



POLITECNICO DI MILANO
DEPARTMENT AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY
DOCTORAL PROGRAM IN AEROSPACE ENGINEERING

NON-IDEAL COMPRESSIBLE-FLUID DYNAMICS:
DEVELOPING A COMBINED PERSPECTIVE ON
MODELING, NUMERICS AND EXPERIMENTS

Doctoral Dissertation of:
Giulio Gori

Supervisor:
Prof. A. Guardone

Co-supervisor:
Prof. P. M. Congedo

Co-supervisor:
Prof. O. Le Maître

Tutor:
Prof. G. Gibertini

The Chair of the Doctoral Program:
Prof. P. Masarati

SUMMARY

Non-Ideal Compressible-Fluid Dynamics (NICFD) is the branch of fluid mechanics devoted to the study of compressible flows whose behavior deviates from the one predicted by the ideal-gas model. This behavior is typical of molecular complex compounds in the vapor phase, namely when the operating thermodynamics conditions are close to the liquid-vapour saturation curve and critical point. NICFD flows are characterized by peculiar features which are not physically admissible under the ideal flow assumption, like for instance a non-ideal increase of the speed of sound upon isentropic expansion. Complex thermodynamic models were devised and applied to the theoretical analysis and numerical simulation of non-ideal flows. Nevertheless, only few experimental data in the NICFD regime were available up to date. Nowadays, the NICFD community is calling for the development of reliable and predictive numerical tools. To do so, the aim is to rely on and mix results from experiments, computations and theory. Since NICFD is a quite unexplored field, the objective is not only to numerically reproduce an observed phenomenon with a high level of fidelity, but also to develop tools which might be reasonably used to predict the reality in situations for which they were not specifically validated nor tested. To this extend, reliable numerical predictions require the further development of sophisticated physical models as well as a systematic treatment of calibration and validation procedure.

This dissertation, moving from the first-ever observations of non-ideal compressible flows, develops a combined perspective on modeling, numerics and experiments regarding NICFD flows and it provides advancements in all the mentioned branches. In this context, this work is a preliminary attempt to answer the craving of the NICFD community for a substantial improvement of the currently available numerical prediction tools and physical models. Moreover, results from experiment, computation and theory are combined using an uncertainty quantification framework, paving the way for a future systematic and comprehensive treatment of the inherent uncertainties.

The findings reported in the thesis reveal the existence of an unprecedented non-ideal effect. Namely, it is predicted that an overall Mach number increase may occur upon flow compression across steady oblique shock waves in fluids belonging to a special family. For these fluids, it is shown that there exists a particular subspace of the non-ideal region for which this unprecedented phenomenon is admitted. Moreover, it is also shown that, in a non-ideal regime, the flow maximum turning angle and

the shock wave slope, w.r.t. the upstream flow direction, strictly depend on the whole pre-shock state. This oppose the physics ruling out dilute gas flows, for which the variation of fluid properties across the shock solely depend on the pre-shock Mach number value.

The dissertation presents several numerical tools that are developed specifically to deal with complex fluid flows in the non-ideal regime. In particular, the thesis presents the verification of a Non-Ideal Computational Fluid Dynamics (CFD) solver. Moreover, the dissertation reports the very first accuracy assessment of the thermodynamic models implemented in the solver, against experimental data from dynamic test cases. The comparison of numerical prediction against experimental data was complemented with an uncertainty quantification analysis. Results report evidences claiming the reliability of the numerical implementation and the predictiveness of the solver.

Eventually, the dissertation reports an investigation of the dynamics of pressure probes for high frequency measurements carried out for fluids in a non-ideal regime. Moreover, numerical tools are exploited to develop a Bayesian inference framework which is ultimately used to infer material-dependent fluid parameters. The framework returns substantial indications towards the development of future experiments. Furthermore, results point out either an epistemic uncertainty underlying the computational model or a biased experimental measurement process.

SOMMARIO

Non-Ideal Compressible-Fluid Dynamics (NICFD) (i.e., fluidodinamica delle correnti comprimibili non-ideali) è la branca della fluidodinamica che si occupa di studiare correnti di fluido comprimibili il cui comportamento differisce rispetto a quanto previsto dalla legge di stato per i gas ideali. Questo particolare comportamento è tipico di sostanze formate da molecole molto complesse e si verifica quando il fluido è in forma di vapore, in uno stato termodinamico vicino alla curva di saturazione e con valori di pressione e temperatura nell'ordine di quelli critici. Quando la corrente si trova nel regime non-ideale, alcuni inusuali fenomeni, altrimenti non ammissibili in condizioni di flusso ideale, potrebbero apparire. Un esempio di un fenomeno associato ad effetti non-ideali è l'aumento della velocità del suono associata ad un'espansione isentropica. Per descrivere accuratamente una corrente non-ideale sono necessari complessi modelli termodinamici. In passato, questi modelli sono stati sviluppati e applicati con successo allo studio teorico e numerico di flussi non-ideali. Nonostante tutto, si riscontra una grave carenza di dati sperimentali dovuta principalmente alla elevata complessità nel realizzare esperimenti senza incorrere nella decomposizione chimica del fluido.

Oggigiorno, la comunità scientifica necessita di strumenti numerici che siano affidabili e in grado di predire la realtà con adeguata accuratezza. Per raggiungere questo scopo gli sforzi sono rivolti a combinare i risultati di esperimenti con i risultati provenienti da simulazioni numeriche e sviluppi teorici. Lo studio di correnti non-ideali rappresenta un campo per molti versi ancora inesplorato. Da questo punto di vista, l'obiettivo non è solo quello di riprodurre virtualmente un fenomeno osservato con elevata fedeltà, ma è anche quello di sviluppare strumenti che possano essere utilizzati ragionevolmente anche per prevedere la realtà in situazioni per cui non sono stati espressamente creati e validati. A questo fine, lo sviluppo di strumenti numerici affidabili necessita dell'ulteriore sviluppo di sofisticati modelli fisici come anche di un approccio sistematico alle procedure di calibrazione e validazione.

Questa tesi è stata sviluppata a partire dalle prime misure sperimentali mai realizzate riguardanti correnti non-ideali. In particolare, viene qui sviluppato un approccio che combina risultati teorici, sperimentali e numerici e vengono presentati progressi in tutti e tre gli aspetti. Nel contesto dello studio di correnti non-ideali, questo lavoro rappresenta un primo tentativo di rispondere alle esigenze della comu-

nità scientifica, che chiede un miglioramento degli strumenti numerici e dei modelli fisici attualmente disponibili. Inoltre, risultati teorici, sperimentali e numerici vengono combinati all'interno di un più ampio contesto che prevede l'utilizzo di tecniche avanzate per la quantificazione delle incertezze intrinseche.

I risultati riportati in questa tesi rivelano l'esistenza di un effetto non-ideale mai osservato prima. Limitatamente a particolari fluidi, viene previsto un possibile incremento del numero di Mach attraverso onde d'urto compressive oblique. Inoltre, viene anche mostrato come, in regime non-ideale, l'angolo di deflessione massima del flusso e l'angolo che l'urto forma con la direzione della corrente dipendono anche dallo stato della corrente a monte. Questo contrasta con la fisica caratterizzante le correnti ideali, dove la variazione delle proprietà del fluido attraverso l'urto, e il valore dei due angoli menzionati prima, dipendono esclusivamente dal valore del numero di Mach a monte.

In questa tesi sono inoltre presentati diversi strumenti numerici espressamente sviluppati per riprodurre aspetti caratteristici delle correnti non-ideali. In questo lavoro viene descritto il processo di verifica dell'implementazione di un solutore numerico per la fluidodinamica non-ideale. Inoltre, in questa tesi viene presentata la prima valutazione dell'accuratezza dei modelli termodinamici, implementati nel solutore, basata su veri dati sperimentali. Il confronto tra dati numerici e sperimentali è rafforzato da un'analisi delle incertezze che evidenzia l'affidabilità e la predittività del solutore.

Infine, questa tesi tratta lo studio della risposta instazionaria di prese di pressione tipicamente sviluppate per fluidi ideali ma utilizzate comunemente per condurre misurazioni ad alta frequenza in correnti non-ideali. Inoltre, gli strumenti numerici presentati vengono utilizzati nel contesto di un processo di inferenza bayesiano con lo scopo di calibrare i parametri (dipendenti dal fluido in esame) che compaiono nel modello termodinamico di Peng-Robinson. Sebbene infruttuoso, questo tentativo fornisce indicazioni riguardo allo sviluppo di futuri esperimenti. In particolare, i risultati suggeriscono la presenza di una fonte di incertezza epistamica che affligge, possibilmente, sia il modello computazionale utilizzato per riprodurre l'esperimento numericamente, sia le misure sperimentali stesse (le poche attualmente disponibili) che potrebbero essere potenzialmente affette da un errore intrinseco.