

Bibliografia

- [1] WILLIAMS, F.A. "Combustion Theory", Perseus books, 1985.
- [2] FIGUEIRA DA SILVA, L.F.; AZEVEDO, J.L.F.; KORZENOWSKI, H. "Unstructured Adaptive Grid Flow Simulations of Inert and Reactive Gas Mixtures". *Journal of Computational Physics*, Vol. 160, No. 2, pp. 522-540, 2000
- [3] KORZENOWSKI, H. "Técnica em Malhas Não-Estruturadas para Simulação de Escoamentos a Altos Números de Mach". *PhD Dissertation*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brazil, 1998.
- [4] HEISER, W.H.; PRATT, D. "Hypersonic Airbreathing Propulsion". AIAA Education Series, J.S. Przemiencki, 1994.
- [5] CHENG, S-I. "Hypersonic Propulsion". *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 183-202, 1989.
- [6] BASTOS-NETTO, D.; SINAY, L.; ALVES, C.F.E. "Dinâmica de Combustores Supersônicos". In: II Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Vol. 1, pp. 33-36, 1988.
- [7] ALVES, C.F.E.; BASTOS-NETTO, D. "Some Thermodynamic Aspects in The Optimization of Supersonic Combustors". In: 17th International Symposium of Space Technology and Science (17th ISSTS), Vol. 1, pp. 255-259, 1990.
- [8] BARTHELEMY, R.R. "The National Aero-Space Plane Program". In: AIAA First National Aero-Space Plane Conference, AIAA paper 89-5001, 1989.
- [9] <http://www.dfrc.nasa.gov/Research/HyperX/index.html>
- [10] LEHR, H.F. "Experiments on Shock-Induced Combustion". *Astronautica Acta*, Vol. 17, Nos. 4-5, pp. 589-597, 1972.

- [11] ALPERT, R.L.; TOONG, T-Y. "Periodicity in Exothermic Hypersonic Flows about Blunt Projectiles". *Astronautica Acta*, Vol. 17, pp. 539-560, 1972.
- [12] MORRIS, C.I.; KAMEL, M.R.; HANSON, R.K. "Expansion Tube Investigation of Ram-Accelerator Projectile Flowfields". In: 32th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA paper 96-2680, 1996.
- [13] MORRIS, C.I.; KAMEL, M.R.; HANSON, R.K. "Shock-Induced Combustion in High-Speed Wedge Flows". In: Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 2157-2154, 1998.
- [14] VIGUIER, C.; GOURARA, A.; DESBORDES, D. "Three-Dimensional Structure of Stabilization of Oblique Detonation Wave in Hypersonic Flow". In: Twenty-seventh Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, pp. 3023-3031, 1998.
- [15] YUNGSTER, S.; EBERHARDT, S.; BRUCKNER, A.P. "Numerical Simulation of Shock-Induced Combustion Generated by High-Speed Projectiles in Detonables Gas Mixtures". In: AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 89-0673, 1989.
- [16] CHOI, J.-Y.; JEUNG, I.-S.; YOONG, Y. "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion". *AIAA Journal*, Vol.38, No.7, pp. 1179-1195, 2000.
- [17] LI, C.; KAILASANATH, K.; ORAN, E.S. "Detonation Structures Behind Oblique Shocks". *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 4, pp. 1600-1611, 1993.
- [18] THAKER, A.A.; CHELLIAH, H.K. "Numerical Prediction of Oblique Detonation Wave Structures Using Detailed and Reduced Reaction Mechanisms". *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 1, No. 10, pp. 347-376, 1997.
- [19] GRISMER, M.J.; POWERS, J.M. "Numerical Prediction of Oblique Detonation Stability Boundaries". *Shock Waves*, Vol. 6, No. 3, pp. 3147-156, 1996.
- [20] VLASENKO, V.; SABELNIKOV, V. "Numerical Simulation of Inviscid Flows with Hydrogen Combustion after Shock Waves and in Det-

- onation Waves". In: 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Paper 94-3177, 1994.
- [21] FIGUEIRA DA SILVA, L.F.; DESHAIES, B. "Stabilization of an Oblique Detonation Wave by a Wedge: A Parametric Numerical Study". *Combustion and Flame*, Vol. 121, No. 4, pp. 152-166, 2000.
- [22] Anon. "JANNAF: Thermochemical Tables". *Dow Chemical Co* Midland, Mich, Dec 1960 to jun.1970.
- [23] BALAKRISHNAN G.; WILLIAMS, F.A. "Turbulent Combustion Regimes for Hypersonic Propulsion Employing Hydrogen-Air Diffusion Flames". *Journal of Propulsion and Power* Vol. 10, No. 3, pp. 434-436, 1993.
- [24] THOMPSON, K.W. "Time Dependent Boundary Conditions for Hyperbolic Systems". *Journal of Computational Physics*, Vol. 68, No.1, pp. 1-24, 1987.
- [25] STRANG, G. "On the Construction and Comparison of Difference Schemes". *SIAM J*, Vol. 5, pp. 506-517, 1968.
- [26] MAVRIPLIS, D.J. "Multigrid Solution of the Two-Dimensional Euler Equations on Unstructured Triangular Meshes". *AIAA Journal*, Vol.26, No.7, pp. 824-831, 1988.
- [27] BYRNE, G.D.; DEAN A.M. "The Numerical Solution of Some Kinetics Models with VODE and CHEMKIN II". *Computers & Chemistry*. Vol. 17, No. 3, pp. 297-302, 1993.
- [28] LIOU, M.-S. "A Sequel to AUSM: AUSM⁺". *Journal of Computational Physics*, Vol. 129, No. 2, pp. 364-382, 1996.
- [29] LIOU, M.-S.; STEFFEN Jr, C.J. "A New Flux Splitting Scheme". *Journal of Computational Physics*, Vol. 107, No. 1, pp. 23-29, 1993.
- [30] FIGUEIRA DA SILVA, L.F. [mensagem pessoal], 2003.
- [31] HIRSCH, C. "Numerical Computation of Internal and External Flows," John Wiley & Sons, 1990.
- [32] AZEVEDO, J.L.F.; STRAUSS, D.; FIGUEIRA DA SILVA, L.F. "An Order of Accuracy Analysis for Flux-Vector Splitting Schemes on Unstructured Grids". In: 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 1999.

- [33] KALLINDERIS, Y.; VIJAYAN, P. “Adaptive Refinement-Coarsening Scheme for Three-Dimensional Unstructured Meshes”. *AIAA Journal*, Vol. 31, No 8, pp. 1440-1447, 1993.
- [34] SPEARES, W.; BERZINS, M. “A 3D Unstructured Mesh Adaptation Algorithm for Time-Dependent Shock-Dominated Problems”. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 25, pp. 81-104, 1997.
- [35] DOMPIERRE, J.; LABBÉ, P.; GARON, A.; CAMARERO, R. “Unstructured Tetrahedral Mesh Adaptation for Two-Dimensional Space-Time Finite Elements”. In: AIAA 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA paper 2000-0810, 2000.
- [36] WEBSTER, B.E.; SHEPHARD, M.S.; RUSAK, Z.; FLAHERTY, J.E. “Automated Adaptive Time-Discontinuous Finite Element Method for Unsteady Compressible Airfoil Aerodynamics”. *AIAA Journal*, Vol. 32, No 4, pp. 748-757, 1994.
- [37] BOWYER, A. “Computing Dirichlet Tessellations”. *The Computer Journal* Vol. 24, No. 2, pp 162-166, 1981.
- [38] VENKATAKRISHNAN, V. “Convergence to Steady State Solutions of the Euler Equations on Unstructured Grid with Limiters”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 118, No. 1, pp. 120-130, 1994.
- [39] LARISCH, E. “Interactions of Detonations Waves”. *Journal of Fluids Mechanics*, Vol 6, No.3, pp. 392-400, 1959.
- [40] PRATT, D.T.; HUMPHREY, J.W.; GLENN, D.E. “Morphology of Standing Oblique Detonation Waves”. *Journal of Propulsion*, Vol.7, No. 5, pp. 837-845, 1991.
- [41] KASAHARA, J.; FUJIWARA, T.; ENDO, T.; ARAI, T. “Chapman-Jouget Oblique Detonation Structure Around Hypersonic Projectiles”. *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 8, pp. 1553-1561, 2001.
- [42] PAPALEXANDRIS, M.V. “A Numerical Study of Wedge-Induced Detonations”. *Combustion and Flame*, Vol. 120, No. 4, pp. 526-538, 2000.
- [43] PIMENTEL, C.A.R.; AZEVEDO, J.L.F.; FIGUEIRA DA SILVA, L.F.; DESHAIES, B. “Numerical Study of Wedge Supported Oblique Shock

- Wave-Oblique Detonations Wave Transitions". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. XXIV, pp. 149-157, 2002.
- [44] ZELDOVICH, Ya.B.; BARENBLATT G.I.; LIBROVICH, V.B.; MAKHVILADZE, G.M. "The Mathematical Theory of Combustion and Explosions", Consultants Bureau, 1985.
- [45] CLAVIN, P. "Premixed Combustion and Gas Dynamics". *Annual Review of Fluids Mechanics*, Vol. 26, pp. 321-352, 1994.

A

Resultados Complementares

Neste apêndice são apresentados casos complementares que levaram seja à obtenção de detonações CJ, seja ao desacoplamento da onda de detonação oblíqua.

As figs. A.1 - A.3, mostram os resultados para um semi ângulo do diedro $\delta = 30^\circ$ e parâmetros do escoamento livre de $M_\infty = 8$, $T_\infty = 300$ K, $p_\infty = 0.75$ atm, neste caso a interação resultou em uma onda de detonação CJ.

As figs. A.4 - A.6, mostram os resultados para um semi ângulo do diedro $\delta = 40^\circ$ e parâmetros do escoamento livre de $M_\infty = 8$, $T_\infty = 275$ K, $p_\infty = 0.75$ atm, neste caso a interação resultou em um desacoplamento entre a OCO e a frente de reação.

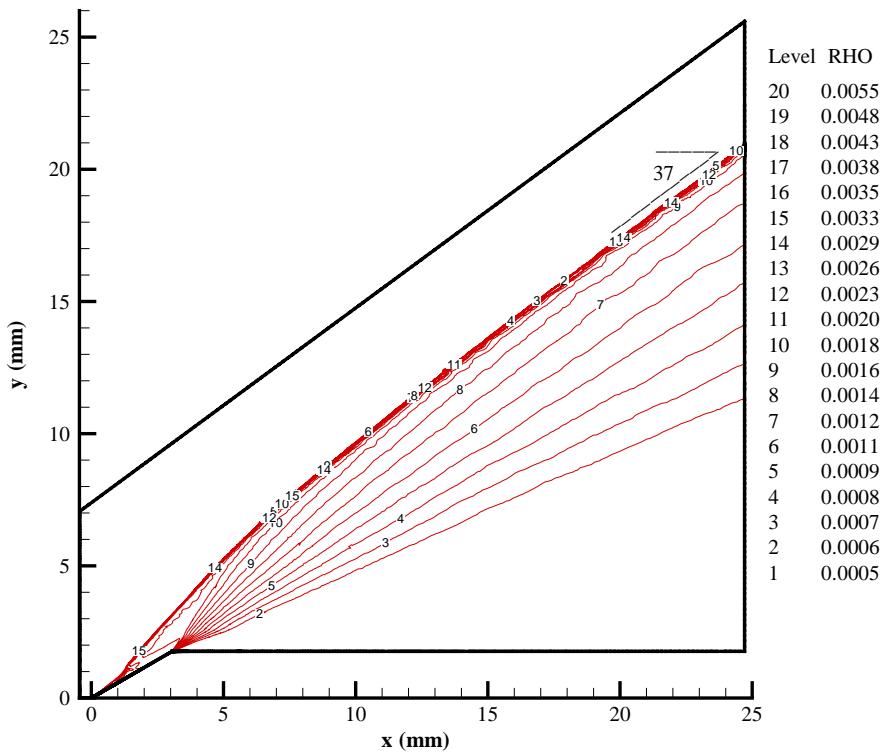
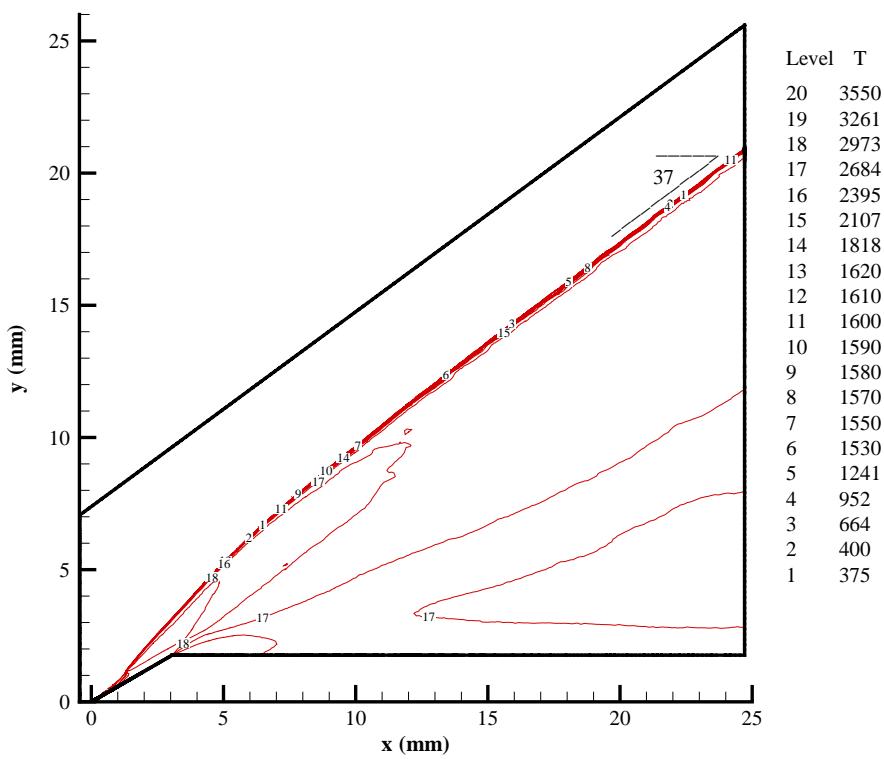


Figura A.1: Contornos de temperatura (K) e densidade (g/cm^3), para $\delta = 30^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 300$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

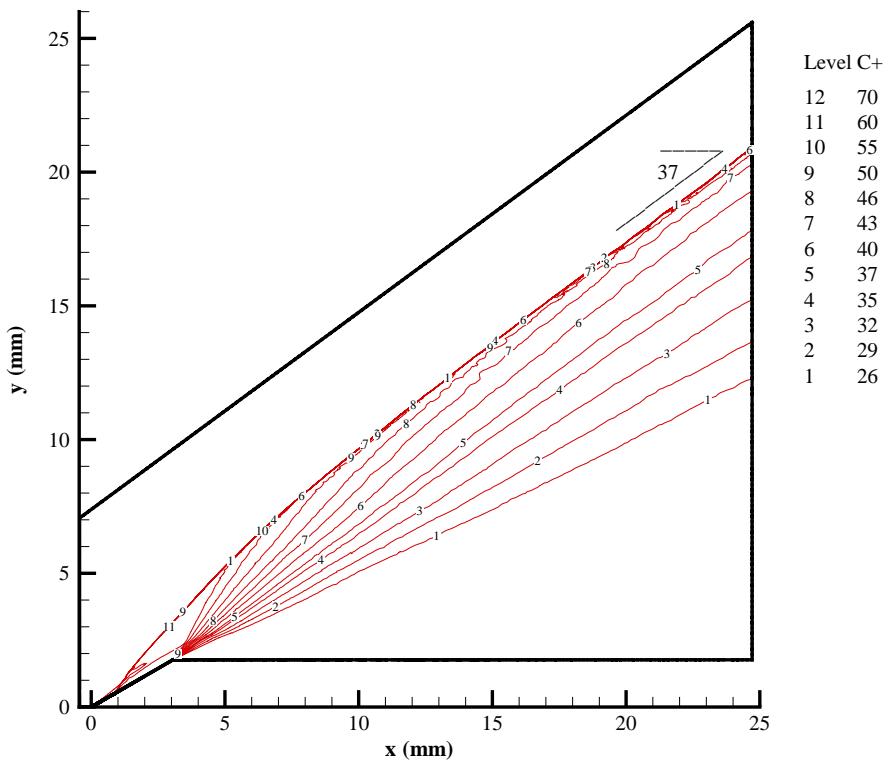
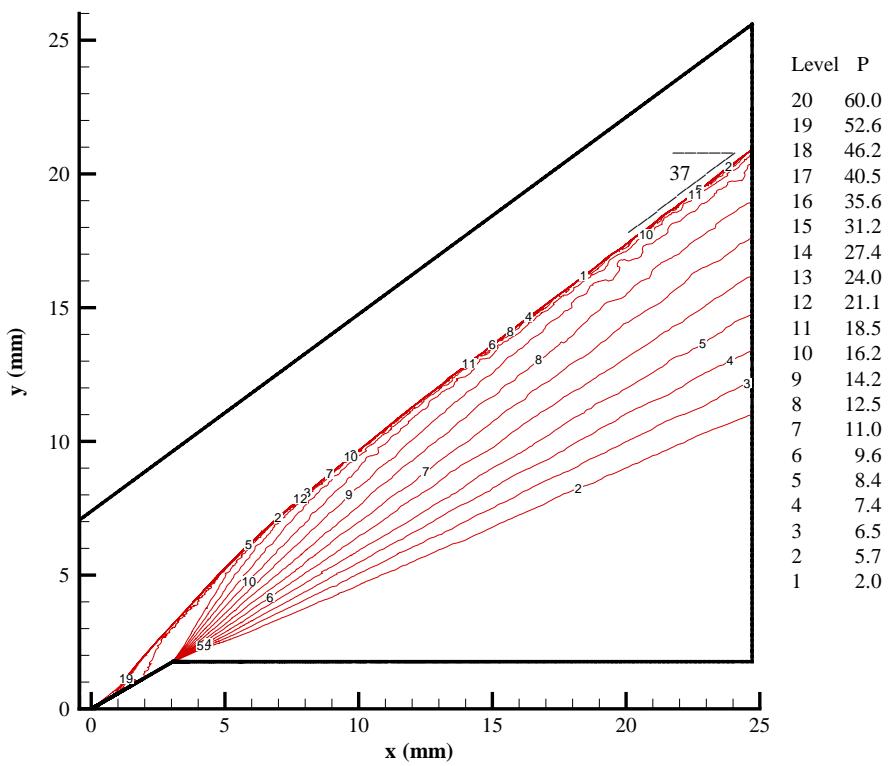


Figura A.2: Contornos de pressão (atm) e da característica esquerda C^+ , para $\delta = 30^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 300$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

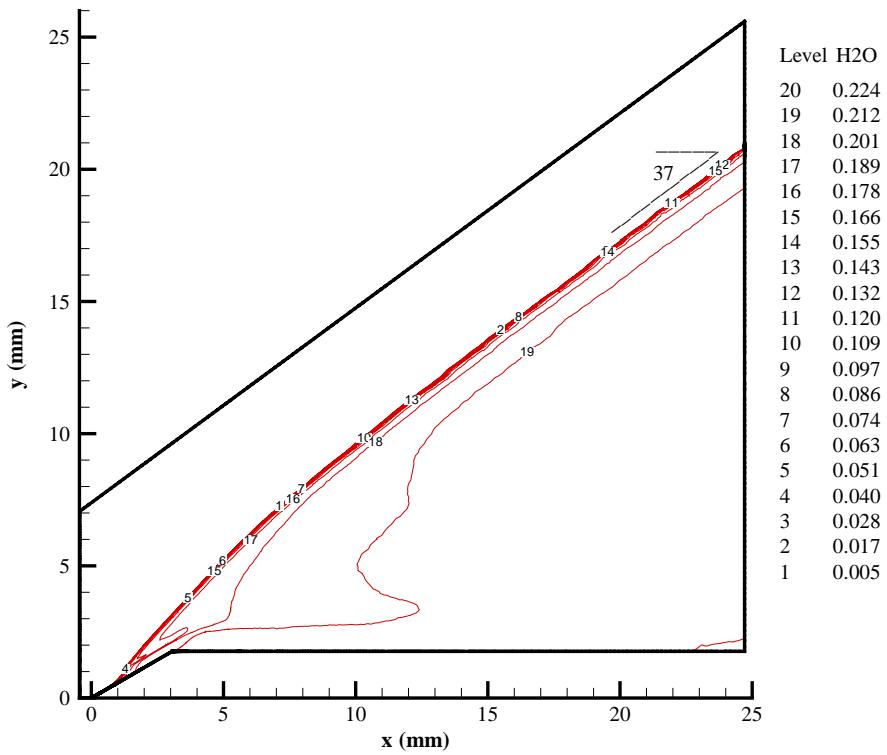
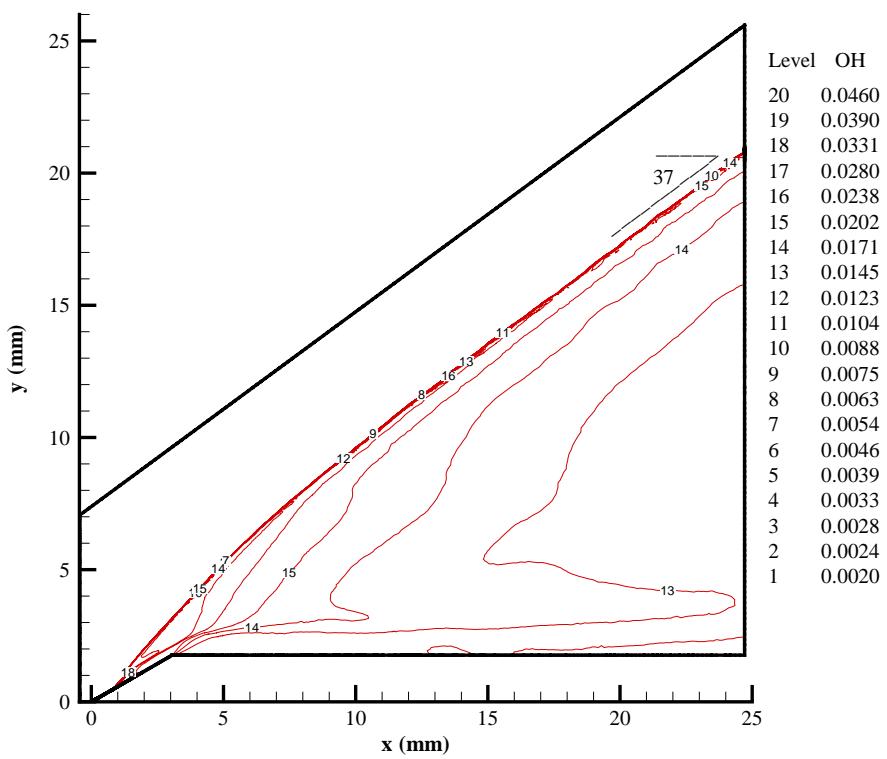


Figura A.3: Contornos da fração de massa dos radicais OH e H₂O, para $\delta = 30^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 300$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

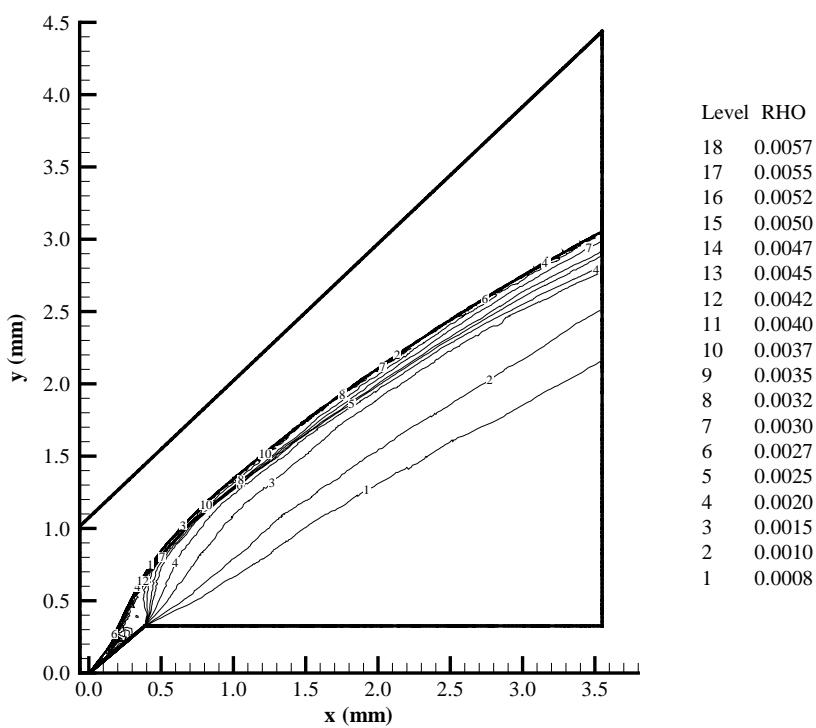
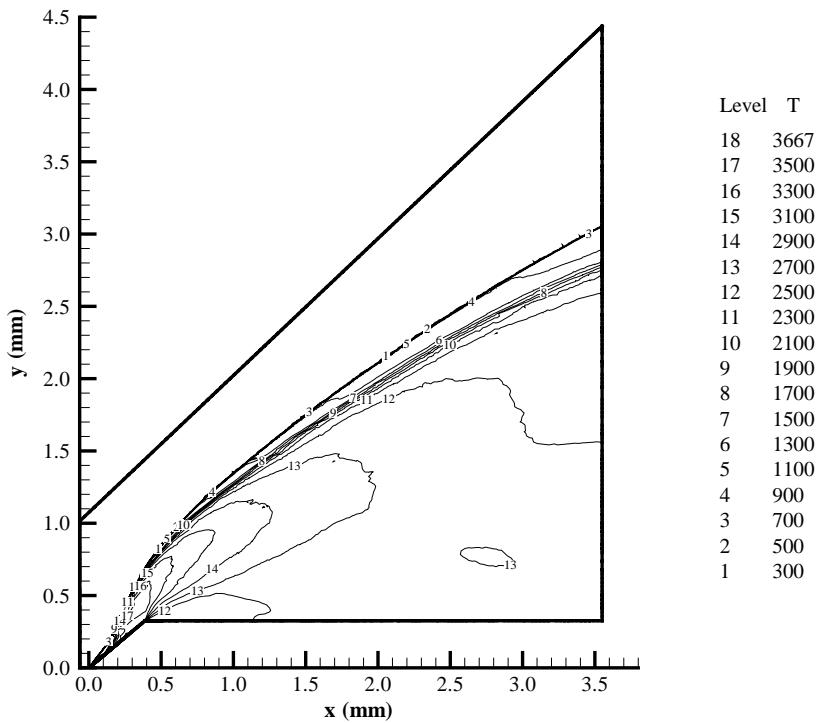


Figura A.4: Contornos de temperatura (K) e densidade (g/cm^3), para $\delta = 40^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 275$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

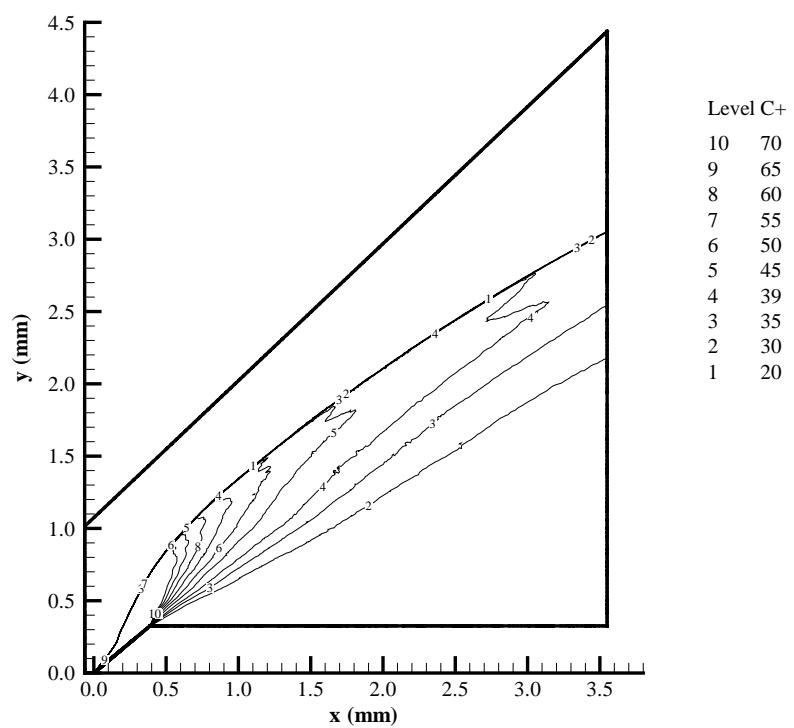
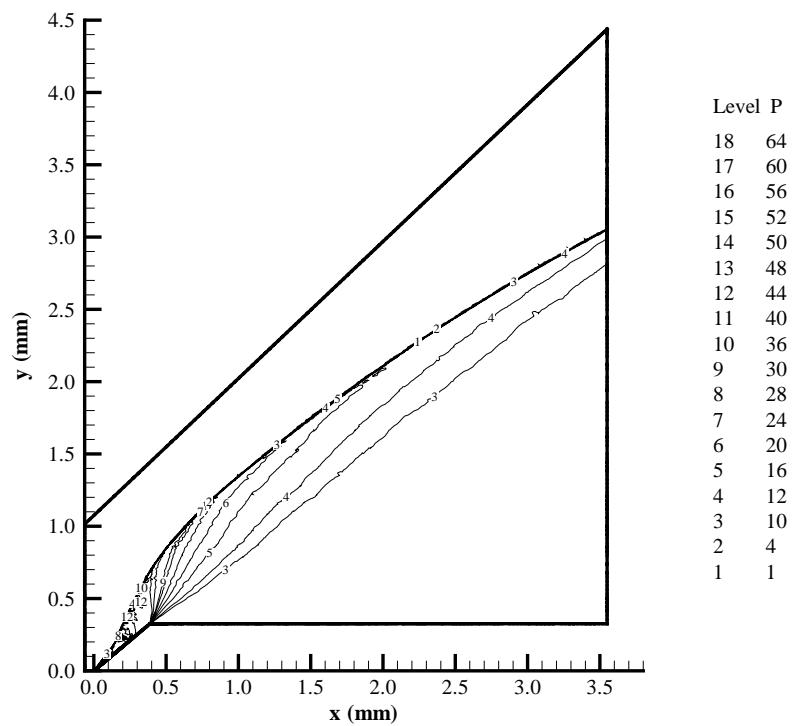


Figura A.5: Contornos de pressão (atm) e da característica esquerda C^+ , para $\delta = 40^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 275$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

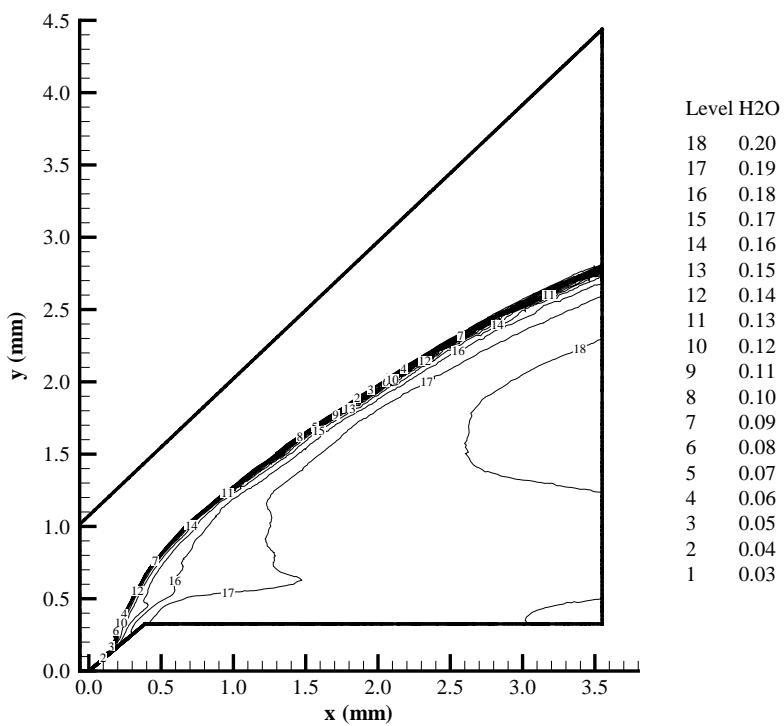
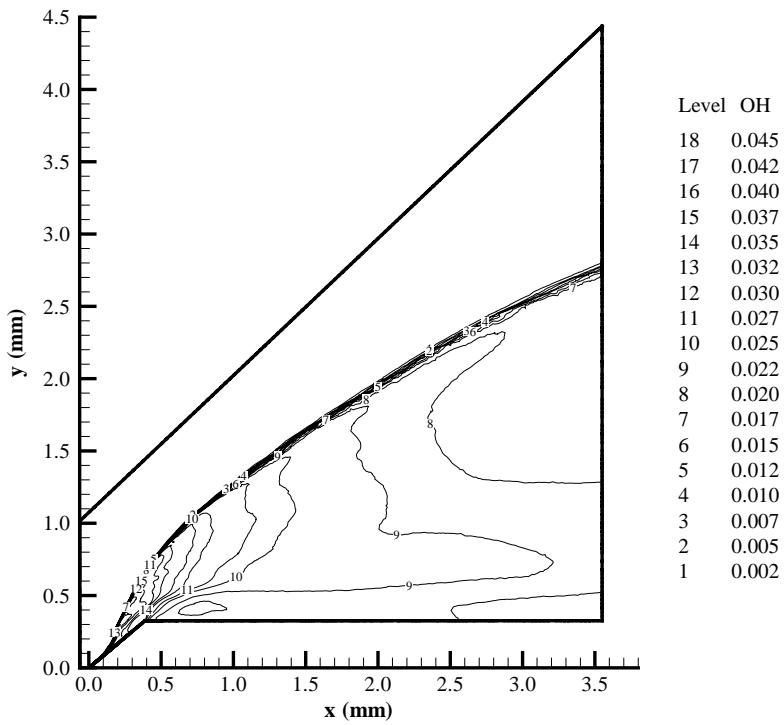


Figura A.6: Contornos da fração de massa das espécies químicas OH e H₂O, para $\delta = 40^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 275$ K e $p_\infty = 0,75$ atm.

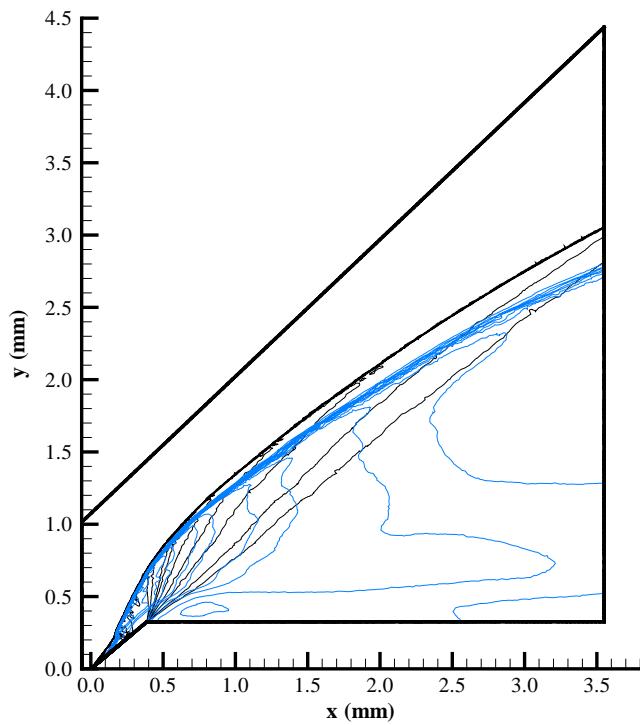


Figura A.7: Contornos de pressão (atm) (preto) e fração de massa do OH (azul), para $\delta = 40^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 275$ K, $p_\infty = 0,75$ atm.

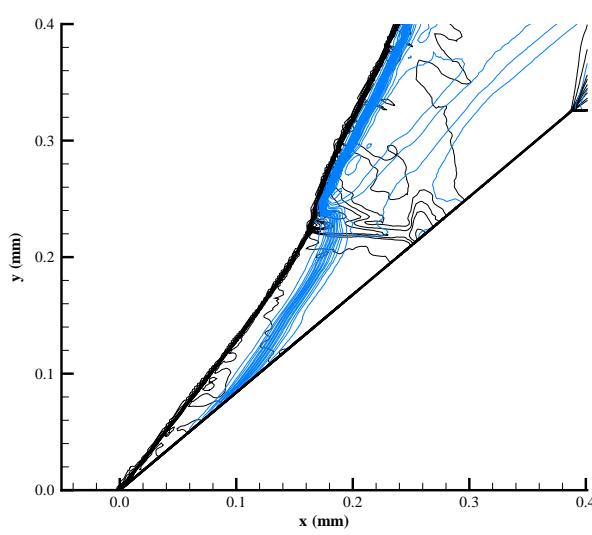


Figura A.8: Zona ampliada da transição OCO/ODO, mostrando os contornos de pressão (atm) e fração de massa do OH (fig.A.7).

B

Iniciação de uma ODO para valores de ângulo do diedro próximos ao valor correspondente à detonação Chapman-Jouguet.

Neste apêndice são apresentados os resultados obtidos para ângulos do diedro próximos ao ângulo δ_{cj} . Cabe mencionar que os parâmetros do escoamento livre para este caso diferem dos demais valores utilizados nos casos do capítulo 4, isto porque a iniciação da combustão para ângulos próximos a δ_{cj} necessita, seja de comprimentos de rampa muito grandes, seja de temperaturas ou pressões elevadas.

A fig. B.1 mostra os resultados para valores do escoamento não perturbado de $M_\infty = 8$, $T_\infty = 600$ K, $p_\infty = 2,5$ atm e um ângulo de diedro de $\delta = 11^\circ$. Para estes parâmetros, os ângulos do diedro e da ODO no estado CJ δ_{cj} e θ_{cj} , calculados pelas polares de detonação, são $10,2^\circ$ e $25,4^\circ$, respectivamente.

Nesta figura é possível observar que o escoamento apresenta uma onda de choque inicial (OCO), a jusante da qual o processo de combustão é iniciado. Mais a jusante ocorre a transição da OCO para uma onda de detonação. A ODO apresenta um ângulo de $\approx 31^\circ$, maior que aquele obtido pela análise das polares de detonação ($25,5^\circ$). A jusante desta ODO observa-se outra onda de choque, a qual emana do ponto triplo e que possui um ângulo de $\approx 23,5^\circ$.

Na fig. B.1 também foi traçada uma linha de corrente que atravessa a região da ODO.

O ângulo de deflexão desta linha de corrente através da ODO é de aproximadamente 5° . Em seguida, ao cruzar a OCO presente na região dos produtos de combustão, esta linha de corrente torna-se paralela à superfície do diedro.

Este ângulo da ODO ($\approx 31^\circ$) obtido nas simulações, parece estar de acordo com o ângulo de uma ODO fraca que seria obtida com um

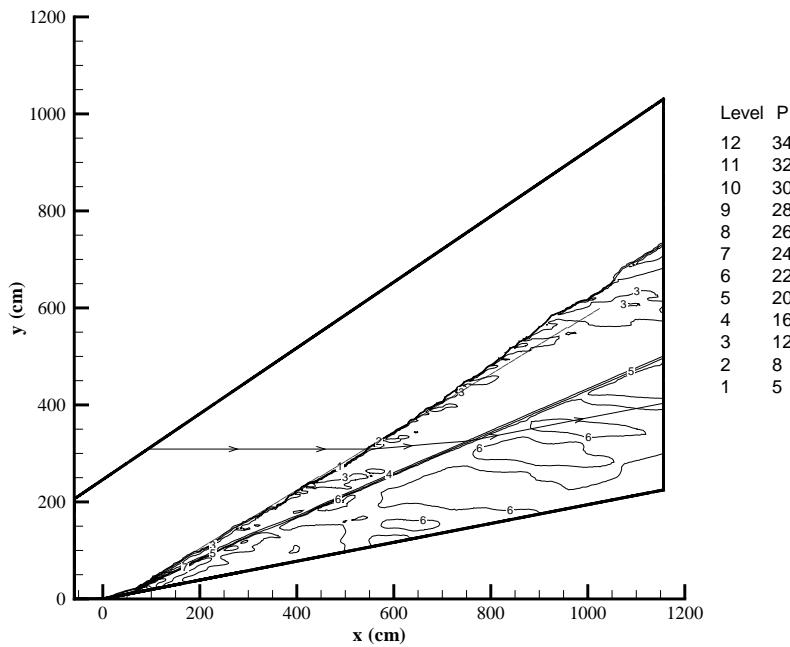


Figura B.1: Contornos de pressão (atm), para $\delta = 11^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 600$ K e $p_\infty = 2,5$ atm.

ângulo do diedro de $4,8^\circ$ segundo as polares de detonação. Este valor é muito próximo da deflexão da linha de corrente a jusante da ODO obtida, $\approx 5^\circ$. Os valores da pressão e da temperatura obtidos na simulação e aquelas calculadas para a ODO fraca pelas polares de detonação são 12,8 atm e 2961 K, e 13,2 atm e 2957,9 K, respectivamente.

Este resultado de cálculo foi obtido para duas condições iniciais distintas. Em um caso a todos os volumes de cálculo no instante inicial são atribuídos os valores de M_∞ , T_∞ , p_∞ , e da composição estequeométrica da mistura. No outro caso partiu-se de uma solução inicial na qual a onda de choque correspondente a uma mistura não reativa havia sido estabilizada.

Um estudo mais aprofundado é necessário para determinar a sensibilidade do resultado obtido com a malha utilizada, a qual contem 25501 nós e 50318 volumes, com distribuição aproximadamente uniforme. Também não é possível excluir que a ODO obtida seja de alguma forma “produzida” pelo método numérico de discretização espacial. Optou-se por relatar este resultado devido a sua natureza intrigante e talvez original para que sua memória seja preservada para estudos futuros.

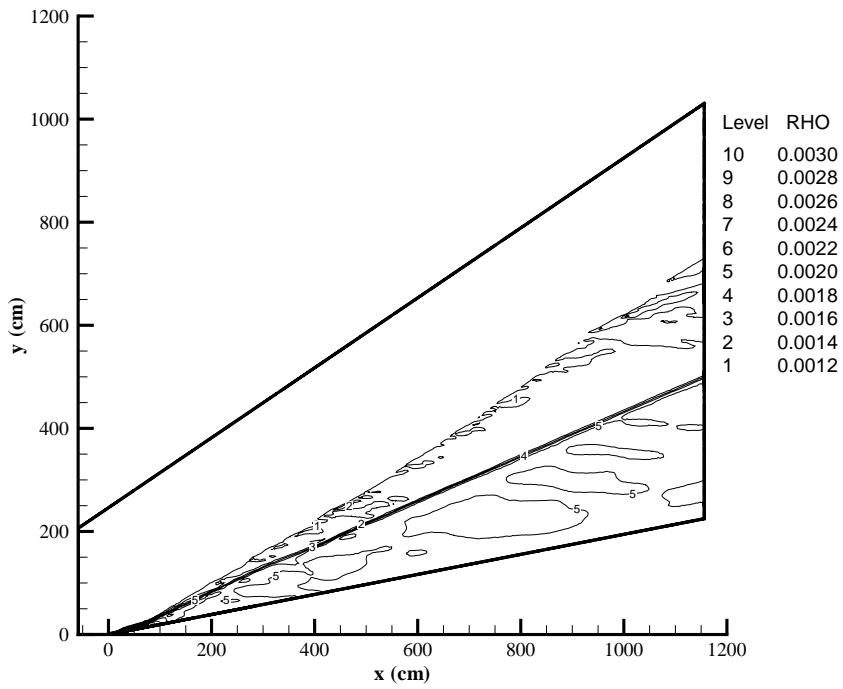
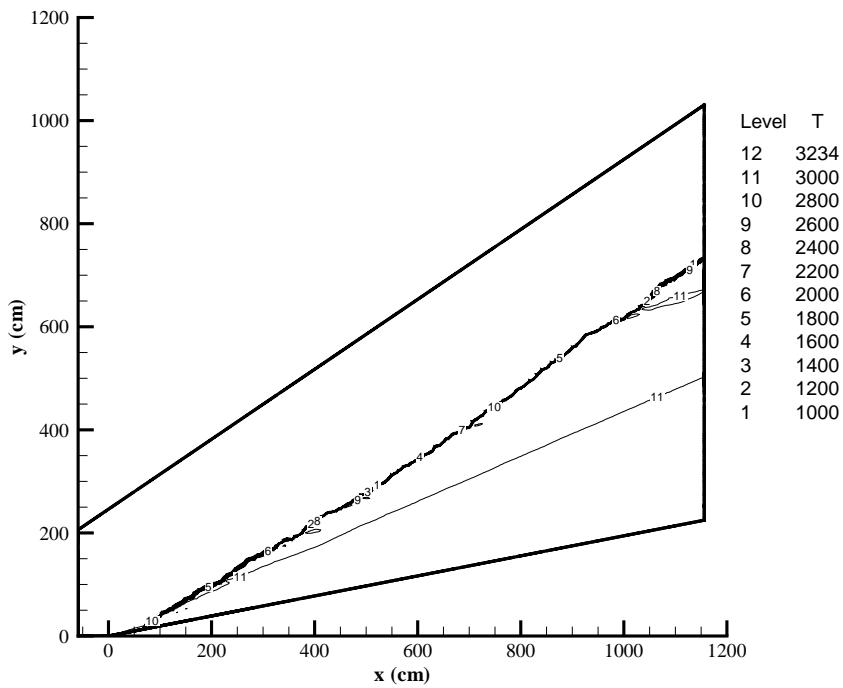


Figura B.2: Contornos de temperatura (K) e densidade (g/cm^3) para $\delta = 11^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 600$ K e $p_\infty = 2,5$ atm.

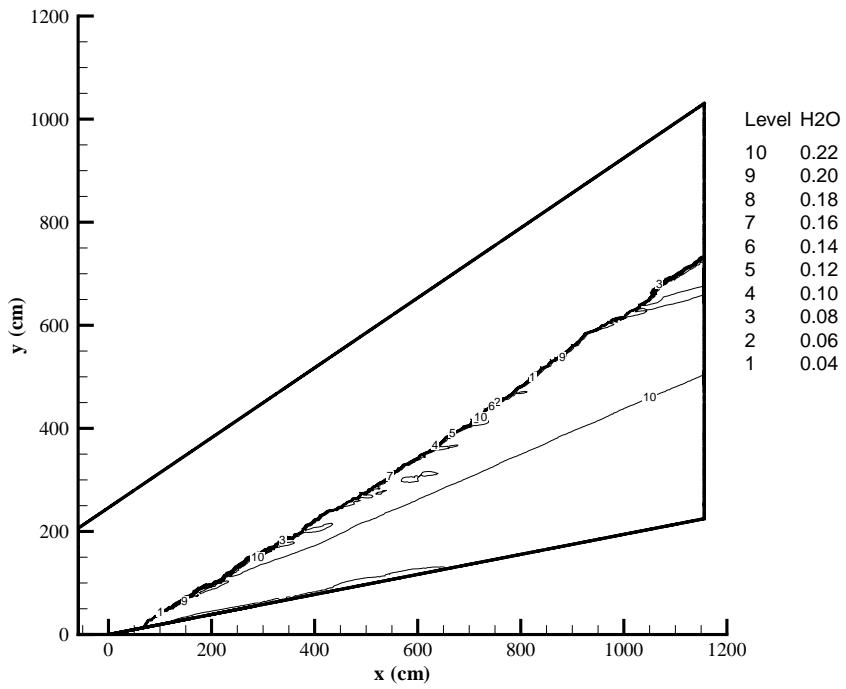
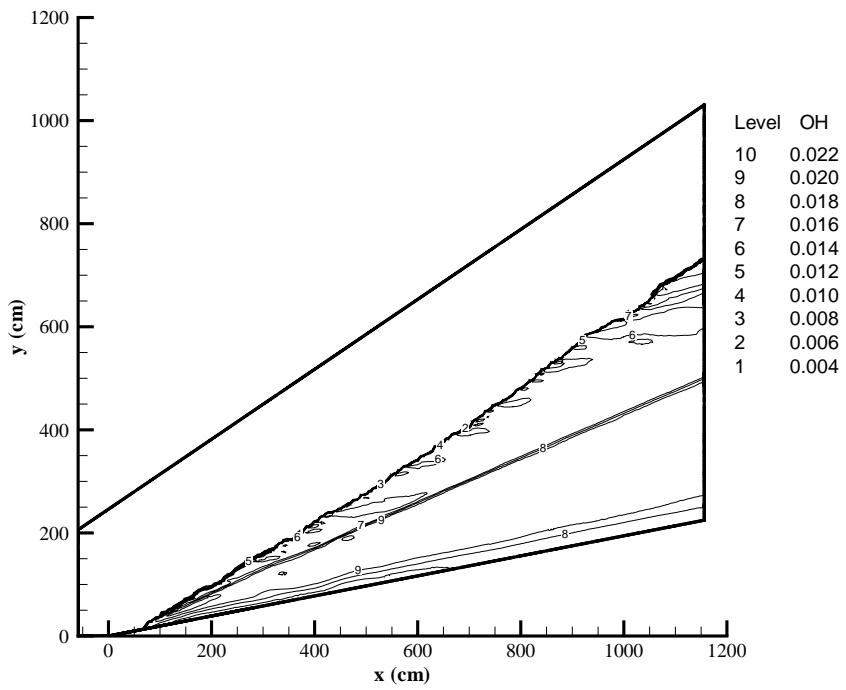


Figura B.3: Contornos da fração de massa das espécies químicas OH e H_2O para $\delta = 11^\circ$, $M_\infty = 8$, $T_\infty = 600$ K e $p_\infty = 2,5$ atm.