación con steps de 0.1s y substeps máximos de 100. Esto nos asegura que no haya problemas de convergencia. Además, se activa la opción de guardar cada step con su último substep, ya que dado el caso de tener problemas poder refinar los pasos temporales y continuar con la simulación sin necesidad de iniciar de nuevo. Por último, se calcula las deformaciones totales del tubo y los esfuerzos de Von Mises.

6 Resultados

6.1 Diseño de rodillos

Se realizan planos para cada uno de los rodillos de la sección “sizing”, en donde se puede obtener información para fabricación de los rodillos, además de la separación entre ejes, esto último con el propósito de guiar al operario en el montaje y calibración de la máquina. Estos planos son ahora documentación de la empresa AAMetals S.A.S.

Tabla 5. Distancia entre ejes de rodillos.

PASO	DISTANCIA ENTRE EJES (Pulg)
15	4.594
16	5.656
17	4.657
18	5.656
19	4.657
20	5.656

Se observa en la flor de formación (ver Figura 20) una secuencia suave y contante y el diseño de los rodillos cumplen con el estándar de fabricación, por esta razón se procede a comprobar su comportamiento mediante el análisis de elementos finitos.

6.2 Análisis de elementos finitos

6.2.1 Calidad de malla

Se evalúa la calidad de malla antes de empezar la simulación, teniendo en cuenta los parámetros de calidad presentados en el capítulo de Marco teórico (0), con el fin de asegurar un adecuado calculo, y evitar datos no confiables a causa de una mala discretización del sistema.

A continuación, se presentarán los valores en donde se encuentra la malla tanto de los rodillos y el tubo para el caso del Jacobian Ratio:

También se genera la tabla de valores para el parámetro Orthogonal Quality:

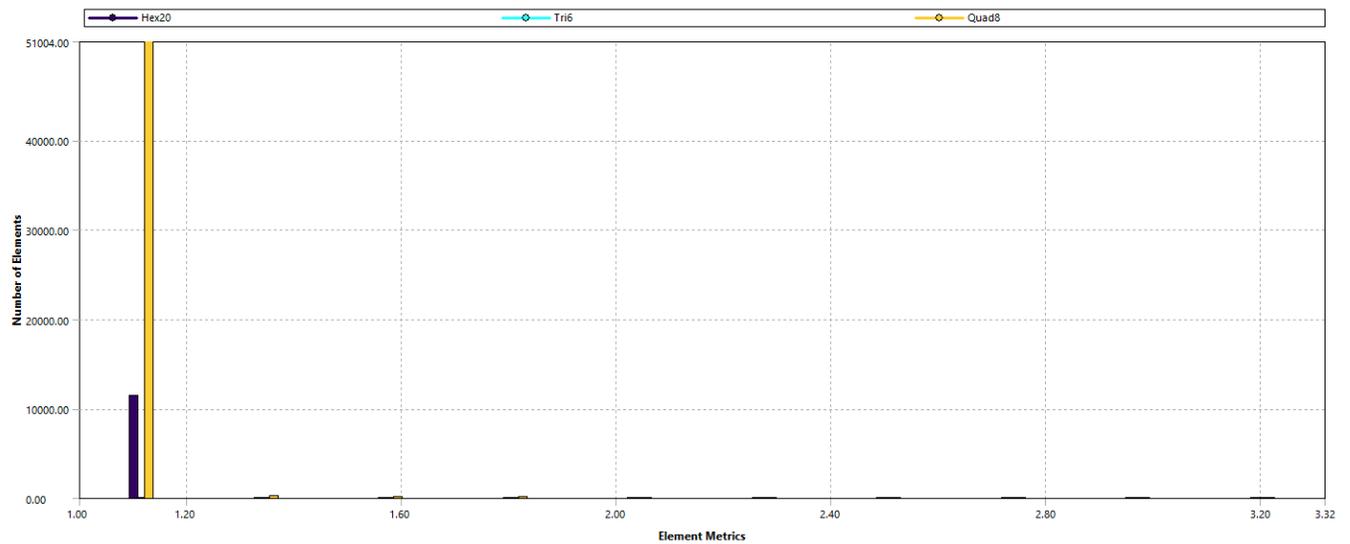


Figura 26. Valores del Jacobian Ratio para la malla (Tabla generada por el software Ansys).

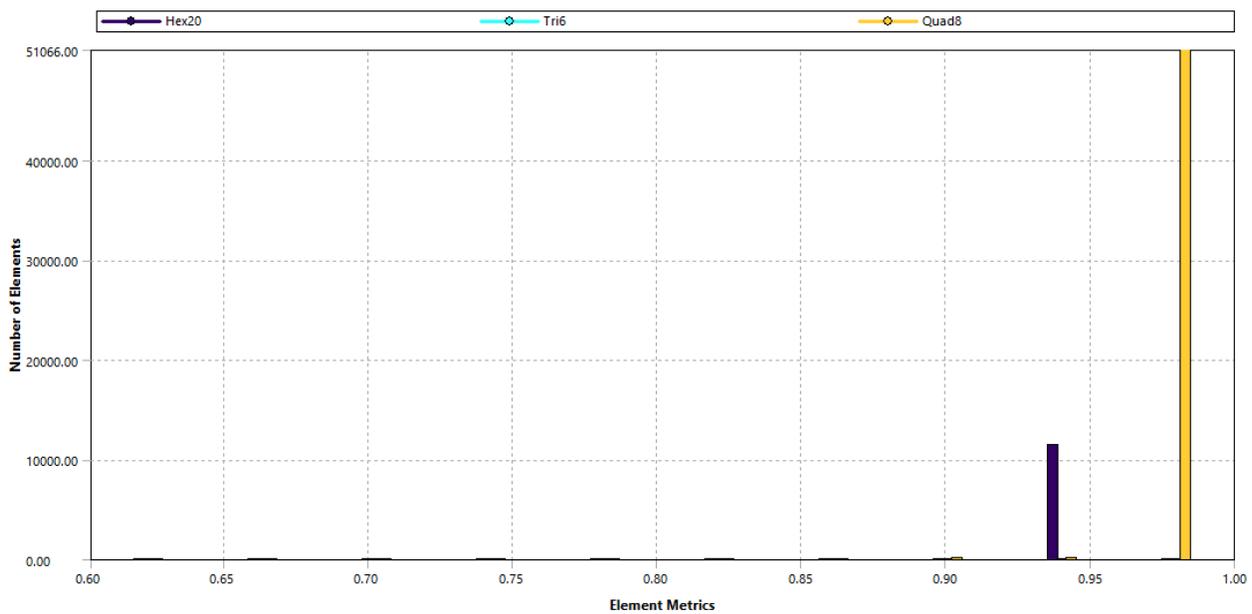


Figura 27. Valores de Orthogonal Quality para la malla (Tabla generada por el software Ansys).

Y por último se comprueban los valores que presentan los rodillos y el tubo para el parámetro de “aspect ratio”:

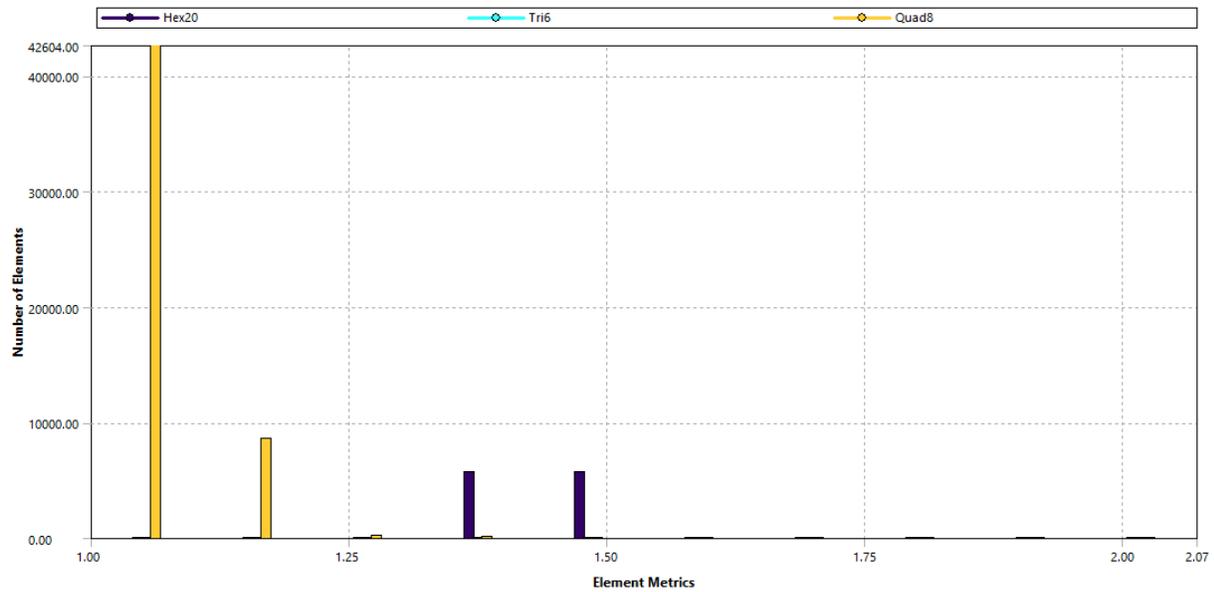


Figura 28. Valores de Aspect Ratio para la malla (Tabla generada por el software Ansys).

Estos valores se compararon con los límites permitidos para cada uno de los parámetros.

Tabla 6. Evaluación de parámetros de calidad para la malla.

PARAMETRO	RRANGO ACEPTADO	VALOR MAXIMO EN DISCRETIZACION	ESTADO
JACOBIAN RATIO	< 2	1.81	CUMPLE
ORTHOGONAL QUALITY	> 0.15	0.624	CUMPLE
ASPECT RATIO	< 10	2.02	CUMPLE

Como se observa en la Tabla 6 la malla aplicada a nuestro sistema cumplió con los tres parámetros, teniendo con un rango de tolerancia alto, esto nos asegura que la simulación se desarrollara de manera más optima en lo que respecta a interacciones entra las mallas y nos aseguramos de que en caso de divergencia no sea causa de un mallado inadecuado que problemas en cálculos.

6.2.2 Esfuerzos en el proceso de formación.

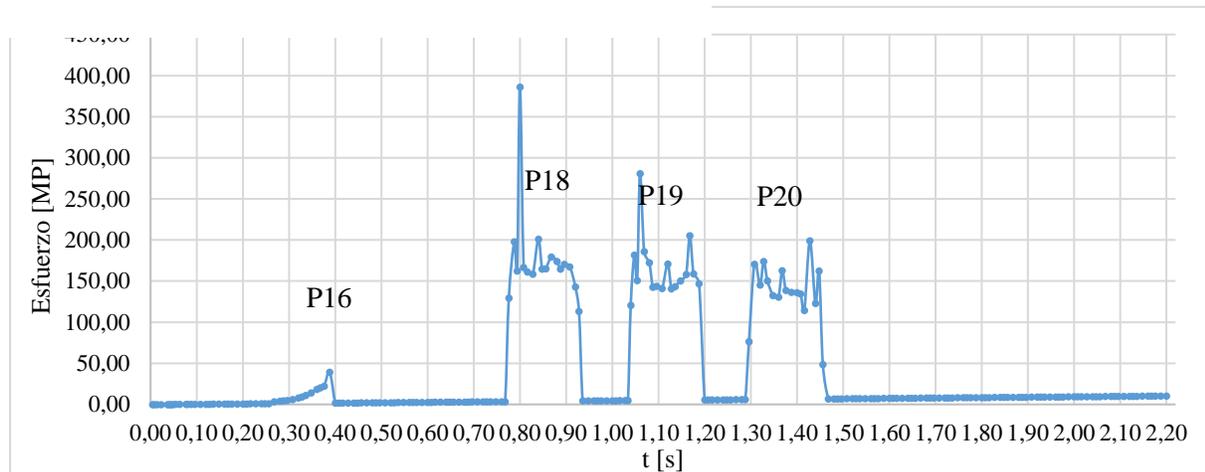
Se obtiene una simulación exitosa arrojando valores reales y sin problemas de divergencia esto debido en gran parte al refinamiento del paso temporal de la simulación, puesto que a más iteraciones de cálculo más precisa será la simulación y menos probabilidad de que la posición del

tubo cambie demasiado entre un paso temporal y otro, evitando así penetración entre las dos superficies en contacto, en nuestro caso la tubería con los rodillos. Sin embargo, refinar mucho el paso temporal se traducirá en más tiempo de procesamiento computacional.

El comportamiento de la simulación se presenta en un video el cual se puede encontrar en el enlace adjuntado en los anexos. En este se observa claramente el comportamiento del tubo y de los rodillos durante toda la simulación. Así pues, se observan en la sección del sizing los rodillos de torres verticales girando desde un comienzo a causa del sistema de tracción y los rodillos de torre laterales moviéndose cuando entran en contacto con el tubo. Esto nos confirma que el planteamiento del sistema fue el adecuado y que la simulación se comporta como esperábamos. En la segunda sección del video se presenta el contorno con colores del azul al rojo, de los esfuerzos generados en el tubo a través del paso por los rodillos, dándonos a entender que los herramientas si le están aplicando la energía suficiente para deformar el tubo.

El resultado de los esfuerzos máximo de Von Mises generado en el tubo se presentan a continuación:

Tabla 7. Esfuerzos en el tubo a través del tiempo.



*P es el paso por el que está atravesando el tubo en ese momento del tiempo.

*Datos obtenidos por la simulación en Ansys.

En la tabla se puede ver claramente los puntos en donde los esfuerzos en el tubo son los mayores, esto representa el momento en que el tubo entra en contacto con los pasos de tracción, con un pico de deformación al inicio del contacto y luego se estabiliza en los valores de deformación del tubo.

En la gráfica se presentan 4 puntos en donde el esfuerzo es diferente a cero. El primero y menos representativo, es el paso 16, el cual corrige las deformaciones no esperadas en la soldadura por las temperaturas altas, estos esfuerzos en la práctica pueden ser mucho mayores debido a situaciones que no tomamos en cuenta en la simulación, entre estos esta una mala calidad de soldadura, tamaño diferente al debido luego de salir del forming y deformaciones mayores por temperatura. El segundo es el paso 18, este presenta el valor más grande de esfuerzo. El cual es analizado a continuación. El tercero es el paso 19, el cual es un paso vertical, se observa un comportamiento no esperado ya que no se contaba que un paso vertical que no presenta tracción le aplicara esfuerzos significativos al tubo y mucho menos valores tan similares al de los esfuerzos de rodillos de tracción. El cuarto es el paso 20 el cual deja la medida final del tubo. En general se observa que en todos los pasos verticales el esfuerzo supera el límite elástico del material (ver Tabla 2) lo que corrobora la deformación del tubo esto se puede observar en el video, el link de este está en la sección de anexos.

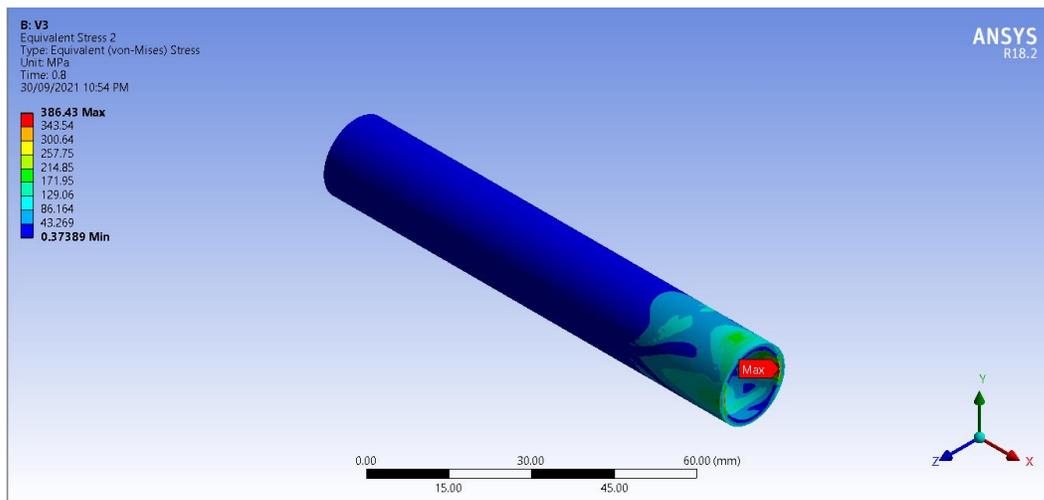


Figura 29. Esfuerzo máximo en el tubo. Paso 18

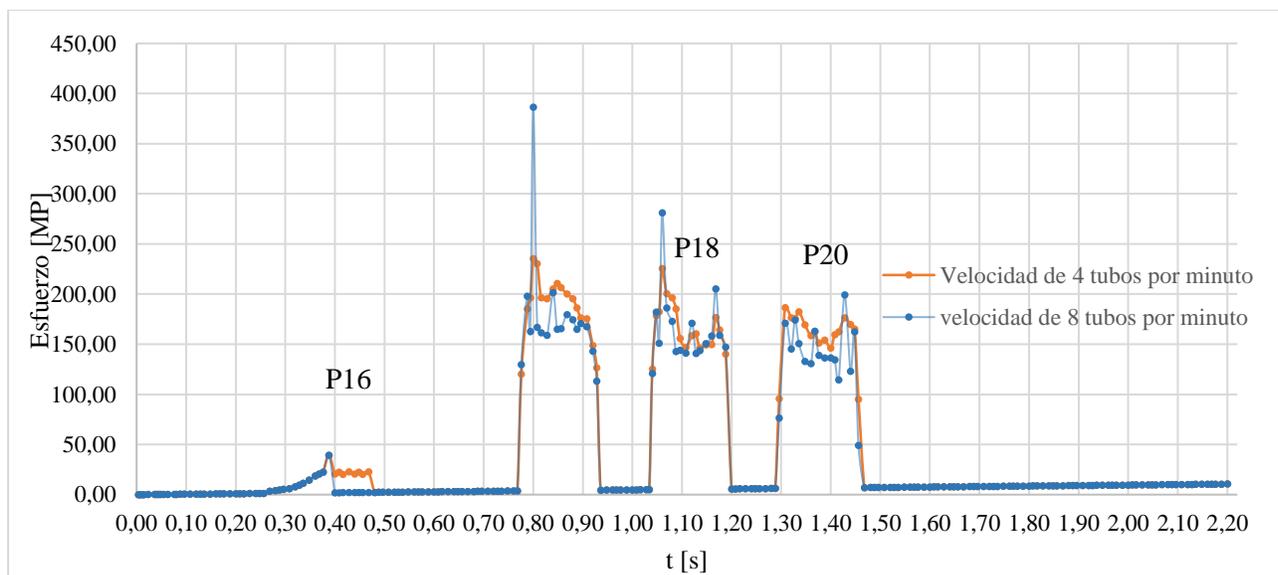
El valor más alto obtenido para el esfuerzo de deformación es de 386.43 MPa siendo este superior al esfuerzo a la rotura del material el cual es de 310 MPa, este pico de valor se obtuvo en el momento que el tubo estaba entrando al paso 18. Se presenta una de las posibles razones de desprendimiento de material y aparición del grano en los rodillos que causan rayones en el tubo durante el proceso. Sin embargo, en Tabla 7. Se observa una disminución de los valores luego del pico, en el momento que el tubo está atravesando los rodillos, con valores cercanos a 200 MPa el

cual es el valor de deformación plástica, haciendo posible la deformación permanente de las medidas del tubo.

Se cree que la velocidad angular de los rodillos con un valor de 12.618 rad/s al comenzar la deformación del tubo en el primer contacto entre el tubo y los rodillos genera un sobre esfuerzo en la arista del tubo (ver Figura 29). Por lo que se plantea una simulación con una la velocidad de producción de 4 tubos por minutos, la mitad de la anterior, en consecuencia, el valor de la velocidad angular de los rodillos para este caso es $\omega = 6.309 \frac{rad}{s}$.

A continuación, se presenta la Tabla 8 de los esfuerzos de Von-Mises para los dos casos de velocidades evaluadas:

Tabla 8. Comparación de esfuerzos de von-mises para los dos casos de velocidades.



*P es el paso por el que está atravesando el tubo en ese momento del tiempo.

*Datos obtenidos por la simulación en Ansys.

Como se esperaba, los valores máximos en cada paso disminuyeron significativamente, en el caso del paso 18, el valor de esfuerzo máximo paso de 386.43 MPa a 256.89 MPa, encontrándose ahora en el rango de deformación plástica sin superar el esfuerzo máximo de rotura (310 MPa). Esto debido al comportamiento que se presenta en el sistema, en donde el primer contacto entre la arista y los rodillos es repentino y de altas concentraciones de esfuerzos que evidentemente no se pueden distribuir bien hacia todos los alrededores del material porque no se tiene materia delante de la arista (ver Figura 29). Al bajar la velocidad angular, al momento de contacto entre los materiales se favorece la deformación plástica dando tiempo al material de distribuir los esfuerzos.

En todos los pasos disminuyo el valor máximo de esfuerzo, además son mas constantes los valores de deformación durante todo el recorrido del tubo por los rodillos, presentándose menos sobresaltos y caídas de valores de esfuerzo.

A pesar de que la empresa produce 8 tubos por minuto, esto no significa que se van a tener problemas de máximos esfuerzo, por lo expuesto en el párrafo anterior, solo se necesita reducir la velocidad de producción cuando se va a inicial la fabricación de tubos ya que es el momento en que se tiene arista en el tubo que entran en contacto con los rodillos, luego de comenzar la producción la fabricación de tubos en continua.

6.2.3 Medida del tubo

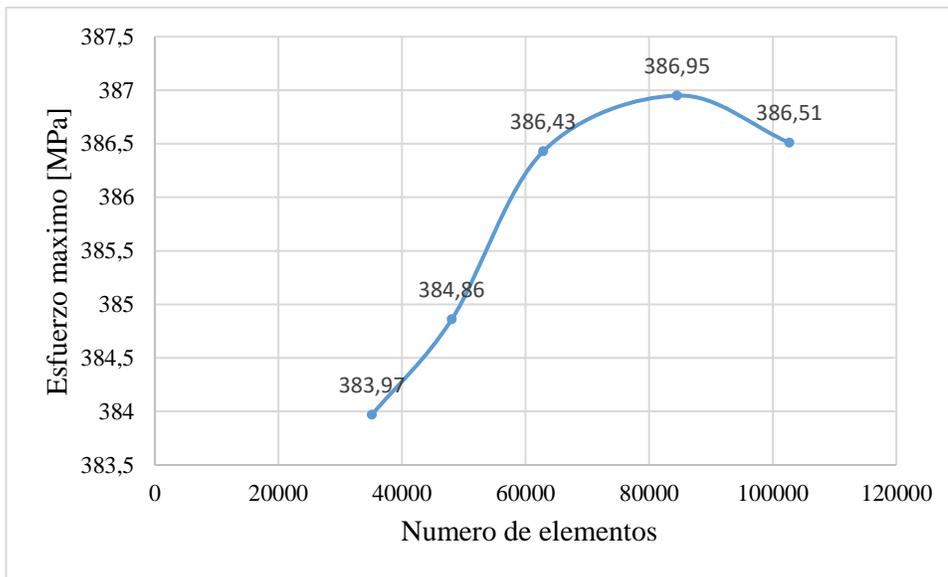
El tubo tiene un diámetro exterior de 0.660 pulg al momento de entrar al proceso de formación en la sección del sizing. A través de la simulación se determinó que el tubo sale con un diámetro exterior de 0.624 pulg, cumpliendo con los estándares de calidad exigidos para la fabricación de este tubo. En síntesis, se determina que el diseño de los rodillos de formación presentes en la empresa AAMetals S.A.S es adecuado para el proceso y cumplen su función de manera satisfactoria, dejando como producto final un tubo circulas de 5/8" con los estándares deseados, en los anexos se adjuntan los planos de fabricación para estos rodillos.

6.2.4 Independencia de malla

En método de elementos finitos, la discretización del sistema tiene una influencia trascendental en el cálculo del problema, esto debido a que los cálculos se generan en los elementos mallados. Tener muy pocos elementos puede generar imprecisiones en los resultados y realizar un mallado muy grande puede incurrir en gastos de tiempo computacional innecesarios. Por esta razón se presenta un análisis de malla en donde se observe la independencia de los resultados sobre este parámetro.

Se realizan 5 simulaciones desde una malla muy burda a una considerablemente fina, a continuación, se presenta una tabla con los valores del esfuerzo máximo obtenido en relación con el número de elementos en la malla.

Tabla 9. Independencia de malla.



Se observa un crecimiento del valor de esfuerzo máximo Von-mises que para de crecer desde los 60.000 elementos con el pico de mayor valor en los 85.000 elementos. El comportamiento nos deja concluir que a partir de los 60.000 elementos la malla deja de ser un factor que afecte significativamente el comportamiento de la simulación.

7 Discusión y recomendaciones

En las simulaciones de elementos finitos realizadas a la sección de “sizing”, se presenta un esfuerzo máximo en el paso 18 con un valor de 386.43 MPa, siendo este un valor mayor al soportado por el material, ya que el valor del esfuerzo último del acero cold roll grado 3 es de 310 MPa (ver *Tabla 2.*), sin embargo al presentarse este valor al inicio del contacto entre el rodillo y el tubo y teniendo en cuenta que luego los esfuerzos se reduce significativamente. Se plantea que la razón de esto es la velocidad de contacto entre los dos elementos al inicio de la deformación cuando la arista del tubo entra en contacto con el rodillo, por lo que se realiza una simulación con una velocidad de producción de 4 tubos por minutos, la mitad a la anterior. Dando un valor de la velocidad angular de los rodillos para este caso es $\omega = 6.309 \frac{rad}{s}$. Se encuentra que los valores máximos de esfuerzo disminuyen significativamente, y estando todos por debajo del valor para rotura.

En cuanto al diseño de los rodillos, los presentes en la empresa AAMetals S.A.S. cumplen con los estándares y parámetros de diseño como se presentó en los resultados, además la simulación muestra un comportamiento en los esfuerzos adecuado para la deformación de manera exitosa del tubo.

Teniendo en cuenta el diseño de rodillos y su comportamiento, se analizan posibles razones para que se generen problemas en la calidad del tubo. Entre las más importante es la velocidad relativa entre el tubo y los rodillos, si en el proceso de formación se presenta velocidad relativa entre estas dos partes, se creará un desgaste por fricción que causará desprendimiento de material del tubo y generará granos en los rodillos. Por consiguiente, se propone, medir y hacer seguimiento con sensor a la velocidad con la que giran los rodillos en estos pasos. Las velocidades de todos los rodillos deben ser la misma ya que todos pertenecen a la sección de “sizing”.

Para el análisis por elementos finitos la disposición y montaje de los rodillos usados en la simulación es la ideal. Lo que significa que no se tiene en cuenta deformaciones y desalineaciones en los ejes, (ver Figura 30), desgaste en las torres y fallas en el sistema de transmisión de potencia. Se sugiera a la empresa hacer un análisis dimensional y levantamiento de planos en campo de estas piezas en el proceso de “sizing”.

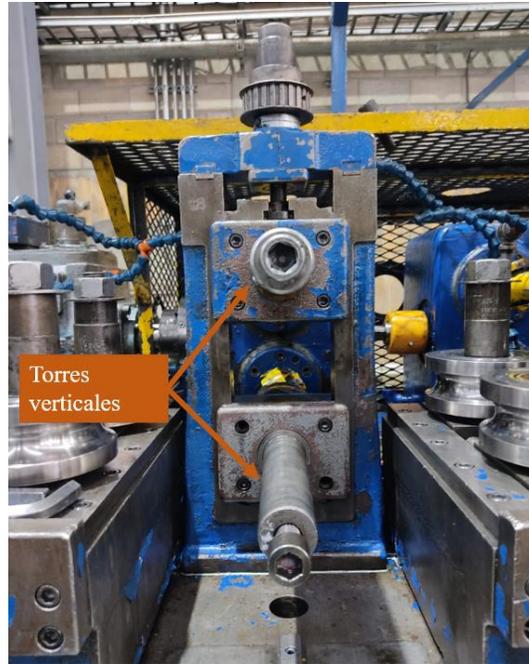


Figura 30. Alineación de ejes para torres de tracción, paso 18.

La Figura 26. Valores del Jacobian Ratio para la malla (Tabla generada por el software Ansys). Figura 30 presenta la disposición de los ejes de las torres verticales, en este caso se puede estar presentando de alineación entre el eje superior y el inferior que afectaría el comportamiento de los rodillos.

Por último, en la empresa AAMetals S.A.S cuenta con una guía de montaje y desmontaje de herramienta, pero esta no cuenta con medidas estandarizadas de posicionamiento de los rodillos, es decir la separación entre un rodillo y otro en cada paso, este proceso se hace de una forma intuitiva y con una metodología de acierto y error, en donde se da menos importancia a los rodillos laterales ya que no generan tracción. Sin embargo, son muy importantes en el proceso para mantener la medida de formación y que el springback no aumente los esfuerzos en los siguientes pasos. No tener claro una guía y un punto de posición en los rodillos al momento de partida se traduce en más tiempo invertido en montaje y calibración, además se genera mayor material no conforme. Por esta razón en la sección de *Resultados* se expresa la distancia que debe tenerse entre ejes para que el tubo pase y adquiera la medida indicada para que los rodillos laterales y de tracción hagan su función de la manera más óptima (Ver Tabla 5.).

8 Conclusiones

Se identifica la sección del proceso de formado en la cual enfocaremos el estudio y análisis por medio del método de elementos finitos, la sección a estudiar fue el “sizing”. Esta le da la forma final al tubo y de la cual dependerá que las medidas cumplan con los estándares de calidad. Se toma esta decisión debido a que se han presentado problemas continuos en este proceso como son: grano en los rodillos, rayas en el tubo y medidas fuera de los estándares exigidos.

Se parametrizaron y modelaron en el software Inventor los rodillos presentes en la empresa AAMetals S.A.S para la referencia de tubo circulas 5/8”, con el fin de establecer su progresión geomática y desarrollar la flor de formación de la sección del “sizing”. Además, se presenta a la empresa los planos de los rodillos pertenecientes a los pasos del 15 al 20. Se encuentra que los rodillos están dentro de los parámetros de diseño y cuenta con los estándares para el desarrollo de la referencia de tubo.

Se evidenció por medio del análisis de elementos finitos la efectividad del diseño de los rodillos, concluyendo que los picos más altos de esfuerzos se presentan cuando se van a tocar por primera vez el tubo. A velocidad de producción de 8 tubos por minuto, el esfuerzo máximo generado es 386.43 Mpa y supera esfuerzo de rotura, se realizan simulaciones con una velocidad de producción de 4 tubos por minuto y se encuentra que el esfuerzo máximo se reduce significativamente favoreciendo la óptima formación del tubo, por lo menos al inicio del proceso donde la arista inicial del tubo entra en contacto con los rodillos. La empresa empieza el proceso con una velocidad menor a 4 tubos por minuto, así que no se tienen problemas de sobre esfuerzo en las aristas.

En síntesis, los rodillos aplican la energía necesaria para realizar un esfuerzo constante que deforma el tubo en toda su longitud y su diseño permite dejar el perfil con las medidas exigidas por los estándares de calidad.

Se presenta la tabla de distancia entre ejes en cada paso del sizing, para agregar a la guía de monta de herramental ya presente en la empresa AAMetals S.A.S, lo que permite un apropiado posicionamiento de los rodillos, asegurando una adecuada distribución de los esfuerzos en toda la sección. Además, se realizan los planos de cada rodillo para los pasos de la sección de sizing, con el fin de enriquecer la información que se tiene de la formadora de tubos y adjuntarse a la base de datos de la empresa para la fabricación de un nuevo repuesto de cada rodillo.

Referencias

- Moreno Aumaitre, D.E. (2005). *Diseño de rodillos para la fabricación de tubos con costura de 80mm de diámetro externo*. (Bachelor's thesis, Ingeniería mecánica)
- Santa Urrea, E. J. (2008). *Diseño y desarrollo de una nueva línea de productos basada en el principio de rollforming mediante el desarrollo de una flor (o rodillos de arrastre), para la empresa Algamar SA* (Bachelor's thesis, Ingeniería de Diseño de Producto).
- Documentación interna de la empresa. (2021)
- Cheng, J., Cao, J., Zhao, J., Liu, J., Zhao, R., & Liu, S. (2020). *The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process*. *Thin-Walled Structures*, 154, 106809.
- Chen, W., Jiang, J., Li, D., Zou, T., & Peng, Y. (2019). *Flower pattern and roll positioning design for the cage roll forming process of ERW pipes*. *Journal of Materials Processing Technology*, 264, 295-312.
- Rahardja, A. Z., Chumaidiyah, E., & Tripiawan, W. (2019, May). *Feasibility Analysis on the Development of Steel Sheet Zinc Plated and Galvalum Production Factory PT. S Steel*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 528, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- Halmos, G. T. (2005). *Roll forming handbook*. Crc Press.
- Kim, N. H., Sankar, B. V., & Kumar, A. V. (2018). *Introduction to finite element analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Ramírez Sánchez, J. M. (2018). *Análisis aerodinámico de una hélice bipala 17x5 (17" de diámetro y 5" de paso de avance) de un vehículo aéreo no tripulado del tipo cuadricóptero para incrementar la eficiencia de vuelo vertical*. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*.
- Avilés, R., Ajuria, G., & Bilbao, A. (1998). *Metodos para la Resolucion del Problema no lineal de Equilibrio Estatico en Sistemas Multicuerpo*. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 203-224.

Anexos

Link del video: Resultado de la simulación de elementos numéricos, pasos de la sección “sizing”, Roll Forming. UdeA: <https://www.youtube.com/watch?v=8m9ZVscqaTM>