

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE CHIMENEAS DE VENTEO DE GAS O FLARES PARA AUMENTAR SU VIDA ÚTIL

Steimbregger, Ceferino ^{(1)*}; Urtasun, Bautista ⁽¹⁾; Poliserpi, Mariana ⁽¹⁾⁽²⁾; López, Ezequiel ⁽¹⁾⁽²⁾;
Lassig, Jorge ⁽¹⁾; Valle Sosa, Juan J. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400 (8300), Neuquén, Argentina.

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

*Correo electrónico (autor de contacto): cefesteim@gmail.com

Eje temático: 4. Diseño, Construcción, Materiales y Revestimientos; 4.2 Selección de Materiales. Aplicaciones.

Sinopsis

El diseño adecuado de *flares* o chimeneas de venteo es esencial para proteger la estructura del calor generado por la llama y garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Estas chimeneas permiten una combustión controlada de los gases residuales del proceso de extracción de hidrocarburos, mediante una llama piloto situada en la punta. En condiciones normales de operación, y con la selección del material adecuado, el metal de la estructura soporta las temperaturas generadas por la llama sin degradarse significativamente. Sin embargo, la interacción entre el viento y la llama provoca fenómenos conocidos como *flame impingement*, *flame downwash*, *lapping* o *lapdown*, que producen un calentamiento desigual en la parte posterior de la estructura, en dirección descendente al viento predominante (sotavento). Este efecto ocurre incluso cuando se cuenta con un *windshield* o protector aerodinámico, ya que algunos diseños no evitan que la llama se desvíe hacia la estructura, aumentando el riesgo de daño térmico. La exposición prolongada a estas altas temperaturas degrada progresivamente el material en la punta del *flare*, acortando su vida útil y elevando el riesgo de fallas estructurales, problemas detectados en instalaciones de la región Vaca Muerta. Para abordar esta problemática, se combinaron simulaciones fluidodinámicas (CFD) que permitieron modelar el comportamiento de la llama bajo diversas condiciones de flujo de gas y viento, con análisis termomecánicos por elementos finitos que analizaron la respuesta del metal al calentamiento y la degradación. Los resultados, validados mediante un caso real de falla de la industria, demostraron que la interacción entre viento y llama es fundamental en la formación de zonas con temperaturas elevadas. Complementariamente, se realizaron ensayos a escala en un túnel de viento para observar el comportamiento de la llama bajo distintas condiciones, lo que facilitó la evaluación y mejora del diseño del *windshield*. La optimización de su geometría contribuye a reducir la desviación de la llama y a distribuir el calor de manera más uniforme, lo que puede minimizar el riesgo de sobrecalentamiento, extender la vida útil de la estructura y mejorar la seguridad operativa en este tipo de instalaciones.

Introducción

La explotación de hidrocarburos en Argentina registra una expansión continua, motivada principalmente por el incremento en la producción de reservorios no convencionales (*shale*). Este desarrollo productivo pone de manifiesto la necesidad de avanzar en tecnologías, diseños y materiales especializados para afrontar las demandas operativas cada vez más rigurosas. En la actualidad, se operan pozos de profundidades extremas, temperaturas y presiones elevadas, ambientes altamente corrosivos (H₂S/CO₂), colonización microbiológica (MIC), abrasión significativa por sólidos y la exigencia de mantener tasas de producción por encima del umbral económico mínimo, entre otros desafíos. En este contexto, adquiere prioridad tecnológica el

diseño de equipos y protocolos de manufactura que garanticen el desempeño previsto y se integren con las tecnologías prevalentes en la Cuenca Neuquina.

A pesar del avance en la ciencia de materiales respecto a nuevas aleaciones metálicas y no metálicas con propiedades superiores a los materiales normalmente empleados, el acero prevalece como el metal por excelencia en la industria del O&G. Con el desarrollo de Vaca Muerta, se evidencia la necesidad de incrementar la capacidad operativa de los equipos estándar que, en muchos casos, operan al límite de sus capacidades para poder dar respuesta a la demanda creciente de hidrocarburos. Estas condiciones promueven fallas imprevistas en componentes mecánicos, generando la urgencia de abordar las averías recurrentes. Resolverlas minimizaría no solo el impacto ambiental y en el personal, sino también las pérdidas económicas por paradas no programadas.

Entre los componentes de interés, se encuentran las antorchas o chimeneas de venteo de gas (*flares*). Estos elementos son el último eslabón de seguridad en el sistema de venteo de gas de una refinería o planta de tratamiento de petróleo. La norma API 537 [1] define a los *flares* como un componente mecánico crítico de un diseño de sistema completo, destinado a la descarga, combustión y desecho seguros, confiables y eficientes de hidrocarburos procedentes de sistemas de alivio de presión y despresurización de vapor. En términos generales, se utilizan para convertir vapores inflamables, tóxicos o corrosivos, en compuestos menos nocivos por medio de una combustión [2]. La descarga directa debe evitarse debido a riesgos ambientales, a las personas y las instalaciones. En el caso de la industria hidrocarburífera, la liberación del gas del proceso productivo se realiza en situaciones de emergencia, mantenimiento o bien sobreproducción. El hidrocarburo combustiona en la punta por la acción del piloto, por lo que el material del *flare* está sometido a temperaturas elevadas y a ambientes corrosivos [3-6]. En particular, la llama puede presentar temperaturas mayores a 1200 °C en la zona central [7]. Sin embargo, en condiciones normales de funcionamiento, esta temperatura no debe generar un calentamiento del metal de la antorcha que comprometa su resistencia mecánica, registrándose vidas útiles superiores a los diez años. Las altas temperaturas pueden generarse en la punta cuando la llama es deflectada hacia abajo debido a la formación de zonas de baja presión inducidas por interacción del viento con la estructura de la antorcha. Este fenómeno se conoce como *flame impingement*, *flame downwash*, *lapping* o *lapdown* [3, 4, 6, 7], y se ve favorecido por bajas velocidades del gas relativas a altas velocidades de los vientos [2]. Para minimizar este efecto se suele colocar un elemento adicional en la punta (*tip*), conocido como *windshield*, el cual puede no conducir a los resultados esperados si el diseño es inadecuado [7]. El contacto con la llama en la orientación “corriente abajo” de la dirección del viento predominante genera un calentamiento preferencial del material del *tip*. La Figura 1a presenta el efecto del caudal de gas en las temperaturas del metal de un *flare* con diseño específico [3]. Nótese que las mayores temperaturas se alcanzan para velocidades bajas de gas, incluso en las zonas medias de la estructura. La Figura 1b ilustra un ejemplo de una bajada de llama observada en una antorcha de $300 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{día}$ con *windshield*.

Como se expresó anteriormente, el daño esperado sobre la estructura no compromete la integridad del componente en condiciones normales de operación, y en plazos razonables de vida útil, aunque sí puede generar inconvenientes en los sistemas de encendido y pilotos, sobre todo cuando ocurre bajada de llama. Las altas temperaturas pueden degradar las cañerías de conducción de gas que llegan a la punta de la antorcha, e impedir el encendido del *flare*. Ello conlleva dificultades operativas, retrasos en los procesos, o incluso situaciones de emergencia que insumen altos costos económicos y eventualmente ambientales. En función de ello, algunos fabricantes de antorchas han modificado sus diseños para que la bajada de llama no dañe estas conexiones, y se asegure la integridad de los pilotos. Sin embargo, los diseños adoptados no influyen directamente sobre el fenómeno de bajada de llama, lo cual sigue siendo un problema para estos elementos. En la región, los vientos frecuentes y de alta intensidad, favorecen la falla de puntas de antorcha por sobrecalentamiento del material. Este problema puede resolverse, o minimizarse, mediante un rediseño del *windshield*. Ello requiere conocer previamente el comportamiento de la llama ante diversas condiciones de flujo de gas y de viento.

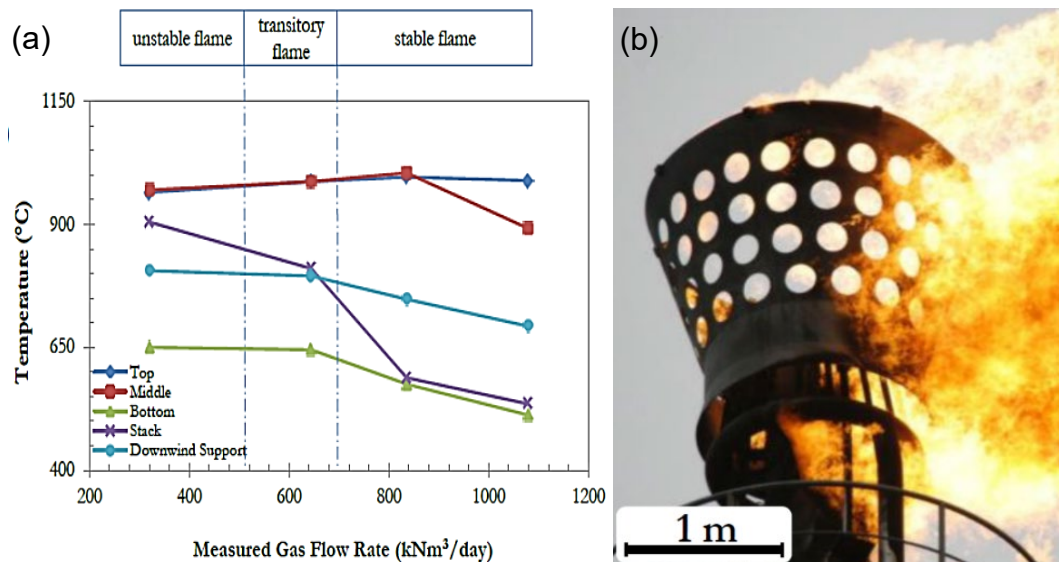


Figura 1: (a) Variación de la temperatura promedio en distintas porciones del *flare*, según el caudal de gas de escape [3]. (b) *Downwash* observado a $300 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{día}$ [3].

En este trabajo, se presenta una metodología de análisis de antorchas de venteo, con el objetivo de evaluar mejoras en los diseños que prolonguen la vida útil del equipo y sus componentes.

Desarrollo

El presente trabajo tuvo su origen en un caso de falla de una antorcha de venteo, la cual presentó deformación plástica severa en la zona media del cuerpo de la punta. De las condiciones operativas y las sollicitaciones involucradas en servicio, no se infieren cargas críticas que puedan generar un daño como el observado en el componente. Si se considera la carga eólica de los vientos de la región, es importante determinar las velocidades predominantes en la zona donde se ubicó el equipo, o regiones cercanas. En la región del Mari Menuco (estación meteorológica cercana a varios yacimientos), la dirección más frecuente de los vientos corresponde a las del sector oeste, coincidiendo con las de mayor intensidad [8]. También se registran vientos intensos entre el oeste y el suroeste [9]. En situaciones meteorológicas adversas, pueden registrarse ráfagas de hasta 33.1 m/s (120 km/h) [8]. Considerando una velocidad moderada actuando sobre el área proyectada del *flare*, la presión sobre la estructura ronda los 1.5 kPa, en condiciones completamente elásticas. Estos cálculos pueden diferir levemente dependiendo de la metodología adoptada [10-12]. Para que ocurra deformación plástica, las cargas debido al viento deben superar los 250 kPa, un valor ampliamente superior, que se corresponde con velocidades de viento imposibles. El peso propio de la estructura contribuye levemente en los cálculos anteriores.

Similarmente, se determinaron las cargas críticas del viento asociadas a los primeros modos de pandeo, los cuales se aprecian en las Figuras 2a y 2b. Para la carga de viento aplicada en la parte posterior de la imagen, la deformación está en el sotavento. Estos resultados se traducen en valores de la velocidad de viento extremadamente elevados. Adicionalmente, se realizó un análisis no lineal con imperfecciones geométricas (análisis de bifurcación lineal (LBA)), para considerar el comportamiento elastoplástico del material. La estimación de cargas críticas de pandeo elástico se realizó mediante un análisis de autovalores y autovectores para estructuras en las que la respuesta pre-crítica es casi "lineal". La carga crítica se calcula como un multiplicador del estado de carga base. Estos resultados se muestran en la Figura 3a, junto con la deformación real de la punta de antorcha en la Figura 3b. Si bien los resultados no reproducen la posición exacta de la falla, muestran una geometría similar al caso analizado. Sin embargo, las cargas necesarias para generar esa deformación tampoco se condicen con las condiciones de operación del equipo y las condiciones meteorológicas de la zona.

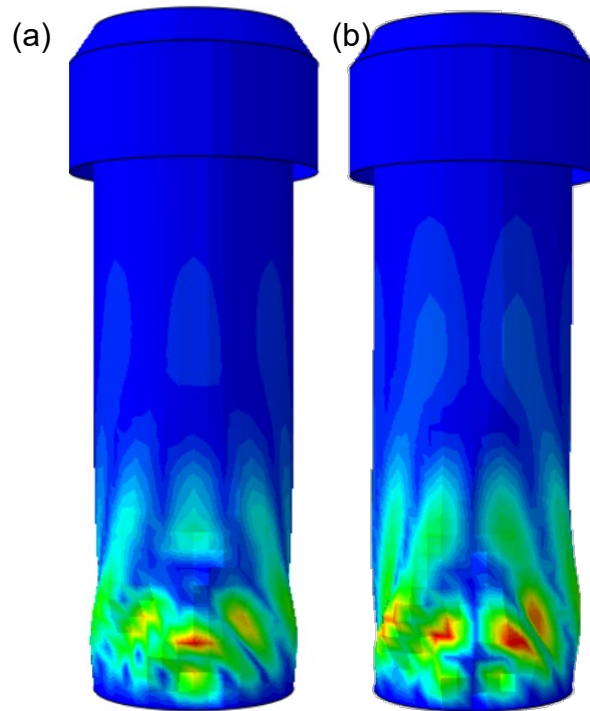


Figura 2: (a) Primer modo de deformación. (b) segundo modo.

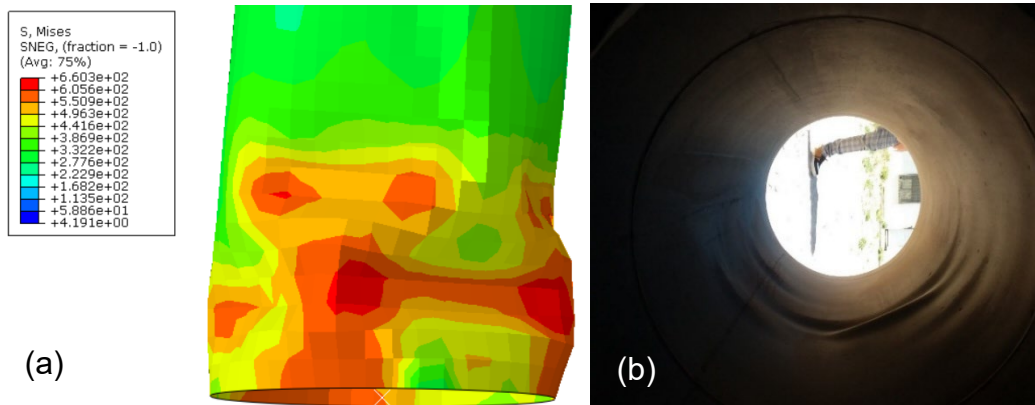


Figura 3: (a) Tensión de Von Mises y deformación de la antorcha según el análisis de bifurcación lineal (LBA). (b) Deformación real observada en el componente.

Estos resultados muestran que las solicitaciones actuantes sobre la estructura no logran explicar la deformación observada en la punta de antorcha. En tal sentido, el fenómeno de bajada de llama puede aumentar la temperatura de trabajo del *flare*, lo cual se encuentra ampliamente documentado [3, 4, 6, 7]. Asimismo, el servicio prolongado a estas temperaturas puede alterar las características microestructurales del material de la antorcha y, en consecuencia, su respuesta mecánica [5]. Esto fue confirmado en el análisis del material del componente, el cual corresponde a un acero inoxidable del tipo AISI 310. El análisis metalográfico evidenció una degradación de la microestructura, como se aprecia en las Figuras 4a y 4b, para distintos aumentos. En particular, se observó la precipitación de fases perniciosas que, junto con el teñido térmico de la estructura, permitieron inferir gradientes térmicos en la pieza. Complementariamente, los ensayos mecánicos mostraron baja ductilidad en las zonas más dañadas. En función de la degradación microestructural, se construyó un mapa de temperaturas potenciales de la estructura durante el servicio. Esto se aprecia en la Figura 5, junto con la ubicación del daño en la estructura, y la orientación cardinal del equipo. La gran cantidad de carburos observada en los bordes de grano sugiere una temperatura de servicio por encima de 650°C. Bajo estas condiciones, es factible también la formación de fase sigma en el acero, la cual puede conducir a microestructuras frágiles y pérdida de ductilidad luego del enfriamiento [5,13, 14].

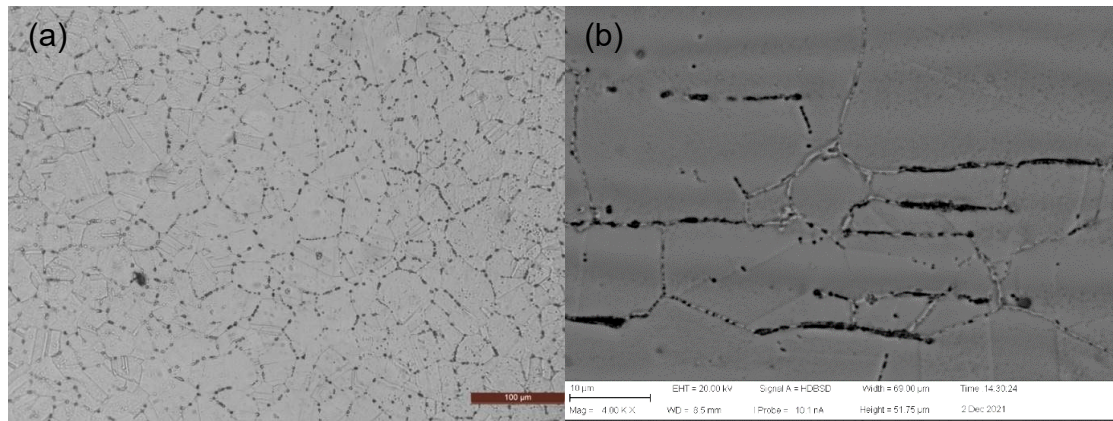


Figura 4: Microestructura del acero AISI 310 con precipitación de carburos. (a) 200X y (b) 4000X.

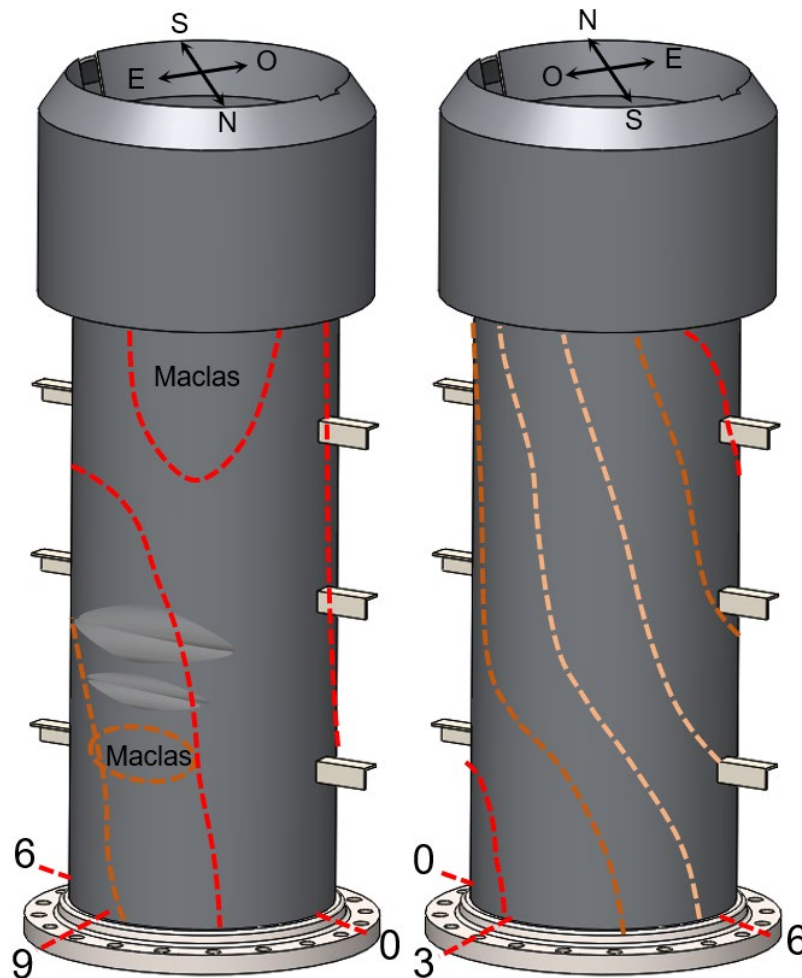


Figura 5: Distribución de temperaturas inferida a partir de la degradación microestructural.

Un debilitamiento del material con la temperatura puede favorecer la falla en la zona observada. Este análisis se llevó a cabo en el modelo de elementos finitos de la antorcha, mediante la introducción de un gradiente térmico teórico. El modelo constó de un *step* inicial de precarga del peso propio y un segundo *step* de tipo *Riks* no lineal en donde se incorporó el efecto de la carga del viento.

Se asumió que la llama incide sobre el *windshield* y abarcaba aproximadamente un 60% de la extensión del tubo en dirección de la brida. Con un máximo de 1000°C en la punta de la antorcha que disminuye a temperatura ambiente en dirección diametralmente opuesta. Los resultados se exhiben en la Figura 6, para la deformación plástica equivalente.

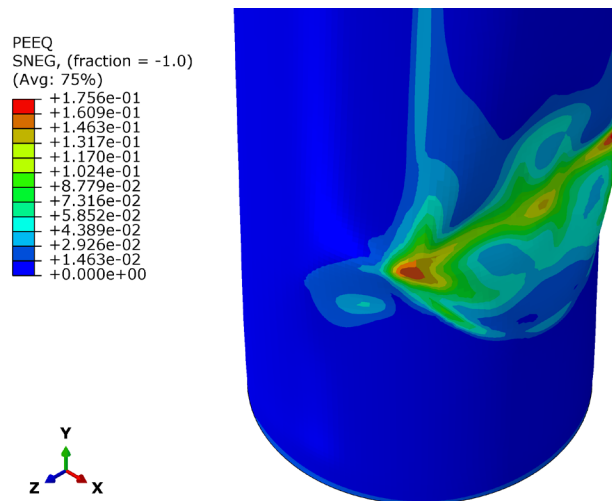


Figura 6: Deformación plástica equivalente en la punta de antorcha.

En los resultados de la Figura 6 se observa una deformación localizada en la zona media del *flare*, lo cual guarda mayor similitud con la falla encontrada en el componente. Los modelos anteriores no logran reproducir la deformación en la parte central, dado que no consideran la variación de las propiedades mecánicas del material con la temperatura. La variación de los parámetros de entrada del modelo permitió reconocer que los modos de pandeo y la respuesta estructural del componente se modifican con el efecto de la temperatura siendo dependientes de la geometría del perfil térmico y los valores máximos asumidos.

El estudio realizado precedentemente permitió validar una metodología de análisis termomecánico con un caso real de falla. Asimismo, se encontró que el aumento de la temperatura de la estructura es necesario para que ocurra una deformación de la forma observada. Sin embargo, no se analizó el fenómeno de bajada de llama que da origen a ese gradiente térmico perjudicial para el desempeño seguro del componente.

Para complementar estos resultados, y evaluar la influencia de las condiciones de operación de la antorcha en la bajada de llama, se realizó una simulación fluidodinámica que contempla la interacción de ésta con el viento. De este modo, es posible alimentar los modelos termomecánicos de la estructura con distribuciones más realistas de temperaturas. La simulación de la llama se realizó empleando el software de código abierto OpenFOAM [15], con *solvers* y herramientas de desarrollo propio, y considerando dominios tridimensionales (3D). El análisis incluyó combustión turbulenta del tipo no-premezclada o difusiva, siendo un caso particular del modelo para resolver combustión parcialmente premezclada [16]. Este modelo se basa en separar la turbulencia del flujo de la química de la reacción, recurriendo al concepto de un frente de llama turbulento compuesto de *flamelets* que queman a la velocidad de quemado laminar. El área de llama por unidad de volumen (FSD, por *Flame Surface Density*) y las fracciones másicas de las especies involucradas en el problema se determinan resolviendo sus respectivas ecuaciones de transporte. La reacción se asume infinitamente rápida e irreversible, mientras que la transferencia de calor por radiación se consideró mediante el modelo P-1 [17], el cual posee un costo computacional relativamente bajo y es especialmente aplicable a medios ópticamente gruesos [18]. La turbulencia se representó aplicando modelos de viscosidad de torbellino para las ecuaciones RANS (*Reynolds-Average Navier-Stokes*), utilizando en particular el modelo $k - \epsilon$ RNG.

En la Figura 7 se ilustra el modelo empleado para la simulación fluidodinámica del viento y la llama. Se empleó una malla con 2 millones de celdas hexa-dominante refinada en la región de la antorcha. En las secciones de entrada se impuso el flujo con velocidad uniforme, con 1 % de intensidad de turbulencia para el aire y 3 % para el gas. Sobre las paredes sólidas se impone la condición de no deslizamiento y leyes de pared estándar para las variables turbulentas. En el resto de las fronteras se impone presión total constante.

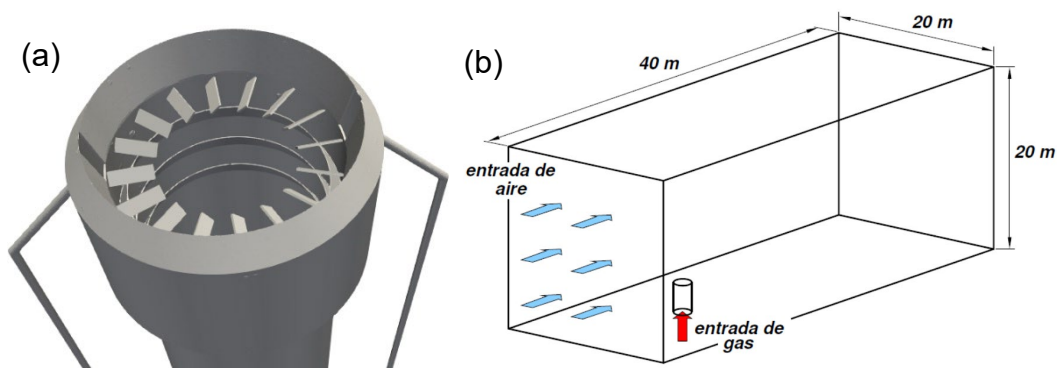


Figura 7: (a) Geometría de la punta de antorcha y (b) volumen de modelo fluidodinámico.

Las Figuras 8a y 8b muestran los resultados para una velocidad del viento de 75 km/h, en donde se observa la deflexión de la llama y la distribución de temperaturas del gas en las paredes del *flare* a sotavento, respectivamente. Nótese la similitud de estos resultados con los gradientes inferidos a partir de la degradación microestructural en la Figura 5.

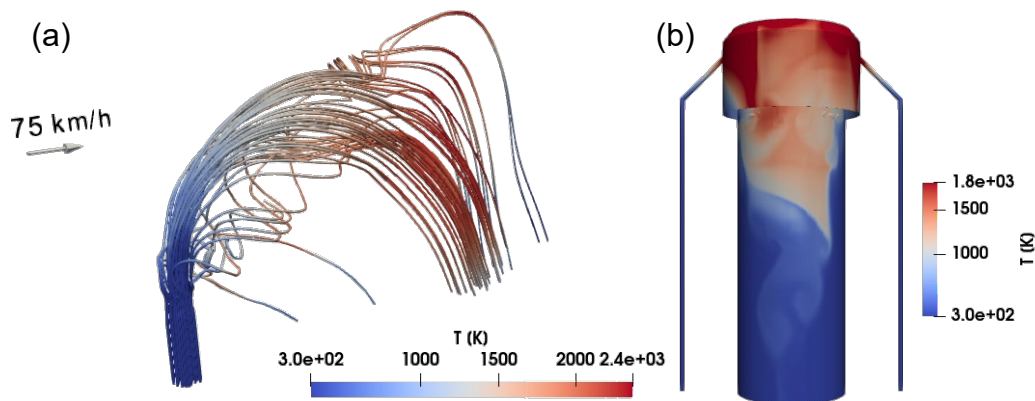


Figura 8: (a) Líneas de flujo del gas de la antorcha para un caudal de 1 millón de m³/día, y una velocidad de viento de 75 km/h. (b) Distribución de temperaturas del gas en las paredes del flare.

Los resultados del análisis fluidodinámico, relativos a la distribución de temperatura y transmisión de calor sirven como datos de entrada para el modelo termo-mecánico del componente. Este modelo se construyó utilizando elementos de cáscara (*shell*), debido a la geometría de los componentes a analizar. Las características de las cargas térmicas y mecánicas demandan necesariamente un modelo 3D elastoplástico que contemple la variación (degradación) de las propiedades mecánicas con la temperatura. Ello puede lograrse introduciendo en el modelo relaciones empíricas entre estas variables, consideradas en los códigos de construcción pertinentes [10, 19], o bien con resultados experimentales específicos que cuantifiquen dichas variaciones para el material analizado, según el caso. Este procedimiento es importante para poder predecir las zonas del componente susceptibles de fallar por deformación plástica o fractura, y compararlas con la evidencia de casos reales. Actualmente, se está desarrollando un dispositivo experimental para poder medir con precisión la deformación durante el ensayo de tracción a temperaturas elevadas. De este modo, los modelos de elementos finitos podrán reproducir la respuesta mecánica de la estructura a través de curvas experimentales a distintas temperaturas, sin la necesidad de emplear datos conservativos extraídos de los códigos de fabricación.

La metodología implementada permite evaluar el efecto de los caudales relativos de viento y gas, que generan bajadas de llama más severas, y la temperatura alcanzada en la estructura. Asimismo, los modelos FEM arrojan luz sobre la pérdida de capacidad de soportar carga de la estructura, debido a aumentos inusuales de temperatura y la degradación de las propiedades mecánicas.

El procedimiento integral realizado para un caso puntual de falla permite analizar no solo las condiciones operativas específicas de un componente, sino también eventuales cambios de diseño de la antorcha. En tal sentido, se avanzó en la simulación de la llama para *flares* con *windshield*.

La Figura 9 ilustra el diseño previamente analizado [20], junto con el nuevo diseño con *windshield*. Este último fue adaptado de [3] para las dimensiones de la punta de antorcha del caso de falla bajo estudio. Nótese las diferencias de tamaño, y en la geometría de la punta. El *flare* original muestra un cilindro exterior concéntrico con el tubo principal, cuya única función es proteger los pilotos y las conexiones de la bajada de llama. El segundo caso, muestra un cono perforado, que cumple la función de barrera contra el viento en la parte baja de la llama.

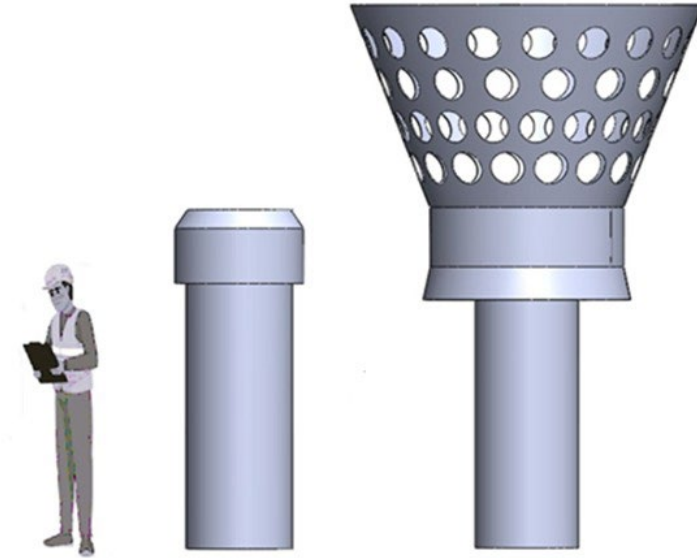


Figura 9: Modelos esquemáticos de puntas de antorcha utilizados en el trabajo.

Los resultados del modelo fluidodinámico para la antorcha con *windshield* se presentan en las Figuras 10a y 10b para una velocidad del viento de 80 km/h, en donde se observa la deflexión de la llama y la distribución de temperaturas del gas en las paredes del *flare* a sotavento, respectivamente. En este caso, la baja de llama no es pronunciada, incluso con velocidades de viento mayores a 75 km/h. Debe mencionarse que las mayores temperaturas del gas se dan en la zona del *windshield*, por lo que el diseño del material de este elemento debe considerar estas temperaturas de trabajo.

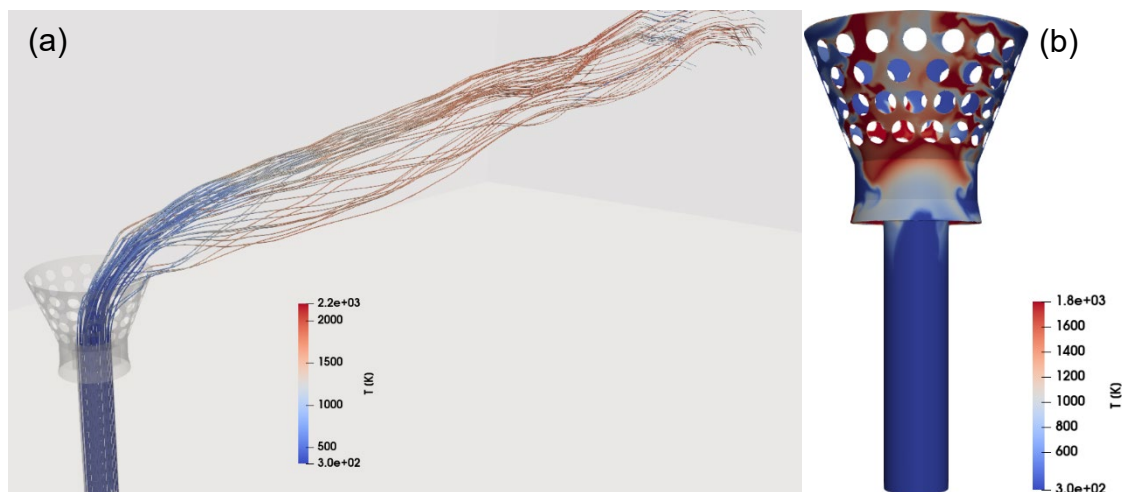


Figura 10: (a) Líneas de flujo del gas de la antorcha para un caudal de 1 millón de m³/día, y una velocidad de viento de 80 km/h. (b) Distribución de temperaturas del gas en las paredes del *flare* y *windshield*.

Cabe señalar que, si bien el caso real de falla permite validar parte de la metodología empleada en el estudio, el análisis fluidodinámico requiere una verificación adicional. Esta puede llevarse a cabo por medio de mediciones en campo, o bien en ensayos de laboratorio, en un túnel de viento. En tal sentido, y con el objetivo de verificar los resultados de las simulaciones numéricas más allá

del caso de falla analizado, se realizaron ensayos a escala en un túnel de viento del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para verificar parcial o totalmente los resultados de los modelos teóricos. El túnel tiene 7.40 m de largo con una sección de prueba de 0.9 x 0.9 m. Es abierto (tipo capa límite atmosférica) y dispone de un motor eléctrico de 6 CV de potencia, con regulador/estabilizador de velocidad.

El perfil de capa límite simulado fue para un exponente de la ley de Sutton de $P = 0.14$, el cual corresponde a una exposición Clase B de la Norma CIRSOC 102 (2005) [12]. La intensidad de turbulencia fue del 12%, representativo de la meseta patagónica.

El perfil de capa límite se logra aumentando la rugosidad en el piso del túnel de viento, y la intensidad de turbulencia con generadores de vórtices triangulares. La Figura 11 ilustra esquemáticamente cómo se ubican estos elementos en un túnel de viento que simula la capa límite atmosférica (como el utilizado en el presente trabajo).

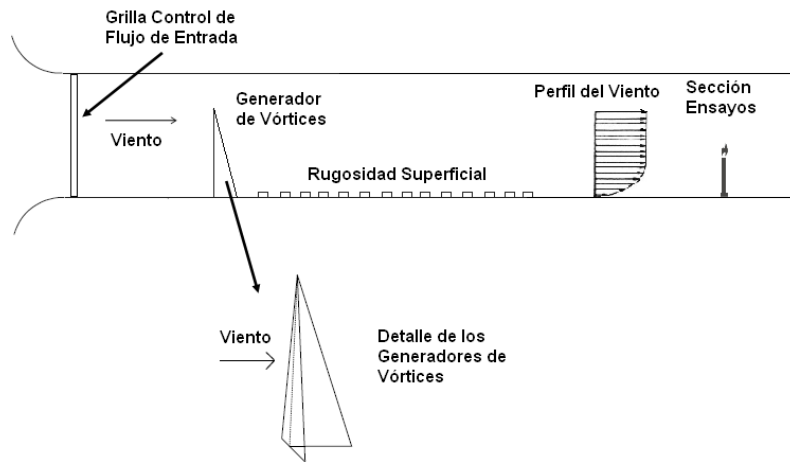


Figura 11: Esquema de un túnel de viento de capa límite, donde los generadores de vórtices y la rugosidad se ajustan para reproducir la capa límite atmosférica.

En una primera instancia, se implementaron modelos simplificados a escala de la antorcha (cilindro sin geometría adicional en la punta), sin llama. Se utilizó un tubo de PVC de 30 mm de diámetro que representa una escala de longitudes con el componente de 1:20. Se pegaron a sotavento de la chimenea tres catavientos finos para visualizar el flujo. En ensayos sucesivos, se observó que los catavientos más próximos al extremo del tubo se plegaban sobre las paredes, indicando la presencia de una burbuja de baja presión. Esto se aprecia en la Figura 12. El cataviento superior, más grueso, se empleó para visualizar la orientación del flujo a la salida de la chimenea.

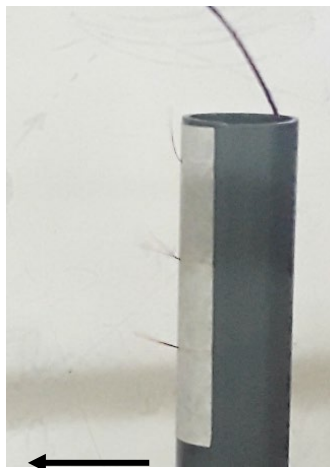


Figura 12: Prototipo de tubo de fuego con tres catavientos finos a sotavento, y uno más grueso en la parte superior (salida del gas de inyección para definir ubicación de la llama).

Para cuantificar este efecto, se realizó una serie de ensayos midiendo las presiones que se producían a sotavento de la chimenea, cerca de la salida de los gases eyectados. Los puntos de medición se ubicaron a 0.25, 0.5, 1, 2 y 3 diámetros por debajo del extremo de la antorcha. Los números de Reynolds de los ensayos se ubicaron entre 4500 y 10000, y se calcularon con la velocidad del viento y el diámetro del cilindro.

Se definió un número adimensional Π_1 como la relación entre la velocidad de salida del gas (V_i) y la velocidad del viento (V_v):

$$\Pi_1 = V_i / V_v \quad (1)$$

El coeficiente de presión, C_p , se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$C_p = (P_i - P_t) / (1/2 \rho V_v^2) \quad (2)$$

donde P_i es la presión estática en cada toma, P_t es la presión de referencia, ρ es la densidad del aire, y V_v la velocidad del viento.

Se realizaron cinco mediciones a distintas velocidades adimensionalizadas, lo cual se presenta con curvas de distintos colores en la Figura 13. Se observa que la primera toma estática (a un cuarto de diámetro) y más cercana al extremo, tiene un C_p poco negativo. Sin embargo, inmediatamente por debajo, en la toma 2 (a medio diámetro del extremo) se reduce el C_p a un valor muy negativo (succión fuerte). En la tercera toma (a un diámetro del extremo) vuelve a aumentar la presión para luego disminuir hasta adoptar el valor de C_p típico de la estela para un cilindro de alargamiento infinito.

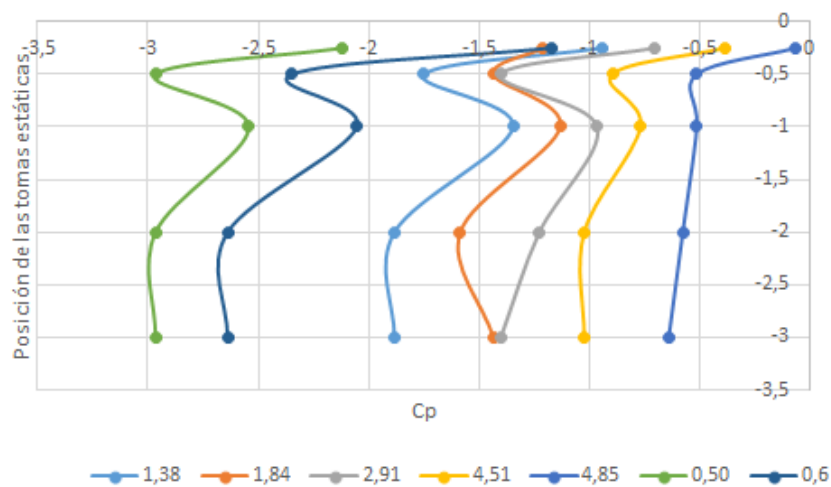


Figura 13: Distribución de C_p a sotavento, a lo largo de los cinco puntos de medición del tubo, para cinco condiciones de velocidades adimensionalizadas (Π_1).

La fuerte depresión registrada medio diámetro por debajo de la punta de la antorcha podría generar una succión del fluido de salida, lo cual es congruente con el fenómeno de bajada de llama.

En la figura 14 se presenta la variación del C_p para cada medición estática, en función de la velocidad adimensionalizada, Π_1 . Exceptuando la medición 1, las tomas estáticas tienen un comportamiento similar: para un Π_1 cercano a 0.5 ocurre el C_p más negativo, para luego crecer a medida que aumenta la relación de velocidades. Por lo tanto, para esta relación de velocidades podría ocurrir que el pico de succión cerca del extremo favorezca un vórtice de baja presión, haciendo que parte del flujo del fluido saliente sea deflectado hacia la tubería.

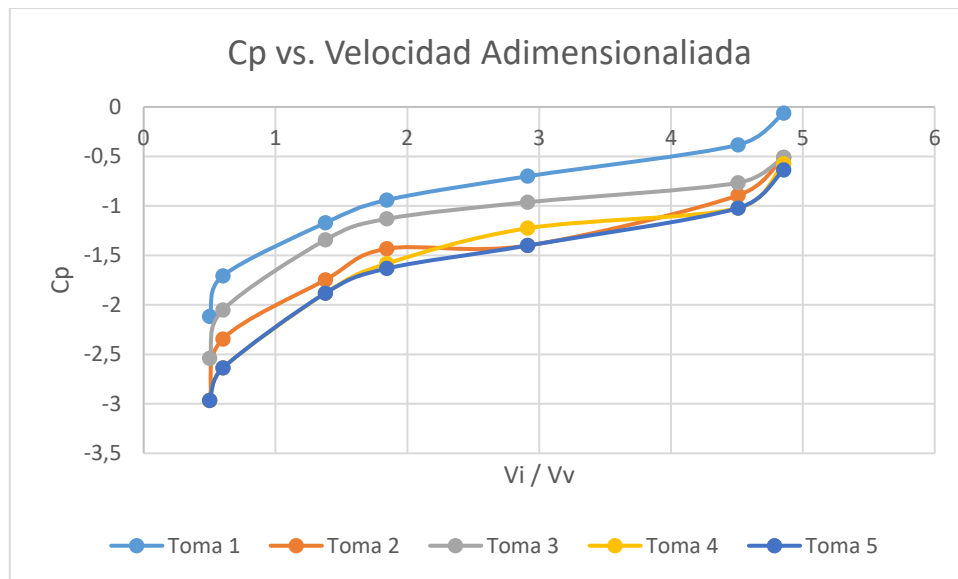


Figura 14: Variación del C_p en cada toma estática al variar la relación de velocidades.

Un Π_1 bajo, significa un viento mucho mayor que la velocidad de inyección de la chimenea. En la Figura 14 se puede observar que a medida que la velocidad adimensionalizada se reduce, el C_p se hace más negativo, por lo que se podría inferir que debe haber un valor de succión a sotavento del cilindro, que tienda a adherir la llama a la chimenea.

Para verificar esta hipótesis se procedió a realizar ensayos con llama, utilizando una mezcla de gas butano-propano. Para este ensayo se empleó como simulación de la chimenea, un tubo cilíndrico de acero inoxidable de 6 mm de diámetro, lo cual representa una escala 1:100 respecto al componente. Por dicho tubo se hizo fluir una corriente de gas, la cual se encendió manualmente a la salida de la tubería. A continuación, se puso en funcionamiento el túnel de viento, y se midieron las velocidades de inyección del gas combustible y la velocidad del viento en el túnel a la altura de la formación de la llama aguas arriba. Se realizaron varias pruebas con distintas relaciones de velocidades en el túnel de viento y se registraron las dinámicas de las llamas generadas. De las filmaciones, se extrajeron fotografías en las que se observa la posición de la llama respecto al extremo del tubo. En fotografías de la Figura 15 se puede apreciar el patrón de llama cuando aún esta no se adhiere a la tubería, correspondientes a números Π_1 mayores a 0.73. En contraste, en la Figura 16 se dispusieron los patrones de llama obtenidos a valores menores de Π_1 . Se puede observar que la llama comienza a adherirse a la chimenea.

Si se comparan estas imágenes con los gráficos de las Figuras 14 y 15, se puede ver que la adhesión de la llama a la chimenea depende de la succión que se da a sotavento de la misma, y este valor de succión se incrementa con la disminución de la relación de velocidades, Π_1 . En los ensayos presentados, el valor crítico a partir del cual la llama se adhiere a la chimenea es de aproximadamente 0.6, es decir, para valores de Π_1 inferiores a 0.6, la llama se adherirá al cilindro. Dado que la velocidad de salida de gas no es un parámetro que pueda controlarse en un proceso de venteo de gas real, el valor de Π_1 asociado a este funcionamiento decrece cuando la velocidad del viento aumenta.

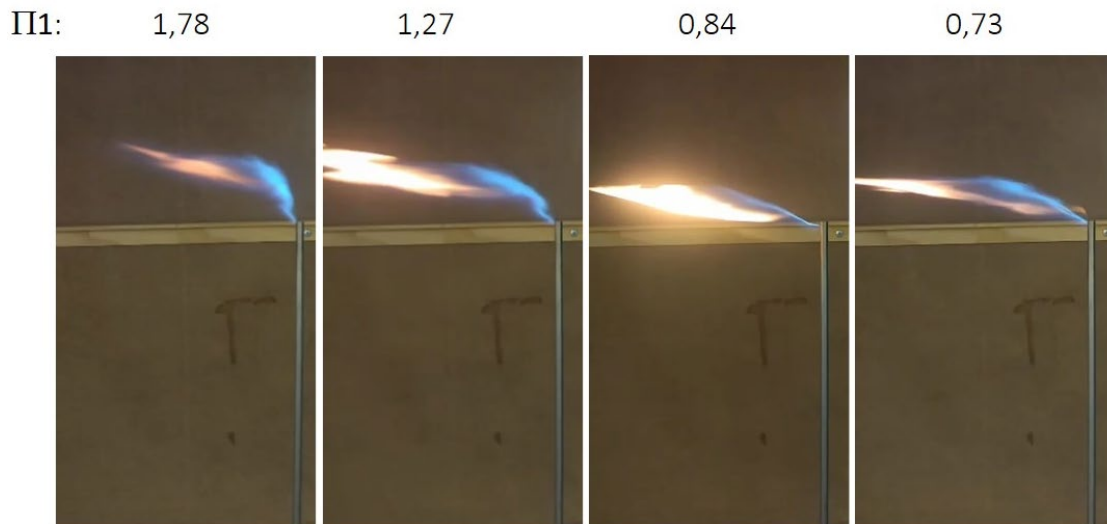


Figura 15: Patrón de llama obtenido en los ensayos en túnel de viento a relaciones de velocidad entre el flujo inyectado y la velocidad del viento mayores que $\Pi_1 = 0.73$. No se observa llama adherida a la misma.

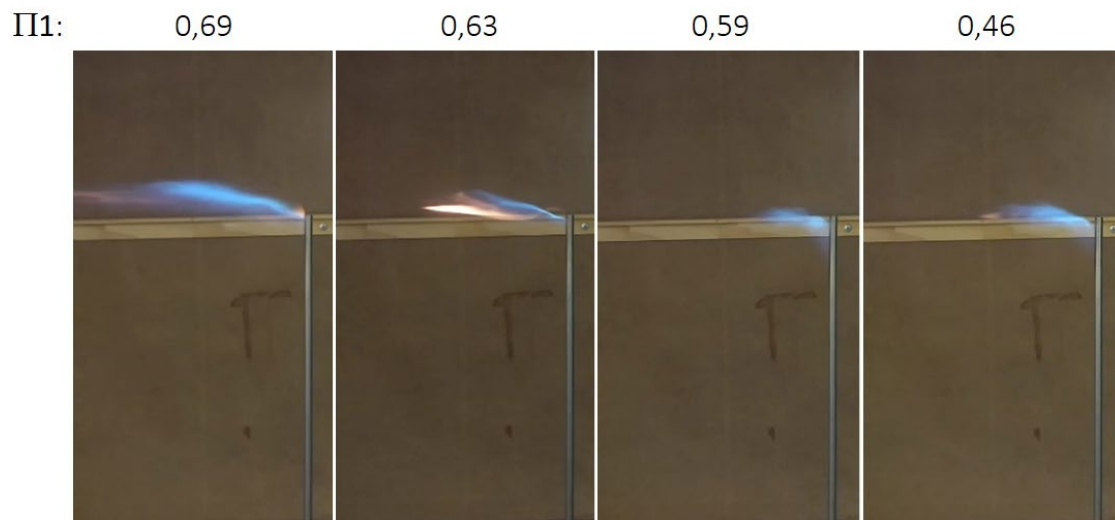


Figura 16: Patrón de llama obtenido en los ensayos en túnel de viento a relaciones de velocidad entre el flujo inyectado y la velocidad del viento menores que $\Pi_1 = 0.7$. La llama comienza a adherirse al cilindro.

Conclusiones

En el presente trabajo se implementó una metodología de análisis para antorchas de venteo de gas que comprende tanto el análisis fluidodinámico de la llama como su diseño y respuesta mecánica. La validación del método con un caso de falla real permitió ajustar las variables del modelo de elementos finitos, a los fines de reproducir el daño como se presentó en la estructura. Por su parte, el análisis fluidodinámico y las simulaciones numéricas permitieron predecir la bajada de llama para relaciones de velocidades de gas/viento bajas, o lo que es lo mismo, velocidades de viento mayores que la velocidad del gas a la salida del conducto. A pesar de que la combustión modelada y las temperaturas obtenidas dependerán fuertemente de la composición química del gas, la metodología permite ajustar estas variables según el caso que se desee analizar. Más aún, es posible analizar nuevos diseños de antorchas, con *windshield*, o barreras contra el viento, que minimicen la bajada de llama, a la vez que protejan los pilotos del calor generado en la combustión. Para estos casos, es imprescindible seleccionar un material que soporte las temperaturas de servicio durante la vida útil del equipo.

Actualmente, se están analizando diseños de antorchas con modificaciones sencillas, que minimicen la depresión generada en sotavento, y aumenten la vida útil de estos equipos.

Bibliografía

- [1] American Petroleum Institute. (2017). *Flare details for petroleum, petrochemical, and natural gas industries* (API Std. 537, 3rd ed.).
- [2] Banerjee, K., Cheremisinoff, N. P., & Cheremisinoff, P. N. (1985). *Flare gas systems pocket handbook*. Gulf Publishing Company, Book Division.
- [3] Abolghasemi S. (2012). “Materials selection, stress analysis and CFD modelling of flare tips”. PhD Thesis, Imperial College London.
- [4] Mahdi E, Esmaili A. (2020). Failure Analysis of a Flare Tip Used in Offshore Production Platform in Qatar. *Materials*, 13(15), 3426.
- [5] Yousefi M, Farghadin MH, Farzadi A. (2015). Investigate the causes of cracks in welded 310 stainless steel used in the Flare tip. *Engineering Failure Analysis*, 53, 138-147.
- [6] Al-Shaikhali AH, Al-Badairy HH, El-Sherik AM. (2020). Smokeless flare tips failure investigation: case study. *Materials at High Temperatures*, 37(1), 11-15.
- [7] Zarei, T., & Ezadi, A. A. (2020). Study on the flare tip of a gas refinery with various designs of windshields using CFD simulations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(1), 227-236.
- [8] Palese C, Lässig JL, Cogliati MG, Bastanski MA. Régimen de viento y de potencia eólica en la Región Norpatagónica, *IX Encuentro Latinoamericano y del Caribe sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos*, 2001.
- [9] Palese C, Lässig JL. (1997). Lago Mari Menuco parte I: caracterización del recurso eólico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1(2), 1997.
- [10] American Society of Mechanical Engineers. (2006). *ASME STS-1-2006: Steel stacks*. New York, NY: ASME.
- [11] American Society of Civil Engineers. (2002). *ASCE/SEI 7-02: Minimum design loads for buildings and other structures* (2nd ed.). Reston, VA: ASCE.
- [12] CIRSOC (2005). *Reglamento CIRSOC 102: Acción del viento sobre las construcciones*. Buenos Aires, Argentina: INPRES.
- [13] Hsieh, C. C., & Wu, W. (2012). Overview of intermetallic sigma (σ) phase precipitation in stainless steels. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- [14] Davis JR. (Ed.). (1997). *ASM specialty handbook: heat-resistant materials*. ASM International.
- [15] OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation, 2011–2022. <https://openfoam.org/>
- [16] López E, Aguerre H, Pairetti C, Nigro N. *Numerical simulation of partially premixed combustion using a flame surface density approach*. XXIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2017, La Plata, Argentina, 2017.
- [17] Siegel R, Howell JR. (1992). *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC.
- [18] Sazhin SS, Sazhina EM, Faltsi-Saravelou O, Wild P. (1996). The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations. *Fuel*, 75(3), 289-294.
- [19] ASME (2017). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D*, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [20] Steimbregger C, Poliserpi M. López E, Zalazar M. Análisis numérico del comportamiento termomecánico de una chimenea de venteo de gas, *XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, SAM-CONAMET*, Buenos Aires, Agosto, 2024.

Breve CV

- **Título y lugar de estudio:**
 - Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional del Comahue
 - Maestría en Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Cataluña.
 - Doctorado en Ciencia de Materiales, Universidad Nacional de Mar del Plata
- **Trayectoria:**

Más de 20 publicaciones en congresos, 9 trabajos de investigación en revistas con referato de alto impacto y 7 en revistas de eventos de ciencia y tecnología. Realizó más de 300

análisis de falla en componentes industriales. Actualmente, lidera proyectos que estudian el daño térmico en elementos sometidos a fuego y/o altas temperaturas y trabaja en el modelado por elementos finitos de estructuras, para análisis de vida a fatiga con modelos fractomecánicos.

- **Cargo actual en la empresa:** Profesor Adjunto Exclusivo, regular, Universidad Nacional del Comahue