

Referências bibliográficas

- 1 LEIPERTZ, A.; KIEFER, J. Soot and soot diagnostic by laser-induced incandescence. In: LACKNER, M.; WINTER, F.; AGARWAL, A. K. **Handbook of Combustion**. 1ra. ed. Weinheim: Wiley-VCH, v. 2, 2010. Cap. 15, p. 403-418.
- 2 DOCKERY, D. W. et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. **The New England Journal of Medicine**, v. 329, n. 24, p. 1753-1759, 1993.
- 3 SAMET, J. M. et al. The national morbidity, mortality, and air pollution study. part II: morbidity and mortality from air pollution in the United States. **Research Report Health Effects Institute**, v. 94, p. 5-70, 2000.
- 4 POPE, C. A. et al. Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution. **Circulation**, v. 109, p. 71-77, 2004.
- 5 POPE, C. A. et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Journal of the American Medical Association**, v. 287, n. 9, p. 1132-1141, 2002.
- 6 BURNETT, R. T. et al. The role of particulate size and chemistry in the association between summertime ambient air pollution and hospitalization for cardiorespiratory diseases. **Environmental Health Perspectives**, v. 105, n. 6, p. 614-620, 1997.
- 7 SCHWARTZ, J. Air pollution and hospital admissions for heart disease in eight U.S. counties. **Epidemiology**, v. 10, n. 1, p. 17-22, 1999.
- 8 DESGROUX, P.; MERCIER, X.; THOMSON, K. A. Study of the formation of soot and its precursors in flames using optical diagnostics. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, p. 1713-1738, 2013.
- 9 FETZER, J. **The chemistry and analysis of the large polycyclic aromatic hydrocarbons**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

- 10 LUCH, A. **The carcinogenic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons**. 1. ed. London: Imperial College Press, 2005. 489p.
- 11 FRENKLACH, M. Reaction mechanism of soot formation in flames. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 4, p. 2028-2037, 2002.
- 12 KOHSE-HOINGHAUS, K.; JEFFRIES, J. B. **Applied Combustion Diagnostics**. 1. ed. New York: Taylor and Francis, v. I, 2002. 717p. 707 p.
- 13 LACKNER, M.; WINTER, F.; AGARWAL, A. K. **Handbook of Combustion**. 1. ed. Weinheim: Wiley-VCH, v. 2, 2010.
- 14 ALDÉN, M. et al. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, p. 69-97, 2011.
- 15 SCHULZ, C. et al. Laser-induced incandescence: recent trends and current questions. **Applied Physics B**, v. 83, p. 333-354, 2006.
- 16 VANDER WAL, R. L.; JENSEN, K. A.; CHOI, M. Y. Simultaneous laser-induced emission of soot and polycyclic aromatic hydrocarbons within a gas-jet diffusion flame. **Combustion and Flame**, v. 109, n. 3, p. 399-414, 1997.
- 17 LAW, C. K. **Combustion Physics**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- 18 ADELAIDE, T. U. O. 3rd International Sooting Flame (ISF) Workshop, 2015. Disponivel em: <<https://www.adelaide.edu.au/cet/isfworkshop/data-sets/laminar/>>. Acesso em: 11 Outubro 2017.
- 19 KHOLGHY, M. R.; VESHKINI, A.; THOMSON, M. J. The core-shell internal nanostructure of soot – A criterion to model soot maturity. **Carbon**, v. 100, p. 508-536, 2016.
- 20 QUAY, B. et al. Spatially resolved measurements of soot volume fraction using laser-induced incandescence. **Combustion and Flame**, v. 97, n. 3-4, p. 384-392, 1994.
- 21 AXELSSON, B.; COLLIN, R.; BENGTSSON, E. Laser-induced incandescence for soot particle size and volume fraction. **Applied Physics B**, v. 72, p. 367-372, 2001.

- 22 MICHELSEN, H. A. et al. Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models. **Applied Physics B: Lasers and Optics**, v. 87, p. 503-521, 2007.
- 23 BLADH, H. et al. Optical soot characterization using two-color laser-induced incandescence (2C-LII) in the soot growth region of a premixed flat flame. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, n. 1, p. 641-648, 2011.
- 24 HADEF, R. et al. The concept of 2D gated imaging for particle sizing in a laminar diffusion flame. **Applied Physics B**, v. 112, p. 395-408, 2013.
- 25 VANDER WAL, R. L. Soot precursor material: visualization via simultaneous LIF-LII and characterization via TEM. **Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion**, v. 27, n. 2, p. 2269-2275, 1996.
- 26 SCHOEMAECKER MOREAU, C. et al. Two-color laser-induced incandescence and cavity ring-down spectroscopy for sensitive and quantitative imaging of soot and PAHs in flames. **Applied Physics B**, v. 78, p. 485-492, 2004.
- 27 OSSLER, F.; METZ, T.; ALDÉN, M. Picosecond laser-induced fluorescence from gas-phase polycyclic aromatic hydrocarbons at elevated temperatures. I. Cell measurements. **Applied Physics B**, v. 72, p. 465-478, 2001.
- 28 OSSLER, F.; METZ, T.; ALDÉN, M. Picosecond laser-induced fluorescence from gas-phase polycyclic aromatic hydrocarbons at elevated temperatures. II. Flame-seeding measurements. **Applied Physics B**, v. 72, p. 479-489, 2001.
- 29 CIGNOLI, F.; BENECCHI, S.; ZIZAK, G. Time-delayed detection of laser-induced incandescence for the two-dimensional visualization of soot in flames. **Applied Optics**, v. 33, p. 5778-5782, 1994.
- 30 BOUVIER, Y. et al. Molecular species adsorbed on soot particles issued from low sooting methane and acetylene laminar flames: A laser-based experiment. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31, n. 1, p. 841-849, 2007.

- 31 SATOH, K. et al. Laser measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a flame. **Japan Society of Mechanical Engineers**, v. 70, p. 2183-2190, 2004.
- 32 BERLMAN, I. B. **Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules**. 2da. ed. New York: Academic Press, 1971.
- 33 HAYASHIDA, K. et al. Growth characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in dimethyl. **Fuel**, v. 90, p. 493-498, 2011.
- 34 BENGTTSSON, P.-E.; ALDÉN, M. C₂ production and excitation in sooting flames using visible laser radiation: implications for diagnostics in sooting flames. **Combustion Science and Technology**, v. 77, p. 307-318, 1991.
- 35 BENGTTSSON, P.-E.; ALDÉN, M. Soot-visualization strategies using laser techniques. **Applied Physics B**, v. 60, p. 51-59, 1995.
- 36 XIAO, J.; AUSTIN, E.; WILSON, R. Relative polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in unsteady counterflow diffusion flames. **Combustion Science and Technology**, v. 177, p. 691-713, 2005.
- 37 BEJAOUI, S. et al. Laser induced fluorescence spectroscopy of aromatic species produced in atmospheric sooting flames using UV and visible excitation wavelengths. **Combustion and Flame**, p. 2479-2491, 2014.
- 38 LEE, S.-Y.; TURNS, S. R.; SANTORO, R. J. Measurements of soot, OH, and PAH concentrations in turbulent ethylene/air jet flames. **Combustion and Flame**, v. 156, p. 2264-2275, 2009.
- 39 QAMAR, N. et al. The effect of global mixing on soot volume fraction: measurements in simple jet, precessing jet, and bluff body flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, p. 1493-1500, 2005.
- 40 CAETANO, N. R.; FIGUEIRA DA SILVA, L. F. A comparative experimental study of turbulent non premixed flames stabilized by a bluff-body burner. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 63, p. 20-33, 2015.
- 41 TURNS, S. R.; MYHR, F. H. Oxides of Nitrogen emissions from turbulent jet flames: Part I - Fuel effects and flame radiation. **Combustion and Flame**, v. 87, p. 319-335, 1991.

- 42 QAMAR, N. et al. Soot volume fraction in a piloted turbulent jet non-premixed flame of natural gas. **Combustion and Flame**, v. 156, p. 1339-1347, 2009.
- 43 MUELLER, M. et al. Experimental and computational study of soot evolution in a turbulent nonpremixed bluff body ethylene flame. **Combustion and Flame**, v. 160, p. 1298-1309, 2013.
- 44 NARAYANASWAMY, V.; CLEMENS, N. Simultaneous LII and PIV measurements in the soot formation region of turbulent non-premixed jet flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, p. 1455-1463, 2013.
- 45 GAYDON, A. G. **The spectroscopy of flames**. 1. ed. Londres: Chapman and Hall, 1974, 412p. 6 p.
- 46 ZOMER, G. The nature of Chemiluminescent reactions. In: RODA, A. **Chemiluminescence and Bioluminescence**. 1. ed. Cambridge: RSC Publishing, 2011, 590p. p. 51-54.
- 47 GAYDON, A. G.; WOLFHARD, H. G. **Flames: Their structure, radiation and temperature**. 4. ed. Londres: Chapman and Hall, 1978, 449p.
- 48 MONTEIRO DOS SANTOS, A. et al. Espectroscopia de Emissão e Absorção. In: LACAVALA, P.; MARTINS, C. **Métodos Experimentais de Análise Aplicada à Combustão**. 1. ed. Taubaté: Papel Brasil, 2010. Cap. 3, p. 144-146.
- 49 BERTRAN, C. A.; MARQUES, C. S.; BENVENUTTI, L. H. Mapping of luminescent species in a flame front. **Combustion Science and Technology**, v. 139, p. 1-13, 2007.
- 50 NAU, P. et al. On the quantification of OH*, CH*, and C2* chemiluminescence in flames. **Applied Physics B**, v. 107, p. 551-559, 2012.
- 51 BROCKHINKE, A. et al. Measurement and simulation of rotationally-resolved chemiluminescence spectra in flames. **Applied Physics B**, v. 107, p. 539-549, 2012.
- 52 VAGELOPOULOS, C. M.; FRANK, J. H. An experimental and numerical study on the adequacy of CH as a flame marker in premixed methane flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, p. 241-249, 2005.

- 53 WALSH, K. T. et al. Experimental and computational study of CH, CH*, and OH* in an axisymmetric laminar diffusion flame. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 27, n. 1, p. 615-623, 1998.
- 54 KRISHNAMACHARI, S. L.; BROIDA, H. P. Effect of molecular oxygen on the emission spectra of atomic oxygen-acetylene flames. **Journal of Chemical Physics**, v. 34, n. 5, p. 1709-1711, 1961.
- 55 KARNANI, S.; DUNN-RANKIN, D. Visualizing CH* chemiluminescence in sooting flames. **Combustion and Flame**, v. 160, p. 2275-2278, 2013.
- 56 SNELLING, D. R. et al. Comparison of LII derived soot temperature measurements with LII model predictions for soot in a laminar diffusion flame. **Applied Physics B**, v. 96, p. 657-669, 2009.
- 57 JENKINS, T. P.; HANSON, R. Soot pyrometry using modulated absorption/emission. **Combustion and Flame**, v. 126, n. 3, p. 1669-1679, 2001.
- 58 HENRÍQUEZ, R. et al. The oxygen index on soot production in propane diffusion flames. **Combustion Science and Technology**, v. 186, n. 4-5, p. 504-517, 2014.
- 59 ESCUDERO, F. et al. Unified behavior of soot production and radiative heat transfer in ethylene, propane and butane axisymmetric laminar diffusion flames at different oxygen indices. **Fuel**, v. 183, p. 668-679, 2016.
- 60 ESCUDERO, F. et al. Effects of oxygen index on soot production and temperature in an ethylene inverse diffusion flame. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 73, p. 101-108, 2016.
- 61 LEGROS, G. et al. Simultaneous soot temperature and volume fraction measurements in axis-symmetric flames by a two-dimensional modulated absorption/emission technique. **Combustion and Flame**, v. 162, n. 6, p. 2705-2719, 2015.
- 62 ZHAO, H.; LADOMMATOS, N. Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 24, n. 3, p. 221-255, 1998.
- 63 MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 3. ed. Oxford: Academic Press, 2013.

- 64 DI STASIO, S.; MASSOLI, P. Influence of the soot property uncertainties in temperature and volume-fraction measurements by two-colour pyrometry. **Measurement Science and Technology**, v. 5, p. 1453-1465, 1994.
- 65 DAUN, K. J. et al. Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization. **Applied Optics**, v. 45, n. 19, p. 4638-4646, 2006.
- 66 LIU, L. H.; JIANG, J. Inverse radiation problem for reconstruction of temperature profile in axisymmetric free flames. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 70, n. 2, p. 207-215, 2001.
- 67 CHANG, H.; CHARALAMPOPOULOS, T. T. Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 430, p. 557-591, 1990.
- 68 SNELLING, D. R. et al. Spectrally resolved measurement of flame radiation to determine soot temperature and concentration. **AIAA Journal**, v. 40, , n. 9, p. 1789-1795, 2002.
- 69 LIU, F.; THOMSON, K. A.; SMALLWOOD, G. J. Soot temperature and volume fraction retrieval from spectrally resolved flame emission measurement in laminar axisymmetric coflow diffusion flames: Effect of self-absorption. **Combustion and Flame**, v. 160, n. 9, p. 1693-1705, 2013.
- 70 DASCH, C. J. One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods. **Applied Optics**, v. 31, n. 8, p. 1146-1152, 1992.
- 71 HANSEN, P. C.; O'LEARY, D. P. The use of the l-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. **SIAM Journal on Scientific Computing**, v. 14, n. 6, p. 1487-1503, 1993.
- 72 AKESSON, E. O.; DAU, K. J. Parameter selection methods for axisymmetric flame tomography through Tikhonov regularization. **Applied Optics**, v. 47, n. 3, p. 407-416, 2008.
- 73 BLADH, H.; JOHNSON, J. A.; BENGTSSON, P. E. Influence of spatial laser energy distribution on evaluated soot particle sizes using two-colour laser-induced incandescence in a flat premixed ethylene/air flame. **Applied Physics B**, v. 96, n. 4, p. 645-656, 2009.

- 74 DE LULIIS, D. et al. Three-angle scattering/extinction versus TEM measurements on soot in premixed ethylene/air flame. **Applied Physics B**, v. 102, n. 4, p. 891-903, 2011.
- 75 DALZELL, W. H.; SAROFIM, A. F. Optical Constants of Soot and Their Application to Heat-Flux Calculations. **Journal of Heat Transfer**, v. 91, n. 1, p. 100-104, 1969.
- 76 TIEN, C. L.; LEE, S. C. Optical constants of soot in hydrocarbon flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 18, n. 1, p. 1159-1166, 1981.
- 77 WILLIAMS, T. C.; SHADDIX, C. R.; JENSEN, K. A. Measurement of the dimensionless extinction coefficient of soot within laminar diffusion flames. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 1616-1630, 2007.
- 78 KRISHNAN, S.; LIN, K.; FAETH, G. Extinction and scattering properties of soot emitted from buoyant turbulent diffusion flames. **Journal of Heat Transfer**, v. 123, n. 2, p. 331-339, 2000.
- 79 OLOFSSON, N. et al. Are sooting premixed porous-plug burner flames one-dimensional? a laser-based experimental investigation. **Combustion Science and Technology**, v. 185, p. 293-309, 2013.
- 80 KRISHNAN, S.; LIN, K.; FAETH, G. Optical properties in the visible of overfire soot in large buoyant turbulent diffusion flames. **Journal of Heat Transfer**, v. 122, n. 3, p. 517-524, 2000.
- 81 LESCHOWSKI, M. et al. Combination of LII and extinction measurements for determination of soot volume fraction and estimation of soot maturity in non-premixed laminar flames. **Applied Physics B**, v. 119, n. 4, p. 685-696, 2015.
- 82 MIGLIORINI, F.; THOMSON, K. A.; SMALLWOOD, G. J. Investigation of optical properties of aging soot. **Applied Physics B**, v. 104, n. 2, p. 273-283, 2011.
- 83 SIMONSSON, J. et al. Wavelength dependence of extinction in sooting flat premixed flames in the visible and near-infrared regimes. **Applied Physics B**, v. 119, p. 657-667, 2015.
- 84 ZERBS, J. et al. The influence of wavelength in extinction measurements and beam steering in laser-induced incandescence

measurements in sooting flames. **Applied Physics B**, v. 96, n. 4, p. 683-694, 2009.

- 85 MICHELSEN, H. A. et al. Laser-induced incandescence: Particulate diagnostics for combustion, atmospheric, and industrial applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 51, p. 2-48, 2015.
- 86 BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. **Absorption and Scattering of Light by Small Particles**. 1. ed. Weinheim: John Wiley and Sons, 1983.
- 87 MICHELSEN, H. A. Understanding and predicting the temporal response of laser-induced incandescence from carbonaceous particles. **Journal of Chemical Physics**, v. 118, n. 15, p. 7012-7045, 2003.
- 88 LIU, F. et al. Some theoretical considerations in modeling laser-induced incandescence at low-pressures. **Applied Physics B: Laser and Optics**, v. 87, n. 1, p. 179-191, 2007.
- 89 MICHELSEN, H. A. et al. Modeling laser-induced incandescence of soot: enthalpy changes during sublimation, conduction, and oxidation. **Applied Physics B: Laser and Optics**, v. 93, p. 645-656, 2008.
- 90 GOODMAN, F. O.; WACHMAN, H. Y. **Dynamics of Gas-Surface Scattering**. 1. ed. New York: Academic Press, 1976, 327p.
- 91 THOMAS, L. B. Thermal Accommodation of Gases on Solids. In: THOMAS, L. B. **Fundamentals of Gas-Surface Interactions**. New York: Academic Press, 1967. p. 346-369.
- 92 LEHRE, T. et al. Size distributions of nanoscaled particles and gas temperatures from time-resolved laser-induced-incandescence measurements. **Applied Optics**, v. 42, n. 12, p. 2021-2030, 2003.
- 93 KIM, E. S.; NO, H. C. Experimental study on the oxidation of nuclear graphite and development of an oxidation model. **Journal of Nuclear Materials**, v. 349, n. 1-2, p. 182-194, 2006.
- 94 BEWS, I. M. et al. The order, Arrhenius parameters, and mechanism of the reaction between gaseous oxygen and solid carbon. **Combustion and Flame**, v. 124, n. 1-2, p. 231-245, 2001.

- 95 KHOSOUSI, A.; DWORKIN, S. B. Detailed modelling of soot oxidation by O₂ and OH in laminar diffusion flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 2, p. 1903-1910, 2015.
- 96 PURI, R.; SANTORO, R. J. The oxidation of soot and carbon monoxide in hydrocarbon diffusion flames. **Combustion and Flame**, v. 97, n. 4, p. 125-144, 1994.
- 97 DE HEER, W. A.; UGARTE, D. Carbon onions produced by heat treatment of carbon soot and their relation to the 217.5 nm interstellar absorption feature. **Chemical Physics Letters**, v. 2007, n. 4-6, p. 480-486, 1993.
- 98 VANDER WAL, R. L. Laser-induced incandescence: excitation and detection conditions, material transformations, and calibration. **Applied Physics B: Laser and Optics**, v. 96, p. 601-611, 2009.
- 99 LEMAIRE, R.; MOBTIL, M. Modeling laser-induced incandescence of soot: a new approach based on the use of inverse techniques. **Applied Physics B**, v. 119, p. 577-606, 2015.
- 100 MELTON, L. Soot diagnostics based on laser-heating. **Applied Optics**, v. 23, p. 2201-2208, 1984.
- 101 SMALLWOOD, G. et al. Clouds over soot evaporation: errors in modeling laser-induced incandescence of soot. **Journal of Heat Transfer**, v. 123, p. 814-818, 2001.
- 102 GOULAY, F. et al. A data set for validation of models of laser-induced incandescence from soot: temporal profiles of LII signal and particle temperature. **Applied Physics B**, v. 112, n. 3, p. 287-306, 2013.
- 103 VANDER WAL, R. L.; TICICH, T. M.; STEPHENS, A. B. Optical and microscopy investigation of soot structure alterations by laser-induced incandescence. **Applied Physics B**, v. 67, n. 1, p. 115-123, 1998.
- 104 SNELLING, D. et al. A calibration-independent laser-induced incandescence technique for soot measurement by detecting absolute light intensity. **Applied Optics**, v. 44, p. 6773-6785, 2005.
- 105 FUENTES, A. **Interactions between the reaction zone and soot field in a laminar boundary layer type diffusion flame**. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Fundamentais e Aplicadas- Université de Poitiers. Poitiers, France, p. 204. 2006.

- 106 NI, T. et al. Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence. **Applied Optics**, v. 34, p. 7083-7091, 1995.
- 107 SHADDIX, C. R.; SMYTH, K. C. Laser-induced incandescence measurements of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flames. **Combustion and Flames**, v. 107, p. 418-452, 1996.
- 108 ANDRESE, P. et al. Laser induced fluorescence with tunable excimer lasers as a possible method for instantaneous temperature field measurements at high pressures: checks with an atmospheric flame. **Applied Optics**, v. 27, p. 365-378, 1988.
- 109 KOHSE-HOINGHAUS, K. Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 20, p. 203-297, 1994.
- 110 DOS SANTOS, L. R. **Medições de temperaturas de chamas de etanol utilizando fluorescência induzida por laser**. Tese de doutorado-Instituto de Química, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 131. 2005.
- 111 LAKOWICZ, J. R. **Principles of Fluorescence Spectroscopy**. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2010.
- 112 FETZER, J. Polycyclic aromatic hydrocarbons and combustion. In: LACKNER, M.; WINTER, F.; AGARWAL, A. K. **Handbook of combustion**. 1. ed. Weinheim: Wiley-VCH, v. 2, 2010. Cap. 16, p. 425-436.
- 113 BIRKS, J. B. **Photophysics of Aromatic Molecules**. 1. ed. London: Wiley-Interscience, 1970.
- 114 ZIZAK, G. et al. Detection of aromatic hydrocarbons in the exhaust gases of a gasoline I.C. engine by laser induced fluorescence technique. **Recent Results Developments in Applied Spectroscopy**, v. 1, p. 17-24, 1996.
- 115 CIAJOLO, A. et al. Fluorescence spectroscopy of aromatic species produced in rich premixed ethylene flames. **Chemosphere**, v. 42, n. 5-7, p. 835-841, 2001.
- 116 CIGNOLI, F.; BENECCHI, S.; ZIZAK, G. Simultaneous one-dimensional visualization of OH, polycyclic aromatic hydrocarbons,

and soot in a laminar diffusion flame. **Optics Letters**, v. 17, n. 4, p. 229-231, 1992.

- 117 VANDER WAL, R. L. Soot precursor carbonization: visualization using LIF and LII and comparison using bright and dark field TEM. **Combustion and Flame**, v. 112, n. 4, p. 607-616, 1998.
- 118 OGER, B. **Soot characterisation in diesel engines using laser-induced incandescence**. Tese de doutorado-Faculdade de Ciência e Engenharia, Universidade de Brighton. Brighton, p. 223. 2012.
- 119 SMALLWOOD, G.; SCHULZ, C. Target Flames. **liiscience.org**, 2005. Disponível em: <<http://liiscience.org/contact>>. Acesso em: 29 fev. 2016.
- 120 ASSOCIATES, H. & HOLTHUIS & ASSOCIATES. **Site da Holthuis & Associates**. Disponível em: <<http://www.flatflame.com/>>. Acesso em: 25 fev. 2016.
- 121 PRUCKER, S.; MEIER, W.; STRICKER, W. A flat flame burner as calibration source for combustion research: Temperatures and species concentrations of premixed H₂/air flames. **Review of Scientific Instruments**, v. 65, n. 9, p. 2908-2911, 1994.
- 122 MIGLIORINI, F. L. et al. How “flat” is the rich premixed flame produced by your McKenna burner? **Combustion and Flame**, v. 153, p. 384-393, 2008.
- 123 BORSHANPOUR; B. **Development and validation of an experimental apparatus for the characterization of soot in a Laminar Co-Flow Diffusion Flame Using laser-induced incandescence**. Tese de doutorado-Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto. Toronto, p. 310. 2013.
- 124 GÜLDER, Ö. L.; SNELLING, D. R.; SAWCHUK, R. A. Influence of hydrogen addition to fuel on temperature field and soot formation in diffusion flames. **Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion**, v. 26, n. 2, p. 2351-2358, 1996.
- 125 OLOFSSON, N.-E. **Laser-induced incandescence and complementary diagnostics for flame soot characterization**. Tese de doutorado-Department of Physics, Lund University. Lund, p. 82. 2014.

- 126 HADEF, R. et al. Soot characterization with laser-induced incandescence applied to a laminar premixed ethylene–air flame. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 8, p. 1457-1467, 2010.
- 127 ALICAT Scientific. **Alicat Scientific**. Disponível em: <http://www.alicat.com/documents/manuals/Gas_Flow_Controller_Manual.pdf>. Acesso em: 13 junho 2016.
- 128 LAVISION. **Imager Intense & FlowMaster3**. LaVision. [S.l.], p. 108. 2007.
- 129 LAVISION. **Intensified Relay Optics - IRO**. LaVision. Göttingen, p. 78. 2010.
- 130 LAVISION. **Shuttered CW Laser**. LaVision. Göttingen, p. 48. 2015.
- 131 ZHAO, F.-Q.; HIROYASU, H. The applications of laser Rayleigh scattering to combustion diagnostics. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 19, n. 6, p. 447-485, 1993.
- 132 EGÚSQUIZA, J. C. **Estudo experimental de chamas turbulentas não pré-misturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser**. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 134. 2012.
- 133 CRUZ, J. J. **Estudo experimental da combustão turbulenta de sprays de etanol usando PLIF-OH, PIV e Shadowgraphy**. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 135. 2013.
- 134 HAN, D.; MUNGAL, M. G. Simultaneous measurement of velocity and CH layer distribution in turbulent non-premixed flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 28, n. 1, p. 267-267, 2000.
- 135 DONBAR, J. M.; DRISCOLL, J. F.; CARTER, C. D. Reaction zone structure in turbulent nonpremixed jet flames—from CH-OH PLIF images. **Combustion and Flame**, v. 122, n. 1-2, p. 1-19, 2000.
- 136 LIU, F. et al. Sensitivity and relative error analyses of soot temperature and volume fraction determined by two-color LII. **Applied Physics B**, v. 96, n. 4, p. 623-636, 2009.

- 137 FUENTES, A. et al. Laser-induced incandescence calibration in a three-dimensional laminar diffusion flame, v. 43, n. 6, p. 939-948, 2007.
- 138 BLADH, H.; JOHNSON, J.; BENGTSSON, P. -E. On the dependence of the laser-induced incandescence (LII) signal on soot volume fraction for variations in particle size. **Applied Physics B**, v. 90, n. 1, p. 109-125, 2008.
- 139 JEREZ, A. et al. Measurements and modeling of PAH soot precursors in coflow ethylene/air laminar diffusion flames. **Submitted to: 37th International Symposium on Combustion**, 2018, Dublin.
- 140 SANTORO, R. J.; SEMERJIAN, H. G.; DOBBINS, R. A. Soot particle measurements in diffusion flames. **Combustion and Flame**, v. 51, p. 203-218, 1983.
- 141 MOFFAT, R. J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. **Journal of Fluids Engineering-Transactions of The ASME**, v. 104, p. 250-258, 1982.
- 142 FRANCISCO, R. W.; HEIL, A.; OLIVEIRA, A. A. Laminar flame speed measurements of natural gas/air mixtures using a flat flame burner. **In: 22nd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, 2013, Ribeirão Preto, p. 3225-3231.
- 143 FRANCISCO, R. W. **Desenvolvimento de método de medição simultâneo de velocidade de chama laminar e energia de ativação aparente e aplicação em misturas combustíveis com baixo poder calorífico**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis, p. 162. 2014.
- 144 GOTHANIYA, G. et al. A study on the effect of experimental setup configuration on soot formation in a laminar premixed ethylene-air flame. In: BOCKHORN, H., et al. **Combustion generated fine carbonaceous particles**. Demand: KIT Scientific Publishing, 2009. Cap. 42, p. 697-711.

Apêndice A

A.1

Determinação das incertezas de medição

Apresenta-se a metodologia empregada para estimar a incerteza de uma quantidade medida experimentalmente. Foi seguida uma metodologia clássica para o cálculo de propagação de incertezas [141]. Segundo esta, um resultado “R” é consequência de operações matemáticas que envolvem um número “N” de medidas experimentais independentes, x_i ,

$$R = R(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_N), \quad (A1)$$

cada uma delas com suas incertezas experimentais, δx_i , com uma mesma probabilidade de ocorrência. Assumindo que as incertezas sejam não correlacionadas, o resultado “R” tem como incerteza a seguinte expressão:

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (A2)$$

onde, as derivadas parciais representam a sensibilidade do resultado para cada variável medida.

Cada medida experimental pode, e deve, ser adequadamente reportada com seu respectivo valor de incerteza, segundo alguma das seguintes formas:

$$x_i = \hat{x}_i \pm \delta x_i \quad \text{ou} \quad x_i = \hat{x}_i \pm \frac{\delta x_i}{x_i}, \quad (A3)$$

onde δx_i é chamado de intervalo de *incerteza absoluta*, e $\delta x_i/x_i$ é conhecida como intervalo de *incerteza relativa* com o valor de x_i .

A determinação da faixa de incerteza deve ser representada em testes onde o resultado desejado “R” é resultado de medidas x_i . Pode-se calcular o desvio padrão das medidas de x_i ou, também, é comum utilizar os valores fornecidos pelo fabricante do equipamento envolvido com a variável x_i .

A.2

Incerteza da temperatura da fuligem medida pela técnica de termometria de duas cores

Com o objetivo de quantificar a incerteza nas medidas experimentais, a análise foi realizada segundo a metodologia proposta por [59,136]. Estas foram

especificamente desenvolvidas para termometria duas cores LII, mas as expressões matemáticas podem facilmente ser aplicadas ao presente caso de emissão espontânea quando se utiliza os campos deconvolvidos. A partir da eq. (10) do capítulo 3, se observa que a temperatura pode ser escrita em termos dos comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e da razão de intensidades deconvoluídas, definida como $R = J_{\lambda_1}(r)/J_{\lambda_2}(r)$.

$$T = T(\lambda_1, \lambda_2, R). \quad (\text{A4})$$

Então, a incerteza na medida da temperatura pode ser definida como:

$$\delta T = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial \lambda_1} \delta \lambda_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \lambda_2} \delta \lambda_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R} \delta R \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{A5})$$

onde as derivadas com respeito a λ_1 , λ_2 e R podem ser calculadas como:

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda_1} = \frac{T \lambda_2 (C_2 - 6 \lambda_1 T)}{\lambda_1 C_2 (\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (\text{A6})$$

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda_2} = - \frac{T \lambda_1 (C_2 - 6 \lambda_2 T)}{\lambda_2 C_2 (\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (\text{A7})$$

$$\frac{\partial T}{\partial R} = \frac{T}{R} \frac{T \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 C_2 (\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (\text{A8})$$

Estas expressões mostram que a incerteza é controlada pelo inverso da separação espectral dos filtros de detecção, $\lambda_1 - \lambda_2$. As incertezas absolutas dos comprimentos de onda de detecção são dadas pelo valor da largura a meia altura (*FWHM*) dos filtros, ver Tabela 4, e que é de $\delta \lambda_i = 10 \text{ nm}$ para ambos os filtros. A incerteza do parâmetro R foi suposta igual ao desvio padrão da razão $R = J_{\lambda_1}(r)/J_{\lambda_2}(r)$, calculadas a partir de 100 pares de imagens deconvolvidas, encontrando-se valores na faixa de $\delta R/R \approx 0.2 - 0.14$. As incertezas consideradas aqui são do tipo A, mas os *datasheet* fornecidos pelo fabricante dos filtros garantem a largura e centro de banda reportados acima. Assim, a incerteza do tipo B é negligenciável neste caso. Note-se que esta análise simples não inclui o detalhe das incertezas experimentais associadas: (1) à câmara *Imager Intense*, (2) ao processo de deconvolução, (3) ao valor escolhido do coeficiente adimensional de extinção K_e .

A Figura 42 mostra os resultados de análise de propagação da incerteza para a chama do caso G. O campo de temperaturas mostra uma distribuição clássica, coincidente com a região onde a fuligem se encontra presente. As maiores temperaturas são encontradas na região inferior externa, do lado do escoamento de

ar. Os valores máximos na incerteza local de $(\delta T)_{\max} \approx 100 \text{ K}$, correspondem a uma incerteza relativa de $(\delta T/T)_{\max} = 5 \%$, encontrados na região de máxima temperatura.

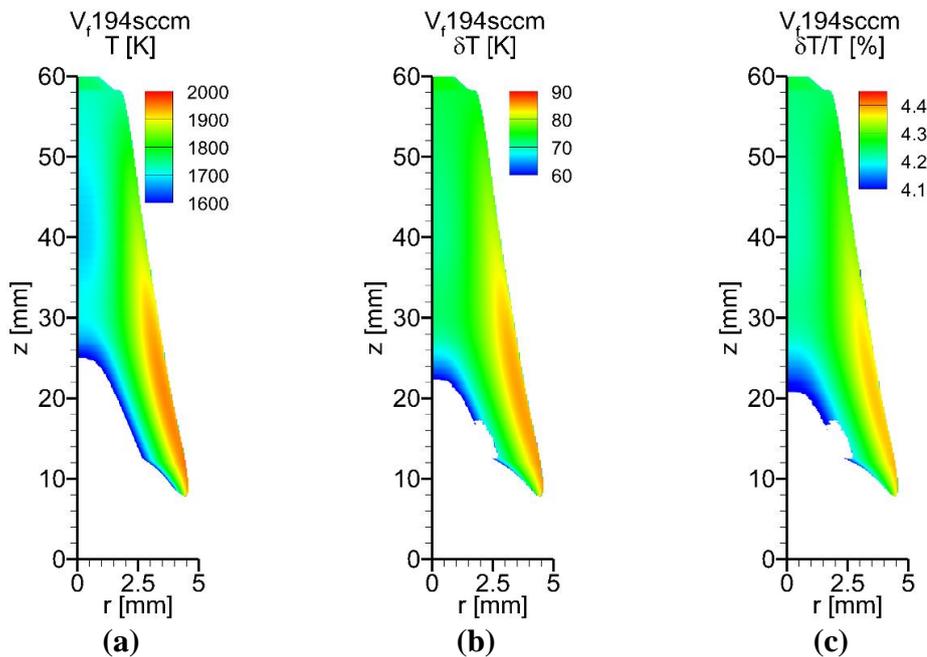


Figura 42 - Resultados de estimação da incerteza experimental para o Caso G. Campos de (a) Temperatura, (b) incerteza absoluta δT e (c) incerteza relativa $\delta T/T$

Cabe enfatizar que o valor estimado de incerteza corresponde ao aporte dos três parâmetros mencionados na eq. (A4), e não leva em conta a possível influência do processo de reconstrução tomográfica (deconvolução). A vantagem da técnica de duas cores é ser autocalibrada, pois depende da razão de intensidades de duas imagens obtidas com o mesmo equipamento de medição.

Na estimativa aqui apresentada foram consideradas as incertezas aleatórias (tipo A) para a razão de intensidades R , no entanto, ao comparar os resultados de temperatura com os da literatura, ver Figura 26, se observa que ambas as seguem uma mesma tendência e exibem valores próximos. Por isto, se assume que as incertezas sistêmicas (tipo B) são negligenciáveis.

A.3

Incerteza das medidas de fração volumétrica de fuligem

A técnica de extinção permite obter a distribuição da fração volumétrica de fuligem (ppm), a partir dos resultados qualitativos de LII (*u. a.*). A exatidão dos

resultados depende, assim, da exatidão na estimativa da constante de calibração, C_{cal} , calculada pela eq. (47) do capítulo 4, e derivada dos valores médios de \bar{f}_v e $\overline{S_{LII}}$. A partir da eq. (21) do capítulo 3, e seguindo a metodologia apresentada por [137], se observa que a fração volumétrica média de fuligem pode ser expressa como sendo dependente dos seguintes termos:

$$\bar{f}_v = \bar{f}_v(\lambda, K_e, L, \tau), \quad (A9)$$

onde $K_e = 6\pi E(m)$ representa o coeficiente adimensional de extinção e $\tau = I/I_0$ expressa a transmitância do feixe de extinção ao longo do caminho óptico L , depois de ser atenuado pela fuligem. Portanto, a incerteza relativa na medida de \bar{f}_v pode ser expressa como:

$$\frac{\delta \bar{f}_v}{\bar{f}_v} = \left[\left(\frac{\delta \tau}{\tau} \right)^2 + \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\delta E(m)}{E(m)} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (A10)$$

A fonte de luz laser utilizada nos experimentos de extinção é estável e monocromática, o que permite considerar que a incerteza em $\delta \lambda_{ext}$ é negligenciável. A incerteza na determinação do caminho óptico, δL , é assumida como igual a mínima unidade de medida possível na imagem, cuja resolução, obtida no sensor da ICCD, é de $0,0383 \text{ mm/px}$. A incerteza na transmitância do feixe de extinção, $\delta \tau$, pode ser expressa como:

$$\left(\frac{\delta \tau}{\tau} \right)^2 = \frac{1}{[-\ln(I/I_0)]^2} \left[\left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta I_0}{I_0} \right)^2 \right], \quad (A11)$$

onde I_0 e I representam a intensidade do feixe antes e depois da chama, respectivamente. Uma representação mais detalhada da incerteza do sistema de extinção seria aquela que leva em conta todos seus componentes, como a posição do feixe no plano de simetria da chama, a resolução espacial pelo diâmetro do feixe na região de medição e a velocidade de resposta dos fotodetectores. Em cada experimento foram registradas as intensidades medidas pelos fotodetectores para 200 amostras, e a incerteza δI foi assumida como o desvio padrão, $\delta I/I = 0,31\%$ e $\delta I_0/I_0 = 0,21\%$. Note-se que a incerteza sistêmica (Tipo B) não é considerada no sistema de extinção, pois este se calibra em ausência de chama, isto é, para uma transmitância de 100%.

O parâmetro $E(m)$ é função do índice de refração complexo da fuligem, $m = n - ik$, avaliado aqui no comprimento de onda da medição por extinção, $\lambda_{ext} = 532 \text{ nm}$, como [63]:

$$E(m) = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2}. \quad (\text{A12})$$

Na literatura os valores de m , $E(m)$ ou K_e [75-78], reportados apresentam grande dispersão. Estes parecem ser dependentes, entre outras coisas, do tipo de chama e do combustível utilizado no experimento. No presente estudo, os índices reportados por Chang e Charalampopoulos [67] são empregados aqui, eq. (20), e apresentam uma incerteza (tipo A) de $\delta n/n = 11\%$ e $\delta k/k = 4\%$ [67]. Para $\lambda_{ext} = 0,532 \mu\text{m}$, obtém-se um valor de $m = 1,7316 - i 0,6$ e, por conseguinte, $E(m) = 0,2395$. A incerteza do valor de $E(m)$ é expressa como:

$$\frac{\delta E}{E} = \left[\left(\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial n} \right)^2 (\delta n)^2 + \left(\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial k} \right)^2 (\delta k)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{A13})$$

onde as derivadas com respeito a n e k são:

$$\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial n} = \frac{[k^4 + 2k^2(n^2 - 2) - 4kn^2 - 3n^4 - 4n^2 + 4]}{n[(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k]}, \quad (\text{A14})$$

$$\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial k} = \frac{-(k^2 - n^2 - 2)(3k^2 + n^2 + 2)}{k[(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k]}. \quad (\text{A15})$$

Os valores de cada componente da incerteza são reportados na Tabela 8, onde na segunda coluna mostra os aportes individuais de cada termo. Note-se que a maior componente da incerteza é aquela associada ao índice de refração da fuligem.

Tabela 8 - Valores de incerteza das variáveis empregadas no cálculo de \bar{f}_v

x_i	$\delta x_i/x_i$ [%]
λ	≈ 0
$E(m)$	16,3
τ	1,4
L	0,7
<i>Total</i>	16,4

A.4

Incerteza do número de Reynolds do jato de combustível

O número de Reynolds é definido segundo:

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{4\rho V_f}{\mu \pi D}, \quad (\text{A16})$$

onde, u_m é a velocidade média, \dot{V} é a vazão, D é o diâmetro característico, e ρ e μ são a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido. A incerteza na medição do número de Reynolds pode ser estimada segundo a equação A17, como:

$$\delta Re = \left[\left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} \delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial V_f} \delta V_f \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} \delta D \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} \delta \mu \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (A17)$$

as derivadas parciais podem ser substituídas na equação A4 e, logo, a incerteza relativa na medição do número de Reynolds pode ser estimada.

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\delta V_f}{V_f} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (A18)$$

O diâmetro foi medido com um paquímetro de resolução de 0,01 mm e um erro de 0,02 mm. Assim a incertezas absoluta e relativa do diâmetro do tubo central ($D = 10,65 \text{ mm}$), são de $\delta D_a = 0,02 \text{ mm}$ e $\frac{\delta D_a}{D_a} = 0,19 \%$, respectivamente. A incerteza nominal do medidor de vazão reportado no manual do fabricante é de $\delta V_f = 0.8\% V_f \pm 0.2\% FS$ para um fundo de escala de $FS = 500 \text{ sccm}$. Os valores de vazão utilizados se encontram reportados na Tabela 7. No que diz respeito aos valores da densidade e da viscosidade do etileno, são utilizados aqui os valores recomendados pelo fabricante do medidor para o cálculo da vazão de combustível, obtida a partir da diferença de pressão medida pelo equipamento. Nos medidores da ALICAT Scientific, dados da referência “NIST REFPROP 9 database” são empregados e valores relativos de incerteza de $\delta \rho / \rho = 0,02\%$ e $\delta \mu / \mu = 5\%$, reportados pelo REFPROP para a densidade e a viscosidade do etileno, respectivamente. Finalmente, as incertezas relativas nas variáveis medidas utilizadas para calcular o número de Reynolds são mostradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de incerteza das variáveis empregadas no cálculo do número de Reynolds do jato de etileno

Casos	Re	$\delta \rho / \rho$ (%)	$\delta V_f / V_f$ (%)	$\delta D / D$ (%)	$\delta \mu / \mu$ (%)	$\delta R_e / R_e$ (%)
A	17,82	0,02	2,05	0,19	5	5,41
B	22,27		1,8			5,32
C	26,95		1,63			5,26
D	31,18		1,51			5,23
E	33,41		1,47			5,21
F	37,86		1,39			5,19
G	43,21		1,32			5,17

Note-se que o valor da incerteza do número de Reynolds é dominado pela incerteza da viscosidade dinâmica.

Apêndice B

Neste apêndice são apresentados os experimentos exploratórios realizados para obter familiaridade com as técnicas LIF e LII. Estes experimentos preliminares foram feitos em chamas pré-misturadas de etileno e ar, estabilizadas num queimador de chama plana do tipo McKenna. Ao contrário das chamas não pré-misturadas apresentadas no capítulo 5, as chamas pré-misturadas apresentam uma evolução da fuligem menos complicada de se interpretar, pois esta varia apenas na coordenada vertical [23]. Os resultados mostrados a seguir ajudaram a compreender os fenômenos envolvidos nas técnicas de medição por laser, assim como na definição da configuração experimental final.

B.1

Queimador de chama plana laminar McKenna

O queimador “McKenna” [120], tem sido empregado para calibração em estudos em combustão [121], pois permite estabilizar uma frente de chama plana na qual a distribuição de temperatura e da concentração de espécies pode ser considerada unidimensional, dependente apenas da coordenada longitudinal, também chamada de altura sobre o queimador [79,121,122].

A Figura 43 mostra uma chama plana de etileno e ar obtida no queimador McKenna empregado neste estudo. Sua cor majoritariamente amarela é evidência das regiões fuliginosas desta chama rica em combustível. Estudos prévios realizados no mesmo queimador, no laboratório de combustão e engenharia de sistemas térmicos da UFSC, permitiram determinar a velocidade de chama laminar e energia de ativação global aparente quando há combustão do metano em pré-misturas com ar [142,143].

O queimador McKenna é formado por duas câmaras concêntricas, fechadas por uma base e por um anel poroso sinterizado de aço inox, as quais correspondem à mistura combustível e ao gás de cobertura, respetivamente. Para estabilizar a chama emprega-se uma placa de aço inox de 60 *mm* de diâmetro a 21 *mm* de altura, paralela à base do queimador [15]. Devido à elevada temperatura da chama, para evitar danos ao material da placa porosa de injeção da mistura combustível, esta é internamente resfriada por água que circula numa serpentina. O

material poroso tem por finalidade assegurar uma distribuição homogênea da mistura na saída do queimador. Cabe ressaltar que pequenas variações na altura da placa ou da vazão de água de resfriamento não afetam fortemente a distribuição de propriedades da chama [144].

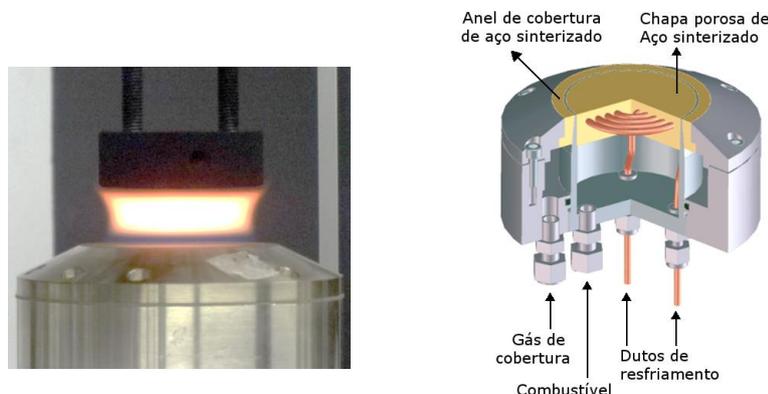


Figura 43 - Chama laminar de etileno e ar obtida num queimador McKenna e estabilizada por uma placa circular de aço [120]

No caso da estabilização de chamas em misturas pobres ou estequiométricas, é sabido que estas são planas ou uni dimensionais. Neste caso as propriedades do processo de combustão podem ser descritas apenas como função da altura acima do queimador (HAB). No entanto, esta hipótese é questionável em chamas ricas, pois distribuições radiais não uniformes de temperatura e concentração de fuligem podem ser encontradas [79,122].

B.2

Formação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e fuligem em chamas laminares pré-misturadas de etileno e ar

Diferentes esquemas de detecção foram empregados, com o intuito de evidenciar a presença das espécies aromáticas e da fuligem. Assim, variar o atraso na detecção em várias faixas espectrais permite discriminar o sinal de incandescência daquele da fluorescência e, logo, acompanhar a mudança do tamanho dos PAH.

B.3

Variação do sinal de fluorescência e incandescência devido à detecção em diferentes faixas espectrais

Estuda-se nesta seção o decaimento dos sinais combinados de fluorescência e de incandescência induzida por laser, empregando para isto diferentes faixas

espectrais nos filtros de detecção das câmaras intensificadoras. O regime de combustão escolhido é aquele correspondente à riqueza de $\varphi = 1,98$ e $9,3 \text{ slpm}$ de vazão total da mistura, as vazões de ar e etileno empregadas são de $7,8 \text{ slpm}$ e $1,5 \text{ slpm}$ respectivamente. São capturadas e processadas 400 imagens para cada filtro. Não foi empregado gás de cobertura (N_2) nestes experimentos.

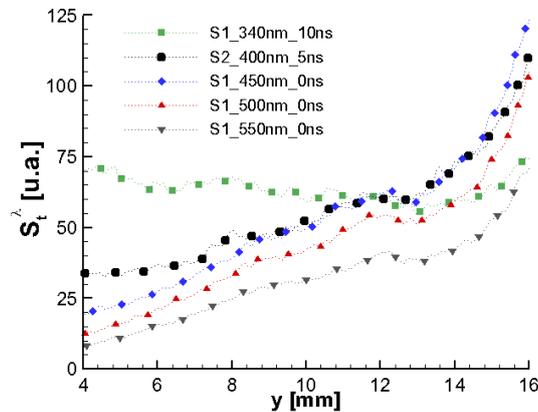


Figura 44 - Sinal detectado imediatamente após excitação laser para diferentes faixas de detecção espectral

A Figura 44 mostra a distribuição de intensidade do sinal medido ao longo do eixo central ($x = 0$) $S_{dt}^{\lambda det}$ para diferentes bandas de detecção. Nesta figura observa-se a redução do valor do sinal de incandescência e fluorescência com o incremento do comprimento de onda de detecção. As bandas espectrais dos filtros de detecção empregados são de $340 \pm 12,5 \text{ nm}$, $400 \pm 12,5 \text{ nm}$, $450 \pm 12,5 \text{ nm}$, $500 \pm 12,5 \text{ nm}$ e $550 \pm 12,5 \text{ nm}$, e um esquema de detecção (*prompt*) é empregado, isto é, detecção imediata após a excitação e com 10 ns de tempo de captura (*gate*). De modo geral esta figura permite verificar que ocorre um aumento do sinal entre a superfície do queimador e a placa estabilizadora. Porém, se pode observar uma maior intensidade na região $y < 10 \text{ mm}$ para a banda $340 \pm 20 \text{ nm}$. Esta banda é mais seletiva para PAH de baixa massa molar (um e dois anéis), que parecem ser formados prontamente após a frente de chama. Segundo foi constatado na revisão bibliográfica, é esperado que o aporte da fluorescência dos PAHs para o sinal decaia nas regiões próximas ao queimador quando a banda de detecção espectral se desloca para o infravermelho, o que é associado ao incremento da massa molecular dos PAH. Já para as regiões superiores, $y > 10 \text{ mm}$, o incremento da complexidade dos PAH e a aparição da fuligem são esperados, o que parece ser observado pelo incremento do sinal.

B.4

Comparação temporal dos sinais medidos em diferentes faixas espectrais

Utilizam-se aqui as técnicas laser para caracterizar a presença de PAH e fuligem, numa chama plana pré-misturada de etileno e ar, estabilizada no queimador McKenna. O regime de combustão escolhido é o de uma chama muito fuliginosa, com uma riqueza $\varphi = 3.7$ e 10 slpm de vazão total da mistura, as vazões de ar e etileno empregadas são de $8,7 \text{ slpm}$ e $2,24 \text{ slpm}$, respectivamente e é empregada uma vazão de nitrogênio (N_2) de $14,8 \text{ slpm}$ como gás de cobertura (N_2). As vazões de ar e etileno são controladas, respectivamente, por um medidor controlador de vazão *Alicat MCH – 100SLPM – D* e um rotâmetro *OMEL*.

O sistema de excitação é composto por um laser BRILLANT B que fornece um feixe com energia média medida de $0,397W @ 266 \text{ nm}$ a $6,0 \text{ Hz}$ de cadência. Neste comprimento de onda do laser é possível excitar simultaneamente a fluorescência dos PAH e a incandescência da fuligem na chama. O feixe é expandido mediante 2 pares de lentes cilíndricas e côncavas, resultando num plano de espessura $0,5 \text{ mm}$ e seção transversal de $280 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$.

O sistema detecção empregado teve com o objetivo caracterizar o decaimento temporal dos sinais conjuntos da incandescência da fuligem S_{LII} e da fluorescência dos PAH, $S_{(LII+PAH)}$, resultado da excitação ultravioleta do laser. Para isto duas câmaras intensificadoras com diferentes filtros de detecção são empregadas. A primeira emprega um filtro de $340 \pm 20 \text{ nm}$ e a segunda um filtro de $400 \pm 20 \text{ nm}$. Como foi mostrado no capítulo 2, considera-se que o sinal da primeira câmara, $S_{t < 50}^{340}$, contém o aporte dos PAH de menor tamanho (entre 2 e 3 anéis) e a segunda câmara, S_t^{400} , os PAHs de maior número de anéis. A comparação do decaimento temporal destes dois sinais permite, então, um estudo da presença de PAH ao longo da chama e sua transformação em fuligem. O decaimento temporal do sinal é observado utilizando diferentes atrasos de detecção. Neste estudo incrementos de 10 ns no atraso de detecção, iniciando em 5 até chegar a 85 ns , e tempos de abertura iguais a 10 ns são empregados para ambas as câmaras. Em cada medição, 400 pares de imagens instantâneas de incandescência e fluorescência da chama foram obtidas pelas câmaras e utilizadas para compor a média.

A Figura 45 mostra os campos médios da intensidade normalizada de fluorescência de PAHs e fuligem, S_t^λ , a jusante do queimador para o caso de atraso nulo. Note-se que as regiões abaixo de $y = 4 \text{ mm}$ e acima de $y = 16 \text{ mm}$ mostram sinais de baixa intensidade ou de interferência com o queimador ou com a placa de estabilização, e não são mostradas aqui. Nesta figura é possível observar uma maior intensidade no lado direito das imagens, o que talvez possa ser atribuído à atenuação do plano laser ao passar pela chama. As bordas da chama, situadas em $|x| \approx 30 \text{ mm}$, são caracterizadas por baixo sinal, e representam as regiões com a cobertura do gás nitrogênio. O campo do sinal S_0^{340} apresenta uma distribuição relativamente homogênea, com intensidade $S_0^{340} > 0,7$, à diferença do campo do sinal S_0^{400} , cujo valor apresenta um máximo na região da chama próxima da placa de estabilização na região inicial da chama, $y < 10 \text{ mm}$. O sinal S_0^{340} apresenta uma diferença do sinal S_0^{400} . Nesta região acredita-se que a fuligem é recentemente formada. Esta diferença poderia evidenciar a existência de PAHs de menor tamanho.

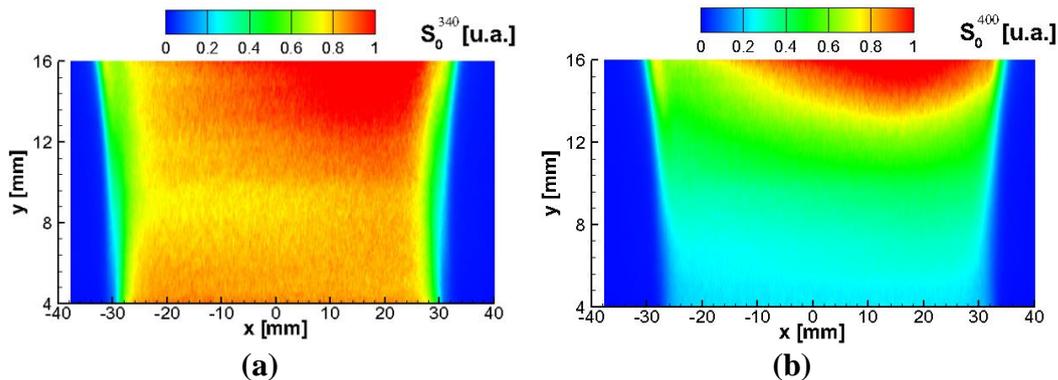


Figura 45 - Campos médios dos sinais detectados sem atraso para (a) $\lambda_{det} = 340 \text{ nm}$ e (b) $\lambda_{det} = 400 \text{ nm}$

A Figura 46 mostra os perfis longitudinais adimensionais dos sinais $S_t^\lambda(x=0)$ em escala logarítmica, capturadas simultaneamente e construídas mediante a variação do atraso nas janelas de detecção. É possível observar o decaimento de cada sinal no tempo, de forma mais pronunciado para S_t^{340} , até atingir o atraso de 45 ns, onde os sinais tornam-se similares. A duração deste intervalo de tempo é similar ao tempo de vida da fluorescência e, por isso, pode ser assumido que a presença dos PAHs de menor tamanho é responsável pela diferença entre estes sinais.

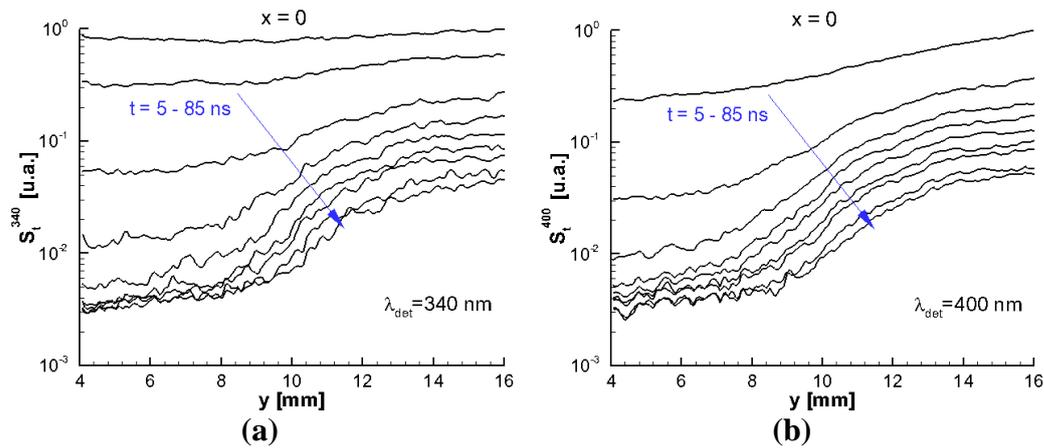


Figura 46 - Evolução longitudinal do sinal normalizada em $x = 0$, para diferentes atrasos, nas bandas de 340 nm e 400 nm

A Figura 47 traz decaimento temporal a diferentes alturas para os comprimentos de onda de detecção de 340 e 400 nm. Esta figura mostra claramente que os sinais se tornam semelhantes a partir de 45 ns. Também é importante mencionar a similitude do decaimento temporal em $y > 14$ mm. Neste caso parece ser razoável assumir que sinal ocorre principalmente devido ao resfriamento das partículas de fuligem. A presença da fuligem é apreciável a partir desta altura [126] e pode estar superposta com o sinal de fluorescência.

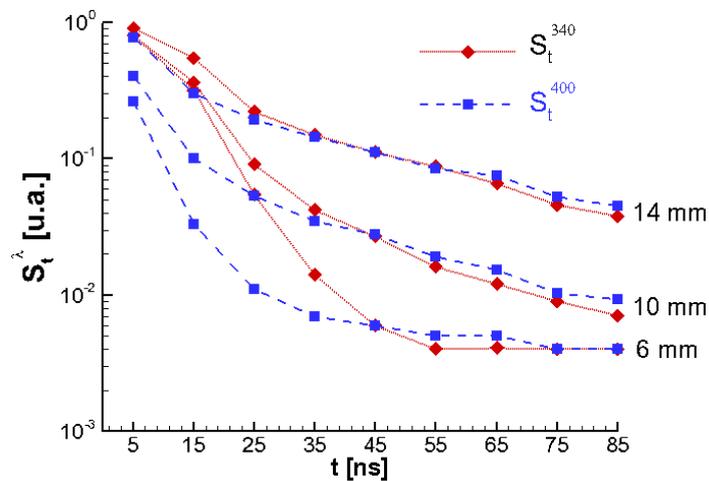


Figura 47 - Evolução temporal dos sinais normalizados com o tempo de atraso da detecção para diferentes alturas a partir da superfície do queimador