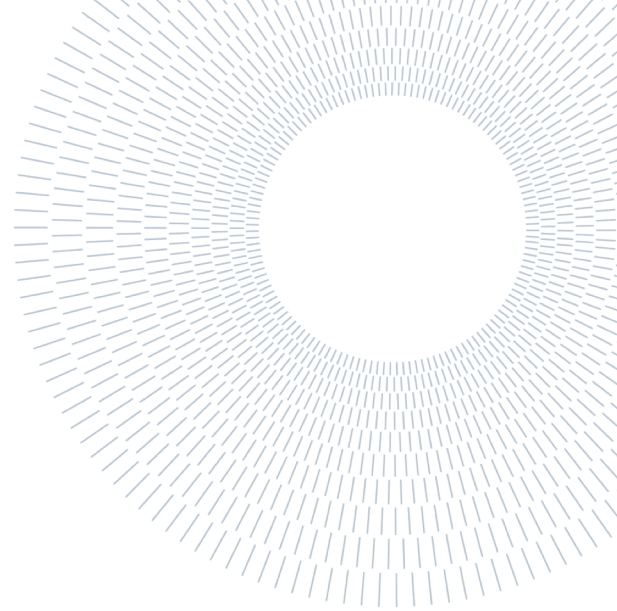




POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE



EXECUTIVE SUMMARY OF THE THESIS

Interaction study between a high-pressure jet and cylindric obstacles in series configuration through CFD

MASTER'S DEGREE THESIS IN SAFETY AND PREVENTION ENGINEERING IN THE PROCESS INDUSTRY

AUTHORS: FABIO FERRARIO, ANNA MORMILE

ADVISOR: VALENTINA BUSINI

ACCADEMIC YEAR: 2020 - 2021

1. Introduction

Between the most common incidental scenarios, high-pressure jets of gaseous substances have become particularly relevant in the process industry [1]. Axial extension of the flammable jet depends on the thermophysical characteristics of the fluid, storage temperature and pressure, atmospheric turbulence, and its interaction with any obstacles in close proximity. Numerous studies of jet and obstacle interactions have been carried out, aiming to identify how said interaction with a single obstacle and, subsequently, multiple obstacles change the axial extension of the free jet.

2. Background

Within this section, parameters that influence the free jet and jet-obstacle interaction with single and multiple cylindrical obstacles are discussed.

2.1 Free Jets

A free jet is defined as a jet that has no interactions with the environment inside which it is released. The concentration gradient of the jet, be it subsonic or supersonic, will change along the jet's axial and radial component, due to the effects of turbulence and air entrainment [2]. Ground-jet interaction are another fundamental aspect to consider: if the height of release of the jet is below a very specific altitude, the flammable mixture will interact with the ground, increasing its maximum extension, when compared to a free jet with no ground interaction [3]. Such is the reason why, the height of release is non negligible, and must be considered as an important factor within the risk analysis. The following equation for the computation of the critical height is valid for methane releases:

$$ME = ME_{FJ} \cdot (3,89 - 0,22 \cdot \frac{h}{d_{ps}}) \quad (2.1)$$

2.2 Jet-Obstacle Interaction

A jet will behave in the following manners based on the height of the point of release [4]:

- ground influence zone;
- ground-tank influence zone;
- obstacle influence zone;
- free jets zone.

In the first zone, the overriding effect comes from ground-jet interactions. Over a certain threshold value, as we enter the second zone, the obstacle's presence can no longer be neglected, as the jet is influenced by the interaction with both the ground and the obstacle. As the height of release increases, ground influence becomes less relevant and, as we enter the third zone, only the jet-obstacle interactions will have an effect in the jet's extension. Lastly, the fourth zone, is one with a point of release that grants no interaction with neither the ground nor obstacle, allowing the jet to collapse into a free jet.

3 Scope of the work

This thesis' work is part of a bigger line of research that focuses on the analysis of the interactions between a high-pressure flammable gaseous jet and several generic obstacles of varying shapes, dimensions, and numbers.

Specifically, the studied obstacles are horizontal and vertical cylinders positioned in a series arrangement. The presence of obstacles that can change the shape and maximum axial extension of the free jet is of particular interest when it comes to industrial and process safety, since, in the case of an incidental event, consequences are directly proportional to the axial extension of the flammable mixture.

Nevertheless, the modeling of such consequences is not easy, since simpler models, like the gaussian or integral model, are not capable of considering the presence of obstacles with satisfying outcomes. Consequentially, the usage of Computational Fluid Dynamic models (CFD) is needed, although it will require a noticeable amount of time and energy to utilize them properly.

It is necessary to find the ideal approach to reach rigorous and precise results that can meet industrial needs, with the objective to define the

limits of how much the incidental scenario can be simplified without losing its significance.

Through the software ANSYS®, our task is to analyze various configurations of the horizontal and vertical cylinders positioned in a series arrangement, process with which we aim to identify the geometrical parameters that manage to modify the maximum axial extension (ME) of the lower flammable limit (LFL) of the high-pressure flammable gaseous jet.

4 Materials and methods

This work's focuses in the gaseous release of natural gas (Table 4.1) as a consequence of an incidental event. The following approaches are considered:

- the application of Birch's approach;
- the usage of the k- ω SST¹ closure model.

4.1 Birch's equivalent diameter

An under-expanded jet can be modelled to be a fully expanded incompressible jet. Thus, a pseudo-diameter can be introduced as the point of release, in order to simulate the fully expanded jet [5]. The newly introduced pseudo-diameter (D_{ps}) defines a surface in front of the storage tank; said surface is traversed by the same mass flow that exits from the orifice created by the incidental event.

Through this approach, the equivalent diameter equation becomes the following [6]:

$$\frac{D_{ps}^2}{D^2} = C_d \cdot \frac{P_1}{P_3} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \quad (4.1)$$

4.2 k- ω SST closure model

In RANS equations, a new parameter, turbulent viscosity, is introduced, which is used to generate Reynolds Stresses. A new set of equations, named closure model, is used to solve the system of equations.

The Sheer Stress Transport k- ω Method (k- ω SST) was proposed by Menter [7], as a hybrid model that combines the accuracy of the SKW² model and the simplicity of SKE³ model. This model uses a blending function between the two previously mentioned models, allowing the use of both in the CFD simulation. This approach permits a higher

¹ Sheer Stress Transport.

² Standard k- ω model.

³ Standard k- ϵ model.

level of accuracy for both near wall and mean flow computation.

Lastly, $k-\omega$ SST works very well for high pressure jet simulations, which makes it ideal for this work.

5 Programs and setting

All CFD simulations were completed by using version 19.1 of ANSYS®. Multiple programs are used for a variety of purposes in order to aid the simulation process:

1. ANSYS® *Design Modeler* is used for geometry creation;
2. ANSYS® *Meshing* is used for the mesh's generation;
3. ANSYS® *CFX-Pre* is used to define the boundary conditions of the model;
4. ANSYS® *CFX-Solver* is used to solve transport equations;
5. ANSYS® *CFD-Post* is used for result processing.

Each simulation was set up through the suite ANSYS® *Workbench*, which works as a user interface for the management of all five modules previously described.

Three release conditions for the methane gas were studied, with variations of the incidental orifice's size, storage pressure and height of release, as shown in Table 5.1 and Table 5.2:

Table 5.1 – Release conditions of methane.

	Set 1	Set 2	Set 3
Orifice's diameter [mm]	25,4	25,4	50,8
Storage pressure [bar]	65	130	65
Equivalent diameter [mm]	146	206	292
Mass flow [kg/s]	5,2	10,4	20,7

Thermophysical data of natural gas is taken from NIST⁴. The geometry data of the modelled obstacles is chosen depending on the orientation and configuration of said obstacles, which also influences the release height of the methane jet, as shown in Table 5.2

Table 5.2 – Geometry and release height.

	Diameter [m]	Height-Width [m]	Release Height [m]
Horizontal cylinder	2	7	1,5
Horizontal cylinder	3	7	2
Vertical cylinder	2	7	4

Environment conditions are set up as $P=1$ atm for atmospheric pressure and $T=27^\circ\text{C}$ for the environmental temperature.

5.1 Geometry

The dimension the domain and the length of the nozzle are chosen in accordance with [4], whose geometry was defined by considering Frank's theory [8], as listed in Table 5.3:

Table 5.3 – Domain's dimensions.

	L	H	W	L_u
Frank's Length	$15 \cdot H_{max}$	$5 \cdot H_{max}$	$4,6 \cdot H_{max}$	$1 \cdot H_{max}$
Domain's Dimensions	105m	35m	32,2m	7m

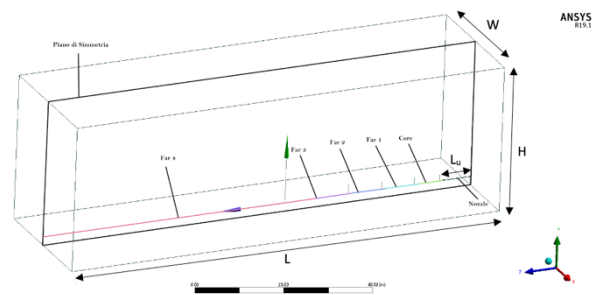


Figure 5.1 – Domain's geometry.

As shown in Figure 5.1, five Body Lines, named Core, Far 1, Far 2, Far 3 e Far 4, are used to generate the mesh with the ANSYS® *Meshing* module. Obstacle geometric data is listed in Table 5.4 and Figure 5.2 and 5.3:

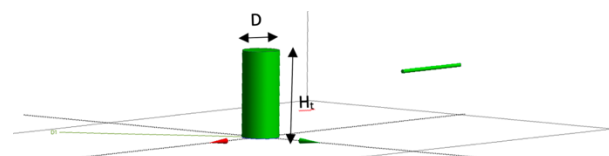


Figure 5.2 – Geometry of a vertical tank: $D = 2\text{m}$, $H_t = 7\text{m}$.

⁴ National Institute of Standards and Technology.

ANSYS
2021 R1

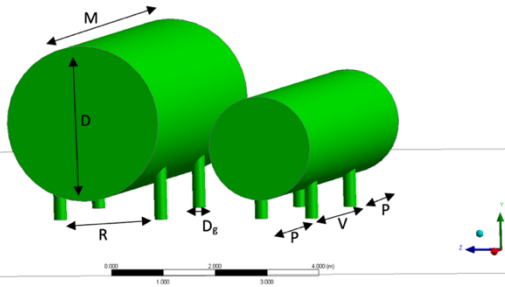


Figure 5.3 -Geometry of a horizontal tank: height from the ground = 0,5m, M = 7m.

Table 5.4 – Horizontal tank dimensions.

D [m]	D _g [m]	R [m]	P [m]	V [m]
2	0,25	1	2	3
3	0,25	2	2	3

In all simulations, the first obstacle is positioned in the halfway point of the maximum extent of the free jet. With a symmetrical geometry, the behavior of the jet will be the same for both sides, allowing for the simulation of only half of the domain.

5.2 Mesh

To limit computational resource spending, the mesh is modelled to be denser in proximity to the nozzle, with a growth rate as listed in Table 5.5:

Table 5.5 – Characteristic parameters of the mesh.

	Length [m]	Cell dimension [m]	Growth Rate [-]
Nozzle wall	-	0,030	1,200
Methane inlet surface	-	0,015	1,200
Core	6	0,015	1,075
Far 1	8	0,022	1,100
Far 2	8	0,030	1,150
Far 3	10	0,090	1,175
Far 4	66	0,180	1,200
Obstacle Surface	-	0,015	1,200

⁵ No slip condition.

5.3 Setup

In this phase, boundary conditions and solver settings are setup. Surface nomenclature is shown in Figure 5.4. Boundary conditions are summarized in Table 5.6, which remain constant between all simulations, except for the flow rates listed in Table 5.1.

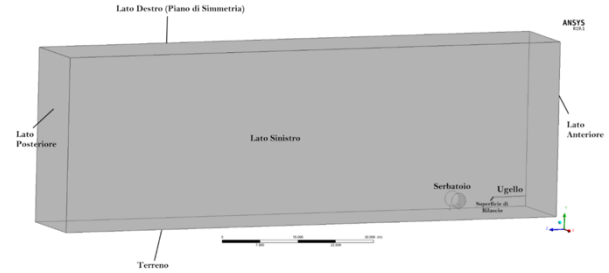


Figure 5.4 – Surfaces of the computational domain.

Table 5.6 – Boundary conditions.

Wind inlet	Velocity	Temperature
Backside	V _x = 0 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Left side	V _x = 1E-09 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Top Side	V _x = 0 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Walls	Boundary conditions	Roughness
Ground	NSC ⁵	0.01 [m]
Nozzle	NSC	Smooth wall
Tank	NSC	0.001 [m]

Velocity along the z axis is given by the following power law (Equation 5.1):

$$v(z) = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\beta \tag{5.1}$$

Where $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ is the wind velocity measured a height of 10 m and $\beta = 0,25$ is an exponential factor that considers the atmospheric stability of the environment and characteristics of the ground. In Table 5.7, solver settings are listed.

Table 5.7 – Solver settings.

Parameter	Solver settings
Turbulence model	k- ω Shear Stress Transport
Heat Transfer model	Total Energy
Gravity force	-9,81 m/s ² lungo l'asse y
Atmospheric density	1,225 kg/m ³
Atmospheric pressure	101325 Pa
Turbulence numerics	High Resolution
Physical timescale	0,1 s
Convergence criteria	RSM = 0,000001

5.4 Solution

In the solver phase, each cell within the domain has to solve the conservation equations to define the fluid's behavior. Convergence of the solution will be judge by the following parameters:

- momentum and mass;
- imbalance.

The first parameter evaluates the variations of the Reynolds stresses values between each iteration of the solver, as the solution will be reached when these are close to null. An acceptable result is considered when these changes are below 10^{-4} . The second parameter allows to define the rate of convergence of the solution. An acceptable result is considered when each value has reached zero between iterations.

5.5 Results

Result evaluation Is mainly based on two parameters:

- Extension of the lower flammable limit;
- Eddy generation.

The first parameter is used to express the maximum extension of the flammable jet and its ground interactions.

The presence of eddies serves to evaluate the influence of obstacles: eddy generation behind the obstacle will bring further dilution of the flammable gas due to strong mixing being introduced, lowering methane concentrations below the LFL, thus, reducing the maximum extend of the jet.

6 Results and discussion

Our work was focused on cylindric tanks, with a vertical and horizontal orientation. Each simulation varies in of the release set, obstacle diameter (D) and distance between obstacles (s).

6.1 Studied scenarios.

As previously done by [9], 35 cases were simulated, as listed in Table 5.1:

Table 6.1 – Vertical cylinders simulations

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
d	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
e	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3
5	3	5	Set 3	

For horizontal cylinders, 42 cases were simulated, as listed in Table 5.2:

Table 6.2 - Horizontal cylinders simulations

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
d	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	3	0	Set 2
	1	3	2	Set 2
	2	3	2,5	Set 2
	3	3	3	Set 2
	4	3	4	Set 2
e	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
f	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3

6.2 Ground Influence Analysis

Ground influence is one of the fundamental aspects that have to be thoroughly analyzed to have a bigger scope how the maximum extent of a jet is affected by its environment. This phenomenon by extensively studied by Colombini

and colleagues [3], where an equation (2.1) was found that reliably estimates whether or not the jet will interact with the ground as the height of release varies. From this same equation, the ratio of H/D_{ps} is of particular interest, since a value of $H/D_{ps} < 13$ guarantees that the described free jet will interact with the ground. Since D_{ps} varies with the set, the previously mention ratio depends entirely on the height of release H_c , permitting the computation of a critical height of release for each set:

Table 6.3 – Critical release heights for each set.

Critical Height H_c [m]	
Set 1	1,920
Set 2	2,678
Set 3	3,796

If the value of the release height is lower than the critical height, free jet-ground interactions are guaranteed; on the other hand, if the value of the release height is higher than the critical height, free jet-ground interactions are unable to occur. As seen in Table 6.3, when confronted with the chosen release heights in our simulations (Table 5.2), all cases that involve a vertical obstacle will lack free jet-ground interactions, while horizontal obstacles, except for cases *b*, will have free jet-ground interactions. Multiple observations were derived from the analysis of both horizontal and vertical cases, as dissimilar results were found for simulations with single and double obstacles. Result from simulations with a single obstacle were plotted in the graph of Figure 6.1, the dimensionless ratio between ME/ME_{fj} is plotted as the ratio of H/D_{ps} varies.

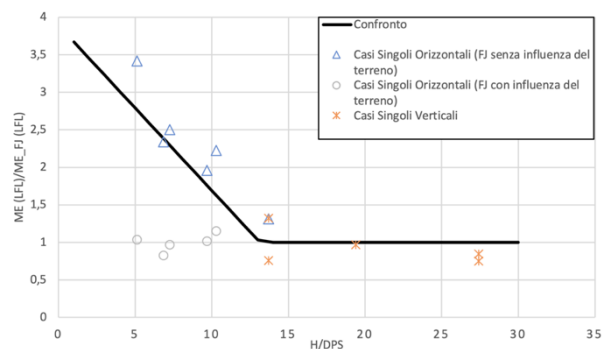


Figure 6.1 – Value of ME as H/D_{ps} varies.

Cases with a single horizontal and vertical obstacle

For horizontal cases, ground influence was found to be a very influential factor for the extension of the jet, since most of the free jet simulated for each set of cases has free jet-ground interaction. In half of the cases, the presence of the single obstacle is, for the most part, influential in the variation of the maximum extent of the jet (with percentual variations to the ME_{fj} lower than 10%). For *case c*, *case d* and *case e*, the single obstacle is negligible. On the other hand, *case a*, *case b* and *case f* display different results from the previous three, showcasing percentual variations that exceed well beyond the 10% limit, with the worst case being *case b*, with a 26% extension. For vertical cases, ground influence was found to be not as important for the extension of the jet, except for *case e*, since all free jet simulated for each set of cases has no free jet-ground interaction. Due to the lack of ground influence, the single vertical obstacle limits the extension of the jet, leading to results that reduce the maximum extent to percentual variations below 10% for all cases, but excluding *case e*, which due to the jet's interaction with the obstacle, manages to lower the jet's axis height and allow jet-ground interactions, elongating the jet's maximum extent with a 31% extension.

Table 6.2 – Results of the ME/ME_{fj} for single obstacles.

	Horizontal cylinders	Vertical cylinders
Caso a	1,15	0,84
Caso b	-	0,74
Caso c	0,97	0,96
Caso d	1,01	0,75
Caso e	1,04	1,31
Caso f	0,82	-

Cases with tandem horizontal and vertical obstacles

Maximum extent variations of the jet are mostly due to two phenomenon, as shown if Figure 6.2:

- jet dilution (Focus 1);
- jet-ground detachment (Focus 2).

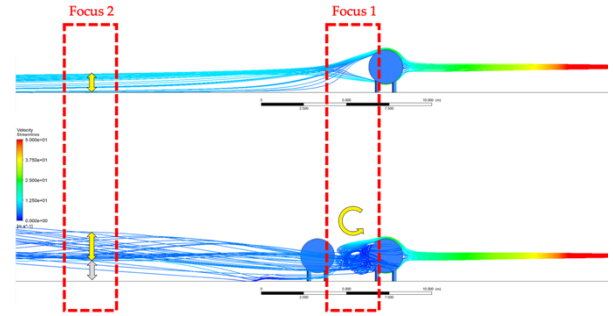


Figure 6.2 – Velocity streamlines of the jet.

In regards of the dilution of the jet, when it hits the first obstacle in the presence of a second obstacle, a considerable quantity of eddies will form behind the first tank (Focus 1), trapping the jet and leading to further mixing with the surrounding air. Jet-ground detachment will happen when the jet goes beyond the second tank, leading the increase of the height of jet's axis (Focus 2), limiting jet-ground interactions, promoting the shortening of the jet's maximum extent.

In the results of the horizontal tanks with tandem arrangement, shown in Figure 6.3, at a certain value of s/D , for all cases, there is a decrease in maximum extend, as the length of the jet returns to similar values that found in the single obstacle study ($s/D=0$). All cases, except for *case f*, have ME changes caused by the presence of the second obstacle with a percentual variation to the $ME_{singolo}$ over 10%. The lowest value achieved is found in *case c* ($D=2$ m and set 2) with $ME_{tandem}/ME_{singolo}=0,7$ per a distance between tanks of 4 m.

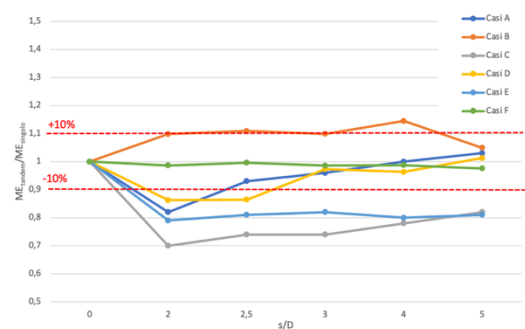


Figure 6.3 – ME/ME_{single} as s/D varies for horizontal tanks.

From this analysis, variations found as a consequence of secondo obstacle-jet interactions lead to a shortening of the maximum extent of the jet, showcasing a smaller role played by the influence of the ground.

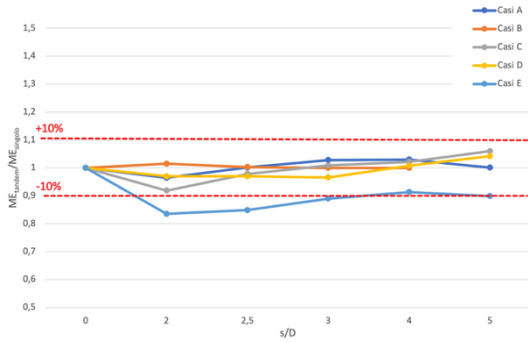


Figure 6.4 - ME/ME_{single} as s/D varies for vertical tanks.

In the results of the vertical tanks with tandem arrangement shown in Figure 6.4, most cases demonstrate the presence of the second obstacle leads to the decrease of the maximum extent of the jet, or at the very least, it will have no influence in the jet's maximum extent. As predicted by equation 2.1 and described by Figure 6.1, all changes to the jet's length are due to the influence of the obstacles, with little influence from the ground, except for specific cases.

Wanting to generalize the results of the jet's maximum extent for vertical cases, it is possible to express the same results shown in Figure 6.4 with a graph of the maximum ratio of ME (LFL)_i and ME(LFL)₀, where ME(LFL)₀ is the maximum extent found for simulations with a single obstacle; and the ratio between the distance from the nozzle to the second obstacle's center (r₀) and the distance from the nozzle to the first obstacle's center (L₀) as shown in Figure 6.5:

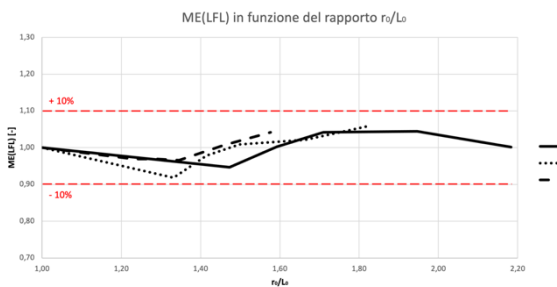


Figure 6.5 - ME/ME₀ as r₀/L₀ varies for vertical tanks.

For lower values of s/D, the presence of the second obstacle will shorten the maximum extent of the jet. This behavior is demonstrated to be caused by the generation of a high number of eddies behind the first obstacle, as it is portrayed by the Figure 6.6. These eddies will then promote the dilution of the gas, being main reason for the decrease in the maximum extent ME(LFL)_i.

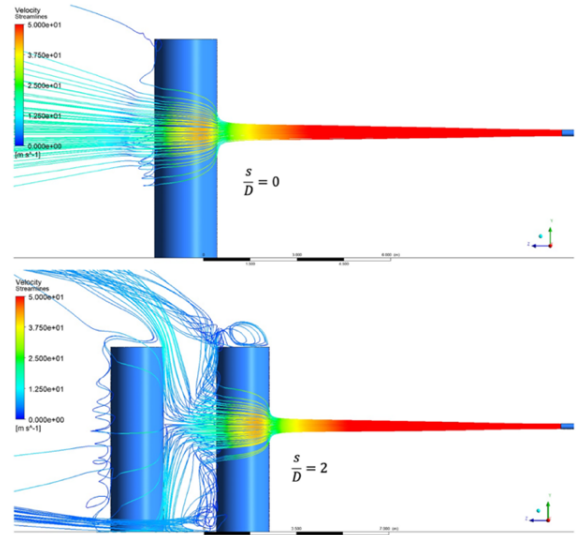


Figure 6.6 – Increment of eddy formation behind the first obstacle.

As the relative distance s/D between the first and second obstacle increases, the influence of the second obstacle will be less prominent, as eddy formation decreases with it (Figure 6.7).

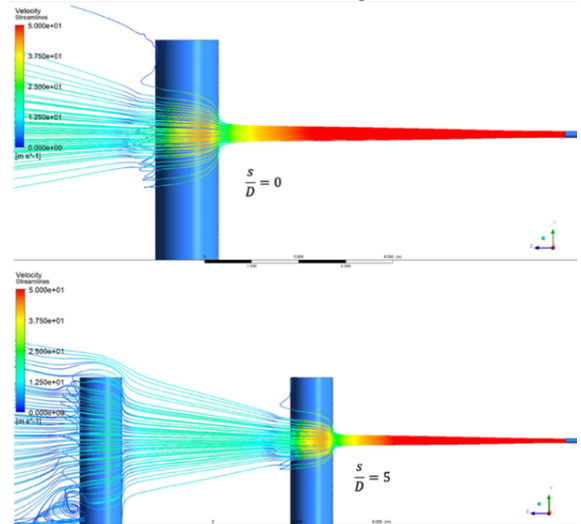


Figure 6.7 – Modest eddy generation behind the first obstacle.

Nevertheless, although the jet is no longer influenced by the eddy's dilution process, the roughness of the surface of the second obstacle, will allow for the Coanda effect to take place, leading to the increase in length of the jet beyond the second obstacle. After a certain value of s/D, the effect previously described will also become irrelevant, returning the length of the jet's maximum extent to the one found in the simulation with a single obstacle.

It is possible to discriminate a certain pattern in the behavior of vertical cylindrical obstacles, where the jet will decrease in length and as the s/D increases, its length will return to the one that was found in

the simulation with the free jet. Three zones can be described:

- “*turbulent zone*”: the second obstacle leads to an increase in eddy generation behind the first obstacle, which leads to the decrease in the jet’s maximum extent [$ME(LFL) < 1$];
- “*dragging zone*”: the surface of the second obstacle leads to the “dragging” of the jet due to the Coanda effect [10], and the lack of eddies prevents further decreasing of the jet’s length, allowing for the lengthening of the jet’s maximum extent beyond the second obstacle [$ME(LFL) > 1$];
- “*neutral zone*”: the second obstacle does not have any effect in the jet’s maximum extent, as such behaving as if only the first obstacle has any influence on it. [$ME(LFL)=1$].

6.3 Previous work comparison

In this article, jet extension of horizontal cases is defined by jet-ground interactions, as shown in Table 6.2, leading to conclusions that are relevant only for these specific cases. Since there is a lack of data of cases where the free jet does not interact with the ground before impinging the first obstacle, a comparison between this work’s results and Colombini and colleagues’ work [11] regarding free jet and single horizontal tank interactions without ground influence was considered. In Colombini’s work, further analysis to seven separate cases where the horizontal tanks were positioned vertically lead us to also include our own vertical cases, extending the scope of this analysis, as results are compared shown in Figure 6.8.

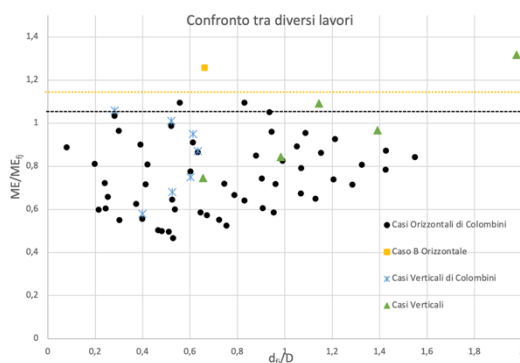


Figure 6.8 – Comparison between the results of this work and the work done by Colombini and his colleagues.

In accordance with the models used in [11], if the ratio d_{fj}/D (where d_{fj} is the free jet’s diameter) is lower than 1,8, it is possible to assume that the jet’s ME will have comparable dimensions to the maximum extension of the free jet, with percentual variations that are well below 10%.

The following conclusions can be brought up:

- In Colombini’s horizontal cases, the presence of the single tank will always lead to the shortening of the jet’s length, or at the very least, a slight elongment. The seven cases with vertical tanks also display very similar values of ME/ME_{fj} when compared to their horizontal counterpart. This serves to demonstrate that the maximum extent of a jet that does not suffer from any ground influence is not particularly affected by the obstacle’s orientation.
- Vertical cases studied in this work showcase very similar results from the ones analyzed in Colombini’s work, as they fit seamlessly in the cloud of data for cases that present a value of d_{fj}/D lower than 1,8. The only case that goes beyond 1,8 is *case e*, whose jet does interact with the ground after jet-obstacle interaction.

From this analysis, it is confirmed that the orientation of the cylindrical tank has a limited effect in the extension of the jet: fundamental factors that will have a direct impact in the ME will be release conditions, height of release, tank diameter and the distance between the nozzle and obstacle.

7 Conclusions

In this work, the incidental scenario that predicts the interaction of a high-pressure methane jet and a set of single and double tanks with varying configurations have been simulated through a CFD model. For each of the simulated cases, the maximum extent of the free jet was measured at a concentration equals to the lower flammable limit ($0,05 \text{ volCH}_4/\text{volaria}$).

The conclusions regarding the possibility of eventual simplification of the simulated cases are reported in the Table 7.1, showcasing when, in terms of s/D , can a case be simplified:

Table 7.1 – Conclusions of the simulations. n.a = Non Applicable

	Simpler model with the FJ	Simpler model with Ref 0
Case a single horizontal	never	n.a.
Case a tandem horizontal	never	never
Case a single vertical	never	n.a.
Case a tandem vertical	never	always
Case b single horizontal	never	n.a.
Case b tandem horizontal	$s/D > 2$	$s/D > 2$
Case b single vertical	never	n.a.
Case b tandem vertical	never	always
Case c single horizontal	always	n.a.
Case c tandem horizontal	never	never
Case c single vertical	always	n.a.
Case c tandem vertical	$s/D > 2,5$	$s/D > 2,5$
Case d single horizontal	always	n.a.
Case d tandem horizontal	$s/D > 2,5$	$s/D > 2,5$
Case d single vertical	never	n.a.
Case d tandem vertical	never	always
Case e single horizontal	always	n.a.
Case e tandem horizontal	$s/D > 2$	$s/D > 2$
Case e single vertical	never	n.a.
Case e tandem vertical	never	never
Case f single horizontal	never	n.a.
Case f tandem horizontal	never	always

8 Future prospects

As discussed in Section 7, four areas of interest were identified for further studying and research, always pertaining to the topic of jet impinging with multiple obstacles:

1. To verify the “three zone model”, proposed in section 6.2, further cases must be simulated for the release set 2 and 3, increasing the r_0/L_0 until the ME(LFL) goes back to a unitary value (Figure 6.5). Furthermore, the research of a better fitted parameter that allows for the collapse of the curves in Figure 6.5 into a single one.
2. Further elaboration on the way the jet behaves as the first obstacle changes position, removing the condition of it being positioned at the halfway point of the maximum extent of the free jet, in order to verify the conclusions reached in this study remain valid.
3. For horizontal obstacles, the position of the first obstacle and release set must be changed in order to compute a suitable equation that allows the prediction of when the detachment of the jet from the ground occurs, leading to a shortening of the maximum extent and when the jet is pushed to the ground, leading to a lengthening of the maximum extent (Figure 6.2).
4. Further investigation in the conditions at which the free jet is release at a height higher than the critical height (Equation 2.1) but the jet, due to jet-obstacle interaction, is brought to the ground, leading to the elongment of the jet, nonetheless. As such, positioning the jet at a height that is equals or above the critical height is not enough to guarantee a lack of jet-ground interaction with the presence of an obstacle. Simulations with increasing values of release height must be carried out, in order to estimate a new critical height that guarantees no interaction with the ground, even when an obstacle is present.

9 Bibliography

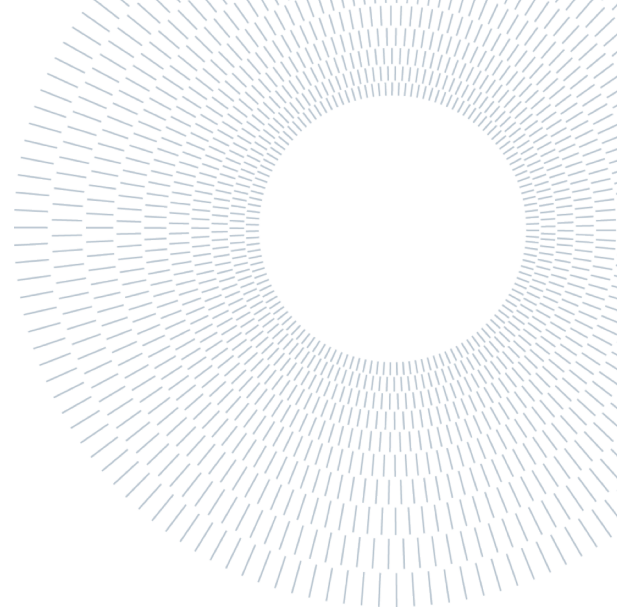
- [1] C. Colombini and V. Busini. *Obstacle influence on high-pressure jets based on computational fluid dynamics simulations*. Chemical Engineering Transactions, 2019.
- [2] L. Carlini. *Influenza del terreno su getti ad alta pressione*. Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2019.
- [3] C. Colombini, A. Martani, R. Rota and V. Busini. *Ground influence on high-pressure methane jets: practical tools for risk assessment*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020.

- [4] A. Martani. *Vertical cylindrical tank influence on high-pressure jets: a computational fluid dynamics study*. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2018.
- [5] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout and B. Pascal. *Free underexpanded jets in a quiescent medium: A Review*. Progress in Aerospace Sciences, 2015.
- [6] A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson and F. Swaeld. *The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas*. Combustion Science and Technology, 1984.
- [7] F. R. Menter. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. NASA Amesh Research Center, 1994.
- [8] J. Franke. *Best practice guideline for the CFD simulation of ows in the urban environment*. Meteorological Institute, 2007.
- [9] G. Romano, P. Tombini, P. Blas and V. Busini. *Multi-obstacles influence on High-Pressure Methane Jets*. Research Publishing, 2021.
- [10] B.D. Giles. *Fluidics, the Coanda Effect, and Some Orographic Winds*. University of Birmingham, 1976.
- [11] C. Colombini, C. Iannantuoni, R. Rota and V. Busini. *Unignited High-Pressure Methane Jet Impacting a Cylindrical Obstacle: An Assessment Tool for Consequences Analysis*. Journal of loss prevention in the process industries, 2021.



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE



SINTESI DELLA TESI

Studio dell'interazione tra un getto ad alta pressione e ostacoli cilindrici in serie mediante CFD

TESI MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA PREVENZIONE E DELLA SICUREZZA NELL'INDUSTRIA DI PROCESSO

AUTORI: FABIO FERRARIO, ANNA MORMILE

RELATORE: VALENTINA BUSINI

ANNO ACCADEMICO: 2020 - 2021

1. Introduzione

Tra i più diffusi scenari incidentali si annoverano i rilasci di sostanze gassose ad alta pressione, che generano i cosiddetti getti [1]. L'estensione del getto infiammabile dipende dalle caratteristiche fisiche del materiale combustibile, dalle condizioni di temperatura e pressione di stoccaggio, dalla turbolenza atmosferica e dall'eventuale presenza di un ostacolo in prossimità del rilascio. Per quanto riguarda l'effetto degli ostacoli sull'estensione del getto, sono stati condotti numerosi studi volti ad indagare il comportamento dei getti liberi rispetto a quello dei getti che impattano dapprima contro un singolo ostacolo, e successivamente contro ostacoli multipli posti in diverse configurazioni.

2. Analisi del contesto

In questa sezione verranno discussi i parametri che influenzano un getto libero e l'interazione di questo con ostacoli cilindrici singoli e multipli.

2.1 Getti liberi

Un getto libero è definito come un getto che non viene influenzato dall'ambiente in cui viene rilasciato. Il profilo di concentrazione lungo l'asse del getto, sia esso subsonico o supersonico, varia sia lungo la componente assiale sia lungo la componente radiale, a causa degli effetti di turbolenza e di trascinamento dell'aria [2].

Un altro aspetto di fondamentale importanza nella caratterizzazione dei getti è l'interazione con il terreno: al di sotto di una certa altezza di rilascio, la miscela infiammabile è in grado di raggiungere distanze maggiori di quelle che raggiungerebbe in caso di interazione nulla [3], motivo per cui il punto di rilascio non è trascurabile e l'effetto del terreno va sempre considerato all'interno di un'analisi di rischio. Ai fini della trattazione, si riporta la correlazione valida per rilasci di metano:

$$ME = ME_{FJ} \cdot (3,89 - 0,22 \cdot \frac{h}{d_{ps}}) \quad (2.1)$$

2.2 Getti contro ostacoli

Un getto assume quattro comportamenti diversi in funzione della distanza dal punto di rilascio [4]:

- *ground influence zone;*
- *ground-tank influence zone;*
- *obstacle influence zone;*
- *free jets zone.*

Nella prima zona l'effetto predominante è quello del terreno. Al di sopra di un valore soglia si entra nella seconda zona, in cui non è più trascurabile la presenza dell'ostacolo e il getto è influenzato sia dall'interazione con il terreno che da quella con l'ostacolo. L'influenza del terreno, tuttavia, si fa sempre meno importante fino a entrare nella terza zona in cui essa è nulla e il getto risente esclusivamente della presenza dell'ostacolo. L'estensione di questa zona è direttamente proporzionale alla taglia dell'ostacolo. Infine, per grandi distanze il getto non risente più di alcuna interazione e il suo profilo degenera in quello di un *free jet*.

3 Scopo del lavoro

Questo lavoro si inserisce all'interno di un filone di ricerca che si propone di analizzare l'interazione tra un getto infiammabile ad alta pressione e dei generici ostacoli, diversi per forma, dimensione e numero. Nello specifico, in questo lavoro ci si è focalizzati su cilindri orizzontali e verticali posti in serie. Infatti, la presenza di ostacoli in grado di modificare la forma e l'estensione del getto libero è particolarmente interessante dal punto di vista della sicurezza di processo in quanto, in caso di evento incidentale, le conseguenze dello stesso saranno tanto più significative quanto maggiore sarà l'estensione della miscela infiammabile. Tuttavia, la modellazione di tali conseguenze non è scontata, in quanto sia i modelli gaussiani che i modelli integrali non sono in grado di considerare in modo soddisfacente la presenza di ostacoli. Per questo motivo occorre rivolgersi alla fluidodinamica computazionale (CFD), che però presuppone un notevole dispendio di tempo ed energie. Per conciliare un approccio che sia il più possibile preciso e rigoroso con le esigenze industriali, occorre quindi capire fino a che punto è possibile spingersi con la semplificazione dello

scenario incidentale senza perdere la significatività dei risultati. Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare tramite il pacchetto *software* ANSYS® diverse configurazioni di cilindri orizzontali e verticali posti in serie per definire i parametri geometrici in grado di modificare la massima estensione (ME) del limite inferiore di infiammabilità (LFL) di un getto infiammabile ad alta pressione.

4 Materiali e metodi

In questo lavoro si è voluto studiare il rilascio di gas naturale (Tabella 4.1) a seguito di un evento incidentale. Per fare ciò sono utilizzati i seguenti approcci:

- diametro equivalente di Birch;
- modello di chiusura $k-\omega$ SST¹.

4.1 Diametro equivalente di Birch

Un getto sotto espanso può essere modellato come se fosse un getto incomprimibile. Per completare questa operazione si introduce una pseudo-sorgente come punto di rilascio del getto [5]. Lo pseudo diametro (D_{ps}) introduce una superficie di fronte al serbatoio di stoccaggio che viene attraversata dalla stessa portata massica uscente dal foro che causa lo scenario incidentale.

Mediante questo approccio, l'equazione del diametro equivalente diventa [6]:

$$\frac{D_{ps}^2}{D^2} = C_d \cdot \frac{P_1}{P_3} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \quad (4.1)$$

4.2 Modello di chiusura $k-\omega$ SST

Nelle equazioni RANS è stato introdotto un nuovo parametro, la viscosità turbolenta, che serve per produrre gli sforzi di Reynolds. Per fare ciò deve essere applicato un nuovo set di equazioni, ovvero un modello di chiusura che permetta la risoluzione del sistema. Lo Shear Stress Transport $k-\omega$ Method ($k-\omega$ SST) proposto da Menter [7], è un modello di chiusura ibrido che concilia l'accuratezza del modello SKW² con la semplicità di calcolo propria del modello SKE³. Questo modello implementa una *blending function* tra SKW e SKE, permettendo l'uso di entrambi i modelli nella simulazione CFD. Ciò risulta molto utile quando, ad esempio, la cella

¹ Sheer Stress Transport.

² Standard $k-\omega$ model.

³ Standard $k-\epsilon$ model.

dove si sta svolgendo il calcolo non è completamente libera dagli effetti di viscosità imposti da una parete in prossimità della cella stessa. Il modello $k-\omega$ SST è ideale per gestire i calcoli necessari per getti ad alta pressione, ragione per cui è stato usato in questo lavoro.

5 Programmi e impostazioni

Tutte le simulazioni CFD eseguite in questo lavoro sono state implementate utilizzando la versione 19.1 di ANSYS®. La pre elaborazione, la soluzione e la post elaborazione sono state eseguite dai seguenti programmi:

1. ANSYS® *Design Modeler* è stato usato per la creazione della geometria;
2. ANSYS® *Meshing* è stato usato per la creazione della *mesh*;
3. ANSYS® *CFX-Pre* è stato usato per la definizione delle condizioni al contorno;
4. ANSYS® *CFX-Solver* è stato usato per risoluzione delle equazioni di trasporto;
5. ANSYS® *CFD-Post* è stato usato per la post elaborazione dei risultati.

Tutte le simulazioni sono state impostate ed eseguite tramite la suite ANSYS® *Workbench*, che permette una gestione integrata dei cinque programmi sopra citati garantendo un miglior controllo dell'intero processo.

Sono state studiate diverse condizioni di rilascio definite dalla variazione del diametro dell'orifizio che ha causato l'incidente, della pressione di stoccaggio del metano e dell'altezza del rilascio, come schematizzato in Tabella 5.1 e in Tabella 5.2:

Tabella 5.1 - Caratteristiche del rilascio di metano.

	Set 1	Set 2	Set 3
Diametro reale dell'orifizio [mm]	25,4	25,4	50,8
Pressione di stoccaggio [bar]	65	130	65
Diametro equivalente [mm]	146	206	292
Portata massica [kg/s]	5,2	10,4	20,7

Per quanto riguarda il gas naturale, le sue proprietà fisiche sono state scelte in accordo con il NIST⁴. Per la geometria degli ostacoli, invece, sono state prese in considerazione tre diverse configurazioni in funzione delle quali è stata anche impostata un'altezza di rilascio del gas, come riassunto in Tabella 5.2.

⁴ National Institute of Standards and Technology.

Tabella 5.2 - Geometrie e altezze di rilascio.

	Diametro [m]	Altezza - Larghezza [m]	Altezza rilascio [m]
Cilindro orizzontale	2	7	1,5
Cilindro orizzontale	3	7	2
Cilindro verticale	2	7	4

Le condizioni ambientali sono state riferite a P=1 atm per la pressione atmosferica e T=27°C per la temperatura ambiente.

5.1 Geometria

Le dimensioni del dominio e lunghezza dell'ugello sono state scelte in accordo con [4], la cui geometria viene definita seguendo la teoria di Frank [8] e riassunta in Tabella 5.3:

Tabella 5.3 - Dimensioni del dominio.

	L	H	W	Lu
Lunghezza di Franke	$15 \cdot H_{max}$	$5 \cdot H_{max}$	$4,6 \cdot H_{max}$	$1 \cdot H_{max}$
Dimensioni del dominio	105m	35m	32,2m	7m

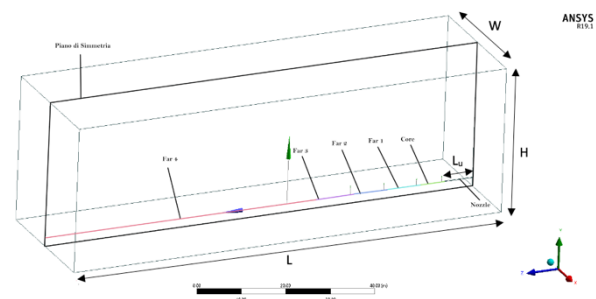


Figura 5.1 - Geometria del dominio

Come mostrato in Figura 5.1, sull'asse del getto che si trova tra il punto di rilascio e la fine del dominio sono state costruite cinque *Body Lines* chiamate rispettivamente *Core*, *Far 1*, *Far 2*, *Far 3* e *Far 4*, che verranno utilizzate in seguito per la generazione della *mesh*. I dati relativi agli ostacoli invece sono sintetizzati in Tabella 5.4 e in Figura 5.2 e 5.3:

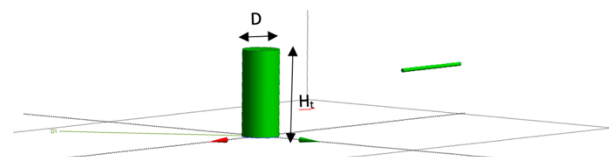


Figura 5.2 - Geometria del serbatoio verticale: $D = 2m, H_t = 7m$.

ANSYS 819.1

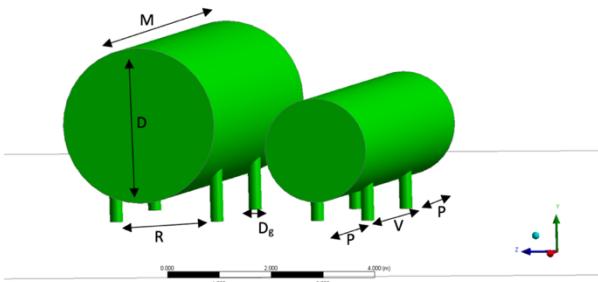


Figura 5.3 - Geometria dei serbatoi orizzontali: altezza da terra = 0,5m, M = 7m.

Tabella 5.4 - Dimensioni dei serbatoi orizzontali.

D [m]	D _g [m]	R [m]	P [m]	V [m]
2	0,25	1	2	3
3	0,25	2	2	3

In tutte le simulazioni il primo ostacolo è stato posto a metà della distanza raggiunta dal *free jet*. Essendo la geometria simmetrica rispetto all'asse di rilascio, è stato simulato solo metà dominio.

5.2 Mesh

Per limitare il consumo di risorse computazionali la *mesh* è più fitta in prossimità dell'ugello e più larga in lontananza. Essa aumenta con il tasso di crescita riportato in Tabella 5.5:

Tabella 5.5 - Parametri caratteristici della *mesh*.

	Lunghezza [m]	Dimensione celle [m]	Tasso di crescita [-]
Superficie laterale dell'ugello	-	0,030	1,200
Superficie di rilascio	-	0,015	1,200
Core	6	0,015	1,075
Far 1	8	0,022	1,100
Far 2	8	0,030	1,150
Far 3	10	0,090	1,175
Far 4	66	0,180	1,200
Superficie degli ostacoli	-	0,015	1,200

⁵ No slip condition.

5.3 Setup

Nella fase di setup si sono definite le condizioni al contorno e le impostazioni del risolutore. In Figura 5.4 viene mostrata la suddivisione delle superfici per poter specificare le condizioni al contorno. Queste ultime sono state riassunte in Tabella 5.6 e rimangono costanti per tutte le simulazioni, ad eccezione della portata massica (Tabella 5.1).

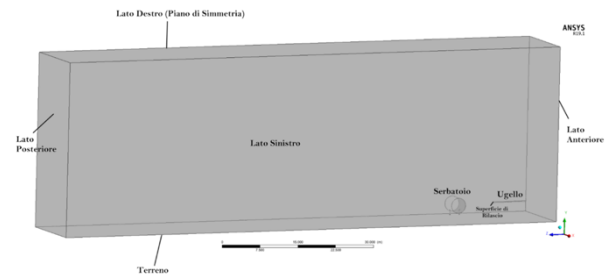


Figura 5.4 - Superfici che costituiscono il dominio di calcolo.

Tabella 5.6 - Condizioni al contorno.

Ingresso vento	Velocità	Temperatura
Lato Anteriore	V _x = 0 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Lato Sinistro	V _x = 1E-09 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Cielo	V _x = 0 [m/s] V _y = 0 [m/s] V _z = Power law	T= 300 [K]
Pareti	Condizione al contorno	Scabrezza
Terreno	NSC ⁵	0.01 [m]
Ugello	NSC	Smooth wall
Serbatoi	NSC	0.001 [m]

La velocità lungo l'asse z è data dalla legge di potenza (Equazione 5.1):

$$v(z) = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\beta \quad (5.1)$$

Dove $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ è la velocità del vento misurata a 10m e $\beta = 0,25$ è un fattore esponenziale che tiene conto della stabilità atmosferica e della natura del suolo.

In Tabella 5.7, invece, sono indicate le impostazioni del risolutore:

Tabella 5.7 - Impostazioni del risolutore.

Parametro	Impostazione del risolutore
Modello di turbolenza	k- ω Shear Stress Transport
Trasferimento di calore	Total Energy
Forza di gravità	-9,81 m/s ² lungo l'asse y
Densità atmosferica	1,225 kg/m ³
Pressione atmosferica	101325 Pa
Turbolence numerics	High Resolution
Physical Timescale	0,1 s
Criterio di convergenza	RSM = 0,000001

5.4 Soluzione

Nella fase di risoluzione, per ogni cella del dominio il solutore risolve le equazioni di conservazione. Per valutare la bontà della simulazione ci si è affidati a due parametri:

- *momentum and mass*;
- *imbalance*.

L'andamento del primo permette di valutare quando il gradiente degli sforzi di Reynolds per massa e momento si annulla. Una simulazione si considera andata a buon fine quando per ogni parametro tale valore è inferiore a 10^{-4} . L'andamento del secondo, invece, permette di valutare la convergenza della soluzione. Una simulazione si considera andata a buon fine quando per ogni parametro tale valore è pari a zero e non si riscontra un andamento oscillatorio.

5.5 Risultati

Per quanto riguarda la valutazione dei risultati, ci si è basati principalmente su due parametri:

- estensione del limite inferiore di infiammabilità;
- generazione di vortici.

Il primo parametro serve a valutare l'estensione del getto infiammabile e l'interazione con il terreno.

La valutazione della presenza o meno di vortici, invece, serve a valutare l'influenza dell'ostacolo: infatti, la generazione di vortici a valle dell'ostacolo crea dei rimescolamenti che modificano il profilo dell'LFL, diluendo la miscela.

6 Risultati e discussione

In questo lavoro ci si è focalizzati su ostacoli cilindrici orizzontali e verticali, svolgendo diverse simulazioni al variare del diametro (D) e della distanza tra gli ostacoli (s), oltre al *set* del rilascio.

6.1 Definizione degli scenari

In analogia con [9] sono stati definiti 35 casi riassunti in Tabella 5.1:

Tabella 6.1 - Cilindri verticali: simulazioni effettuate.

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
d	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
e	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3
5	3	5	Set 3	

Per i cilindri orizzontali, invece, si sono effettuate le 42 simulazioni riassunte in Tabella 5.2:

Tabella 6.2 - Cilindri orizzontali: simulazioni effettuate.

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
d	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	3	0	Set 2
	1	3	2	Set 2
	2	3	2,5	Set 2
	3	3	3	Set 2
	4	3	4	Set 2
e	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
f	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3
5	3	5	Set 3	

6.2 Analisi dell'influenza del suolo

L'influenza del terreno è uno degli aspetti fondamentali da considerare quando si descrive lo sviluppo dell'estensione massima di un getto. Questo fenomeno è stato ampiamente studiato nel lavoro di Colombini e colleghi [3], dove si è potuto

definire una correlazione, dipendente dall'altezza del punto di rilascio del getto stesso, se il getto andrà a contatto con il terreno o meno. Da quest'equazione, un rapporto tra H/D_{ps} critico è stato evidenziato, dove si individua, che quando un getto libero manifesta un $H/D_{ps} < 13$, è garantito che questo interagirà con il terreno. Per il nostro lavoro di tesi, avendo definito il D_{ps} per ogni set, le altezze critiche del punto di rilascio saranno le seguenti:

Tabella 6.3 - Altezze critiche al variare del set di rilascio.

Altezza critica H_c [m]	
Set 1	1,920
Set 2	2,678
Set 3	3,796

Se l'altezza del punto di rilascio è minore dell'altezza critica, il getto libero simulato entra in contatto con il terreno, viceversa se il punto di rilascio è superiore all'altezza critica, allora il terreno non presenta alcuna influenza sul getto libero. Come si può intuire dai valori riportati in Tabella 6.3, quando questi vengono confrontati con le altezze di rilascio (Tabella 5.2) si nota che in tutti i casi che coinvolgono ostacoli verticali non si hanno getti liberi che interagiscono con il terreno, mentre i casi che coinvolgono ostacoli orizzontali, ad eccezione del *caso b*, prevedono getti liberi che interagiscono con il terreno. Si sono fatte diverse considerazioni derivanti dall'analisi sia dei casi orizzontali sia di quelli verticali e si sono individuati comportamenti diversi quando si svolge la simulazione con un ostacolo singolo o doppio. Per gli ostacoli singoli i risultati ottenuti sono stati inseriti nel grafico di Figura 6.1, dove si correla la variazione del ME/ME_{fj} al rapporto tra l'altezza del punto di rilascio ed il diametro equivalente del caso studiato H/D_{ps} .

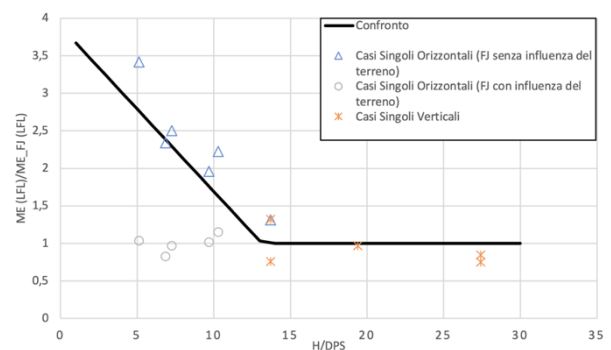


Figura 6.1 - posizione del ME in funzione del rapporto H/D_{ps} .

Casi con ostacolo singolo orizzontale e verticale

Per i casi orizzontali, è stato evidenziato come l'effetto del terreno sia un fattore molto importante nell'estensione del getto, dato che per la maggior parte dei casi il getto libero va a contatto con il terreno (altezza di rilascio del getto libero inferiore ad altezza critica). In metà dei casi si evince che la presenza del singolo ostacolo cambia in modo trascurabile l'estensione massima (variazione percentuale inferiore al 10%). Si dimostra, quindi, che per il *caso c*, per il *caso d* e per il *caso e*, l'ostacolo ha un'influenza minima nella lunghezza del getto. Dall'altra parte, il *caso a*, il *caso b* e il *caso f* presentano dei risultati discordanti rispetto ai primi tre, mostrando variazioni che riescono ad andare ben oltre il limite del 10%, fino al caso peggiore rappresentato dal *caso b* che aumenta del 26%. Per i casi verticali è stato evidenziato come l'effetto del terreno sia un fattore poco importante nell'estensione del getto, ad eccezione del *caso e*, dato che per tutti i casi il getto libero non va a contatto con il terreno (altezza di rilascio del getto libero maggiore dell'altezza critica). A causa della mancanza di contatto con il terreno, il singolo ostacolo verticale agisce limitando l'estensione del getto. Per questa ragione si trovano diminuzioni maggiori del 10% rispetto alla lunghezza del getto libero per tutti i casi eccetto per il *caso e* il quale, avendo un getto che interagisce con l'ostacolo, si deforma al punto da andare a contatto con il terreno e soffrirne gli effetti di allungamento. Il *caso e*, quindi, allunga ulteriormente il getto, aumentando la sua estensione massima del 31%.

Tabella 6.2 - Risultati del rapporto ME/ME_{lib} per ostacoli singoli.

	Cilindri orizzontali	Cilindri verticali
Caso a	1,15	0,84
Caso b	-	0,74
Caso c	0,97	0,96
Caso d	1,01	0,75
Caso e	1,04	1,31
Caso f	0,82	-

Casi con ostacoli in tandem orizzontali e verticali

La variazione dell'estensione massima del getto è dovuta fondamentalmente a due contributi, schematizzati in Figura 6.2:

- diluizione del getto (Focus 1);
- distacco dal terreno (Focus 2).

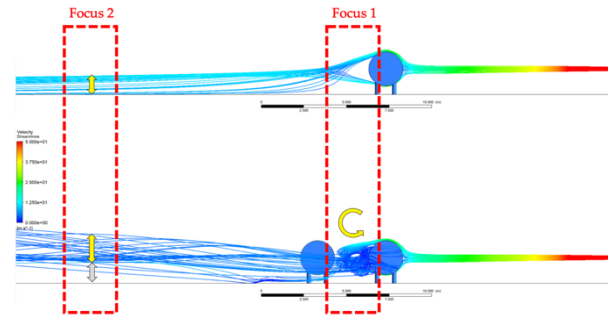


Figura 6.2 - Andamento delle linee di velocità del getto.

Per quanto riguarda l'effetto di diluizione del getto, quando esso impatta contro il primo ostacolo in presenza del secondo, a valle del primo serbatoio si genera una quantità considerevole di vortici (Focus 1) che ingabbiano il getto e lo diluiscono. In secondo luogo, una volta che il getto riesce a superare anche il secondo ostacolo, quest'ultimo ne provoca un distacco da terra (Focus 2) tale da affievolire il contributo di trascinamento del terreno, favorendo un ulteriore accorciamento della massima distanza raggiunta dal getto.

Nei risultati dei casi di serbatoi orizzontali in tandem, mostrati in Figura 6.3, raggiunto un certo rapporto s/D si verifica, per quasi tutti i casi, un decremento dell'estensione massima, che ritorna ad una lunghezza simile a quella dei casi a singolo ostacolo (rapporto s/D nullo). Tutti i casi, eccetto il *caso f*, hanno variazioni del getto causate dalla presenza del secondo ostacolo che vanno oltre al 10% di variazione, con una diminuzione massima riscontrata per il *caso c* (diametro 2 metri e set di rilascio 2) con ME_{tandem}/ME_{lib} pari a 0,7 per una distanza tra i serbatoi di 4 metri.

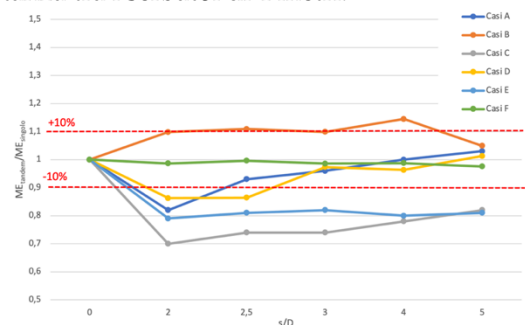


Figura 6.3 - ME in funzione del rapporto s/D per serbatoi orizzontali.

Da questa analisi si vede che le variazioni che si verificano come conseguenza dell'interazione tra il getto ed il secondo ostacolo comportano un accorciamento del getto, a dimostrazione di come il terreno giochi un ruolo meno importante nel governare l'estensione del getto.

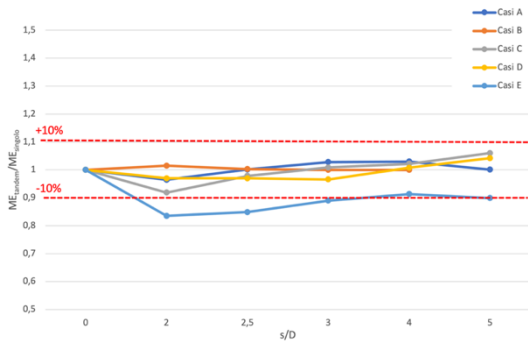


Figura 6.4 - ME in funzione del rapporto s/D per serbatoi verticali.

Nei risultati dei casi di serbatoi verticali in tandem mostrati in Figura 6.4, per la maggior parte dei casi la presenza del secondo ostacolo comporta una diminuzione della massima estensione misurata, o al più il secondo ostacolo è influente. Con queste prove si può confermare che, come predetto dall'equazione 2.1 e com'è stato descritto dalla Figura 6.1, ogni variazione registrata in questa sezione si deve all'influenza che l'ostacolo ha sul getto, anche se l'influenza del terreno può giocare un piccolo ruolo in alcuni casi particolari.

Volendo generalizzare l'andamento della massima estensione dei getti che impattano contro ostacoli verticali, è possibile ricontestualizzare i risultati descritti in precedenza in un grafico che esprime il rapporto tra la distanza del secondo ostacolo (r_0) e quella del primo ostacolo (L_0) rispetto al punto di rilascio, dove il pedice zero indica che la distanza è stata calcolata rispetto al centro del serbatoio. Poiché questo parametro presuppone la presenza di almeno un ostacolo, si è scelto di adimensionalizzare la massima estensione del getto ME(LFL) rispetto al caso con ostacolo singolo ME(LFL)₀, come mostrato in Figura 6.5:

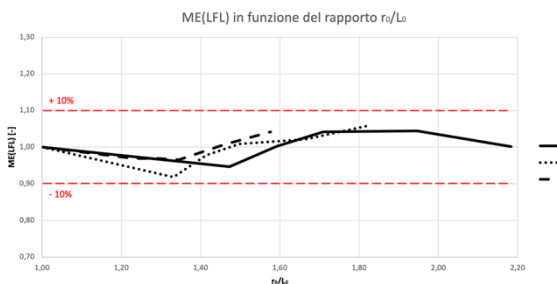


Figura 6.5 - Andamento del ME(LFL) in funzione del rapporto r_0/L_0 .

Per bassi rapporti s/D l'introduzione di un secondo ostacolo accorci l'estensione del getto. Questo perché esso induce la generazione di un maggior numero di vortici a valle del primo ostacolo, come

mostrato in Figura 6.6. I vortici, a loro volta, inducono una maggior diluizione del getto e di conseguenza una diminuzione del ME(LFL).

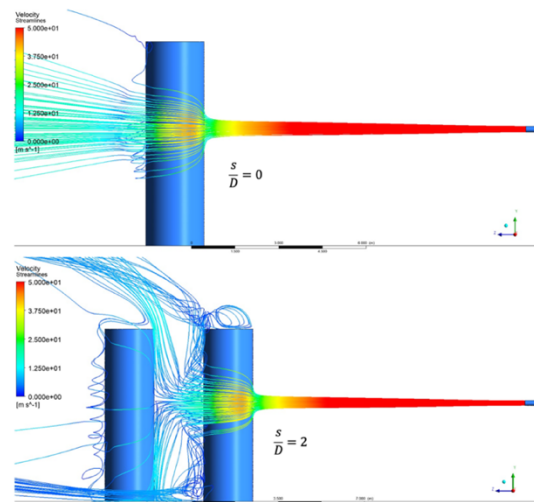


Figura 6.6 - Ingente formazione di vortici a valle del primo ostacolo.

Al crescere della distanza relativa del secondo ostacolo dal primo l'influenza del secondo ostacolo si fa sempre meno importante per la generazione di vortici a valle del primo. (Figura 6.7).

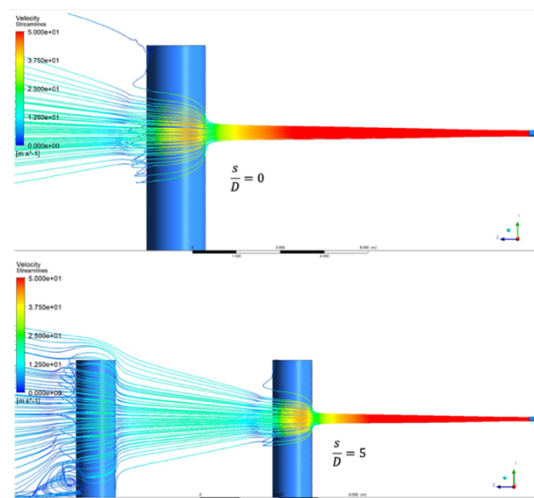


Figura 6.7 - Modesta formazione di vortici a valle del primo ostacolo.

Tuttavia, il getto non più influenzato dalla presenza di vortici torna a risentire dell'influenza del contatto con superfici scabre e, come per il caso di contatto con il terreno, si allunga. Infine, oltre un certo rapporto s/D anche l'effetto di trascinamento indotto dal secondo ostacolo sarà irrisorio e dunque il getto si comporterà in maniera analoga a quanto fatto nel caso di ostacolo singolo. In conclusione, è possibile individuare un andamento dapprima decrescente, poi via via

crescente fino al raggiungimento di un asintoto in prossimità del valore unitario:

- 1 "zona turbolenta": il secondo ostacolo induce la generazione di un maggior numero di vortici a valle del primo ostacolo, che a loro volta inducono una diluizione maggiore del getto [$ME(LFL) < 1$];
- 2 "zona di trascinamento": la superficie del secondo ostacolo induce un trascinamento del getto dovuto all'effetto Coanda [10], e la mancanza di vortici fa sì che esso si mantenga ad una concentrazione più elevata per una distanza maggiore [$ME(LFL) > 1$];
- 3 "zona neutra": il secondo ostacolo non induce né la generazione di un maggior numero di vortici a valle del primo ostacolo né un trascinamento del getto, che si comporta come se vedesse un singolo ostacolo, il primo [$ME(LFL) = 1$]

6.3 Confronto con altri lavori

In questo articolo, l'estensione del getto dei casi orizzontali viene definita dalle interazioni getto-terreno delle prove svolte in Tabella 6.2, portando a delle conclusioni che sono solo relative ai casi che dimostrano questo comportamento. A causa della mancanza di ulteriori dati sull'andamento dei getti liberi nel caso in cui non ci siano le interazioni tra il getto e il terreno, si è ritenuto utile fare un confronto con il lavoro di Colombini e colleghi [11] riguardante l'interazione tra getti liberi ed un serbatoio orizzontale cilindrico senza interazioni con il terreno. Nel lavoro di Colombini e colleghi è stata inclusa un'ulteriore analisi di sette casi dove i serbatoi sono stati orientati verticalmente. Per questo motivo si è deciso di estendere il confronto anche ai casi verticali svolti in questo lavoro. I risultati sono stati confrontati in Figura 6.8.

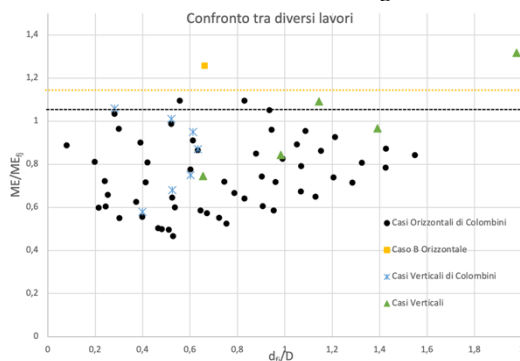


Figura 6.8 - Confronto tra i risultati del lavoro svolto in questo articolo e del lavoro svolto da Colombini e colleghi.

In accordo con i modelli usati in [11], se il rapporto d_{fi}/D (dove d_{fi} è il diametro del getto libero) è inferiore a 1,8 si può stimare che il ME del getto ha delle dimensioni assimilabili a quelle della massima estensione del getto libero, considerando che variazioni ritenute rilevanti a livello industriale si trovano oltre al 10%.

Si possono avanzare due considerazioni:

1. Nei casi orizzontali studiati da Colombini e colleghi l'ostacolo impone sempre un accorciamento, o al più un leggero allungamento, per getti liberi che non interagiscono con il terreno. Anche per i sette casi studiati con serbatoi verticali i valori di ME/ME_{fi} rimangono molto simili a quelli definiti per i serbatoi orizzontali. Si dimostra quindi che l'estensione massima di un getto che non interagisce con il suolo non dipende in un modo particolarmente gravoso dall'orientamento dell'ostacolo.
2. I casi verticali analizzati in questo lavoro di tesi presentano risultati simili a quelli presenti nel lavoro di Colombini e colleghi, ricadendo all'interno della nube di dati in cui la maggior parte dei risultati presenta un rapporto d_{fi}/D inferiore a 1,8. Infatti, l'unico caso che ha un valore del rapporto d_{fi}/D superiore a 1,8 è il caso e.

Da questo confronto si conferma che l'orientamento del serbatoio cilindrico abbia un effetto limitato sull'estensione del getto: i fattori che realmente governano il comportamento del getto sono le condizioni di rilascio, l'altezza del punto di rilascio, il diametro del serbatoio e la distanza tra il punto di rilascio del getto e il serbatoio.

7 Conclusioni

In questo lavoro è stato simulato e studiato attraverso un modello CFD lo scenario incidentale che prevede l'interazione tra un getto di metano ad alta pressione e diverse configurazioni di uno o più ostacoli cilindrici. Per ognuno dei casi svolti, si è valutata l'estensione massima del getto libero misurato ad una concentrazione pari al limite inferiore di infiammabilità (0,05 volCH₄/volaria).

Le conclusioni sulla possibilità o meno di semplificare gli scenari studiati sono riportate in Tabella 7.1, precisando a partire da quale rapporto s/D è possibile farlo:

Tabella 7.1 - Conclusioni raggiunte. n.a. = non applicabile.

	Semplificabile rispetto a FJ	Semplificabile rispetto a Ref 0
Caso a singolo orizzontale	mai	n.a.
Caso a tandem orizzontale	mai	mai
Caso a singolo verticale	mai	n.a.
Caso a tandem verticale	mai	sempre
Caso b singolo orizzontale	mai	n.a.
Caso b tandem orizzontale	$s/D > 2$	$s/D > 2$
Caso b singolo verticale	mai	n.a.
Caso b tandem verticale	mai	sempre
Caso c singolo orizzontale	sempre	n.a.
Caso c tandem orizzontale	mai	mai
Caso c singolo verticale	sempre	n.a.
Caso c tandem verticale	$s/D > 2,5$	$s/D > 2,5$
Caso d singolo orizzontale	sempre	n.a.
Caso d tandem orizzontale	$s/D > 2,5$	$s/D > 2,5$
Caso d singolo verticale	mai	n.a.
Caso d tandem verticale	mai	sempre
Caso e singolo orizzontale	sempre	n.a.
Caso e tandem orizzontale	$s/D > 2$	$s/D > 2$
Caso e singolo verticale	mai	n.a.
Caso e tandem verticale	mai	mai
Caso f singolo orizzontale	mai	n.a.
Caso f tandem orizzontale	mai	sempre

8 Prospettive future

Sulla base di quanto discusso nella Sezione 7 sono state identificate 4 aree che meritano di essere sviluppate in successivi approfondimenti sul tema dei getti che impattano contro ostacoli multipli:

1. per verificare la correttezza del “*modello a tre zone*” proposto in Sezione 6.2 bisognerebbe estendere le simulazioni per i set di rilascio 2 e 3 aumentando il rapporto r_0/L_0 fino a che il ME(LFL) ritorna al valore unitario (Figura 6.5). Inoltre, si consiglia la ricerca di un parametro tale per cui tutte le curve degenerino un’unica interpolante.
2. Si consiglia di svolgere delle simulazioni in cui il primo ostacolo non è posizionato ad una distanza fissa pari alla metà della distanza raggiunta dall’LFL del getto libero, bensì farla variare avvicinandola o allontanandola per capire se le considerazioni ricavate in questa sede sono valide anche per altre distanze.
3. Per i cilindri orizzontali, si suggerisce di far variare la distanza del primo ostacolo e il set di rilascio al fine di trovare una correlazione che indichi sotto quali condizioni il getto viene deviato verso l’alto, producendo un accorciamento rispetto al getto libero, e sotto quali condizioni il getto viene deviato verso il basso (Figura 6.2), producendo un allungamento rispetto al getto libero.
4. Meritano di essere investigate le condizioni in cui il getto libero è al di sopra dell’altezza critica (Equazione 2.1) ma il getto, a causa dell’impatto contro il primo ostacolo, arriva comunque ad interagire con il terreno. Poiché dunque la condizione di altezza critica tale per cui il getto libero non interagisce con il terreno non è sufficiente a garantire la mancata interazione anche in presenza dell’ostacolo, si suggerisce di alzare l’altezza di rilascio fino a ricavare una nuova altezza critica tale per cui né il getto libero né il getto che impatta contro l’ostacolo vadano a contatto con il terreno.

9 Bibliografia

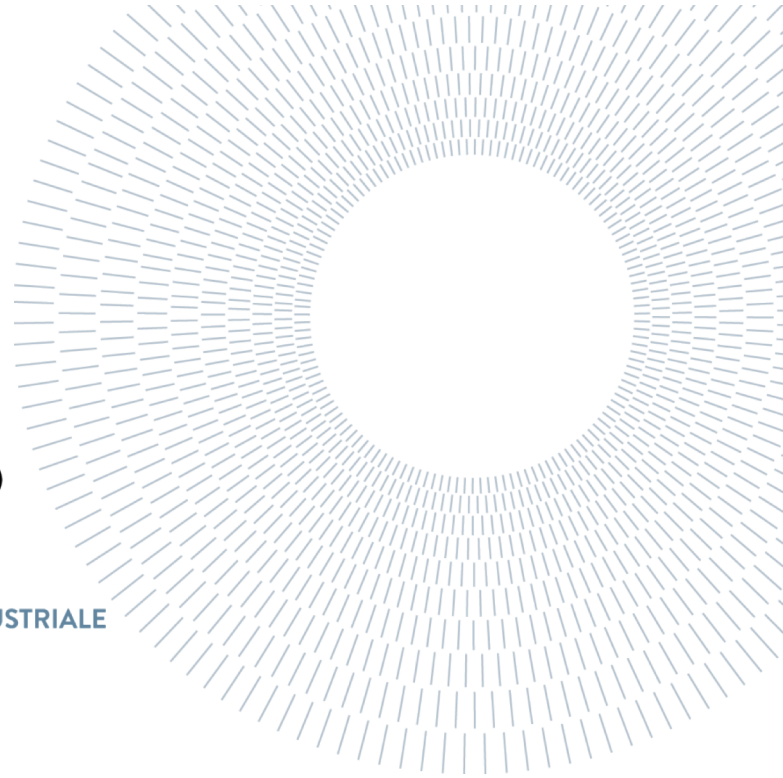
- [1] C. Colombini and V. Busini. *Obstacle influence on high-pressure jets based on computational fluid dynamics simulations*. Chemical Engineering Transactions, 2019.
- [2] L. Carlini. *Influenza del terreno su getti ad alta pressione*. Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2019.

- [3] C. Colombini, A. Martani, R. Rota and V. Busini. *Ground influence on high-pressure methane jets: practical tools for risk assessment*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020.
- [4] A. Martani. *Vertical cylindrical tank influence on high-pressure jets: a computational fluid dynamics study*. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2018.
- [5] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout and B. Pascal. *Free underexpanded jets in a quiescent medium: A Review*. Progress in Aerospace Sciences, 2015.
- [6] A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson and F. Swaeld. *The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas*. Combustion Science and Technology, 1984.
- [7] F. R. Menter. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. NASA Amesh Research Center, 1994.
- [8] J. Franke. *Best practice guideline for the CFD simulation of ows in the urban environment*. Meteorological Institute, 2007.
- [9] G. Romano, P. Tombini, P. Blas and V. Busini. *Multi-obstacles influence on High-Pressure Methane Jets*. Research Publishing, 2021.
- [10] B.D. Giles. *Fluidics, the Coanda Effect, and Some Orographic Winds*. University of Birmingham, 1976.
- [11] C. Colombini, C. Iannantuoni, R. Rota and V. Busini. *Unignited High-Pressure Methane Jet Impacting a Cylindrical Obstacle: An Assessment Tool for Consequences Analysis*. Journal of loss prevention in the process industries, 2021.



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE



Studio dell'interazione tra un getto ad alta pressione e ostacoli cilindrici in serie mediante CFD

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA
PREVENZIONE E DELLA SICUREZZA NELL'INDUSTRIA DI PROCESSO

Autori: **Fabio Ferrario, matricola 940126**
Anna Mormile, matricola 943251

Relatore: **Valentina Busini**

Co-relatori: **Giovanni Romano**
Paolo Tombini

Abstract

This thesis' work is part of a bigger line of research that focuses on the analysis of the interactions between a high-pressure flammable gaseous jet and several generic obstacles of varying shapes, dimensions, and numbers. Specifically, the studied obstacles are horizontal and vertical cylinders positioned in a series arrangement. The presence of obstacles that can change the shape and maximum axial extension of the free jet is of particular interest when it comes to industrial and process safety, since, in the case of an incidental event, consequences are directly proportional to the axial extension of the flammable mixture. Nevertheless, the modeling of such consequences is not easy, since simpler models, like the gaussian or integral model, are not capable of considering the presence of obstacles with satisfying outcomes. Consequentially, the usage of Computational Fluid Dynamic models (CFD) is needed, although it will require a noticeable amount of time and energy to utilize them properly. It is necessary to find the ideal approach to reach rigorous and precise results that can meet industrial needs, with the objective to define the limits of how much the incidental scenario can be simplified without losing its significance.

Through the software ANSYS®, our task is to analyze various configurations of the horizontal and vertical cylinders positioned in a series arrangement, process with which we aim to identify the geometrical parameters that manage to modify the maximum axial extension of the lower flammable limit (LFL) of the high-pressure flammable gaseous jet.

Key-words: high-pressure release, cylindrical obstacles influence, CFD.

Sommario

Questo lavoro si inserisce all'interno di un filone di ricerca che si propone di analizzare l'interazione tra un getto infiammabile ad alta pressione e dei generici ostacoli, diversi per forma, dimensione e numero. Nello specifico, in questo lavoro ci si è focalizzati su cilindri orizzontali e verticali posti in serie. Infatti, la presenza di ostacoli in grado di modificare la forma e l'estensione del getto libero è particolarmente interessante dal punto di vista della sicurezza di processo in quanto, in caso di evento incidentale, le conseguenze dello stesso saranno tanto più significative quanto maggiore sarà l'estensione della miscela infiammabile. Tuttavia, la modellazione di tali conseguenze non è scontata, in quanto sia i modelli gaussiani che i modelli integrali non sono in grado di considerare in modo soddisfacente la presenza di ostacoli. Per questo motivo occorre rivolgersi alla fluidodinamica computazionale (CFD), che però presuppone un notevole dispendio di tempo ed energie. Per conciliare un approccio che sia il più possibile preciso e rigoroso con le esigenze industriali, occorre quindi capire fino a che punto è possibile spingersi con la semplificazione dello scenario incidentale senza perdere la significatività dei risultati.

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare tramite il pacchetto software ANSYS® diverse configurazioni di cilindri orizzontali e verticali posti in serie per definire i parametri geometrici in grado di modificare la massima estensione del limite inferiore di infiammabilità (LFL) di un getto infiammabile ad alta pressione.

Parole chiave: rilascio ad alta pressione, influenza di ostacoli cilindrici, CFD.

Indice degli argomenti

Abstract	i
Sommario	iii
Indice degli argomenti	v
Introduzione	1
1. Stato dell'arte	3
1.1 Getti sotto-espansi	3
1.2 Struttura di un getto.....	4
1.3 Metodi matematici.....	7
1.3.1 Modelli gaussiani	7
1.3.2 Modelli integrali.....	8
1.3.3 Modelli tridimensionali.....	9
1.4 Getto libero.....	10
1.5 Getti che impattano contro un singolo ostacolo	11
1.6 Getti che impattano contro ostacoli multipli	12
1.7 Scopo del lavoro.....	14
2. Materiali e metodi	17
2.1 Metano e gas naturale.....	17
2.2 Sorgente virtuale e approccio di Birch.....	18
2.3 Fluidodinamica computazionale	21
2.4 ANSYS®	22
3. Risultati e discussione	25
3.1 Caso studio	25
3.1.1 Parametri operativi.....	26
3.2 Modellazione CFD	27

3.2.1	Geometria.....	27
3.2.2	Mesh.....	30
3.2.3	<i>Setup</i>	32
3.2.4	Soluzione.....	35
3.2.5	Risultati.....	36
3.3	Assunzioni e considerazioni fondamentali.....	37
3.3.1	Indipendenza dalla simmetria	37
3.3.2	Indipendenza dalla griglia di calcolo	38
3.4	Definizione degli scenari incidentali.....	39
3.4.1	Cilindri verticali	39
3.4.2	Cilindri orizzontali	40
3.5	Casi di confronto	41
3.5.1	Confronto con getto libero.....	41
3.5.2	Confronto con ostacolo singolo.....	42
3.6	Analisi dell'influenza del terreno	42
3.6.1	Influenza del terreno sull'estensione massima del getto	43
3.6.2	Casi con ostacolo singolo	44
3.6.3	Casi con ostacoli in tandem	50
3.7	Analisi delle interazioni tra getto e ostacolo	58
3.8	Confronto con lavori precedenti.....	63
4.	Conclusioni e prospettive future	67
4.1	Conclusioni.....	67
4.1.1	Set di rilascio 1	67
4.1.2	Set di rilascio 2.....	69
4.1.3	Set di rilascio 3.....	70
4.2	Prospettive future	72
	Bibliografia	75
	Indice delle figure.....	81
	Indice delle tabelle.....	85

Introduzione

Tra i più diffusi scenari incidentali si annoverano i rilasci di sostanze gassose ad alta pressione, che generano i cosiddetti getti [1]. Poiché il rischio è definito come il prodotto tra la probabilità di accadimento e il danno stimato, per valutare l'entità di quest'ultimo è necessario conoscere in primo luogo le proprietà chimico-fisiche delle sostanze coinvolte, oltre alle loro quantità [2].

Per esempio, gli scenari che si verificano a seguito del rilascio di sostanze tossiche o infiammabili sono ben diversi: nel primo caso, la dispersione in atmosfera è critica per il fatto che i limiti di tossicità sono molto bassi e quindi il getto ha il tempo di degenerare in una nube che può essere trasportata a distanze molto elevate [3]; nel caso di rilascio di sostanze tossiche i danni alle strutture sono minimi, ma si ha la più alta probabilità di generare effetti negativi per la salute delle persone esposte. Viceversa, nel caso di rilascio di sostanze infiammabili la tendenza si inverte: si riduce la probabilità di danni alle persone e cresce drasticamente la probabilità di danni alle strutture [4]. Ciò è giustificato dall'instaurarsi di effetti domino, ovvero di cascate di eventi incidentali correlati tra loro da relazioni causa-effetto [5]. Si genera quindi una serie di eventi attraverso cui le conseguenze dell'incidente primario vengono amplificate dagli incidenti successivi propagandosi nello spazio e nel tempo anche ad altre apparecchiature non direttamente coinvolte dall'evento radice.

Nello stesso lavoro [5], Casal sottolinea che proprio i getti, capaci di raggiungere notevoli distanze, sono tra gli eventi maggiormente capaci di innescare effetti domino. I getti sono anche tra i fenomeni più diffusi in quanto più del 50% degli incidenti industriali è causato da un cedimento meccanico [4]: quando compare una rottura nella parete di un serbatoio contenente gas infiammabile ad alta pressione, questo fuoriesce sotto forma di getto. La sua estensione dipende dalle caratteristiche fisiche del combustibile, dalla temperatura e dalla pressione di stoccaggio, dalla turbolenza atmosferica e dall'eventuale presenza di ostacoli in prossimità del rilascio.

Per quanto riguarda l'effetto degli ostacoli sull'estensione del getto, sono stati condotti numerosi studi volti ad indagare il comportamento dei getti liberi rispetto a quello dei getti che impattano dapprima contro un singolo ostacolo, e successivamente contro ostacoli multipli posti in diverse configurazioni.

1. Stato dell'arte

Ad oggi si sono effettuati numerosi studi sui getti sotto-espansi, in particolare su quelli impattanti contro svariate superfici, che sono generati principalmente da cedimenti di serbatoi contenenti sostanze stoccate in pressione [6]. Ad esempio, tra i tentativi numerici si annoverano quelli in cui si hanno interazioni con:

- ostacoli cilindrici [7];
- barriere di grandezza ridotta [8];
- superfici orizzontali [9], [10];
- superfici verticali [11];
- ostacoli di grandi dimensioni [12].

Per quanto riguarda invece i tentativi sperimentali, i principali sono stati quelli che hanno coinvolto:

- muri separatori [13];
- sfere [14], [15];
- superfici adiacenti ad una perdita [16].

In questa sezione verrà discussa dapprima la struttura generale dei getti, successivamente i parametri che influenzano un getto libero e in conclusione l'interazione di questo con ostacoli sia singoli che multipli.

1.1 Getti sotto-espansi

Con getto sotto-espanso si intende un getto generato da una fase gassosa rilasciata a una pressione superiore a quella ambiente [17]. In questa situazione, possono verificarsi tre diversi scenari a seconda del rapporto tra la pressione di stoccaggio e quella ambiente:

- se il rapporto P/P_s è inferiore ad un valore critico si ha la situazione di efflusso subsonico: all'aumentare della pressione di stoccaggio aumenta anche la velocità di efflusso e di conseguenza la portata scaricata. Volendo rappresentare su un grafico l'andamento di quest'ultima in funzione della

pressione di stoccaggio, le condizioni di efflusso sonico sono rappresentate nella parte destra della Figura 1.1;

- quando il rapporto P/P_s raggiunge il proprio valore critico si ottengono le condizioni di efflusso limite (retta verde tratteggiata in Figura 1.1);
- se il rapporto P/P_s è inferiore al valore critico si ha la situazione di efflusso sonico: all'aumentare della pressione di stoccaggio, la velocità di efflusso e la portata scaricata si mantengono costanti e pari al loro valore massimo. Volendo rappresentare su un grafico l'andamento di quest'ultima in funzione della pressione di stoccaggio, le condizioni di efflusso sonico sono rappresentate nella parte sinistra della Figura 1.1.

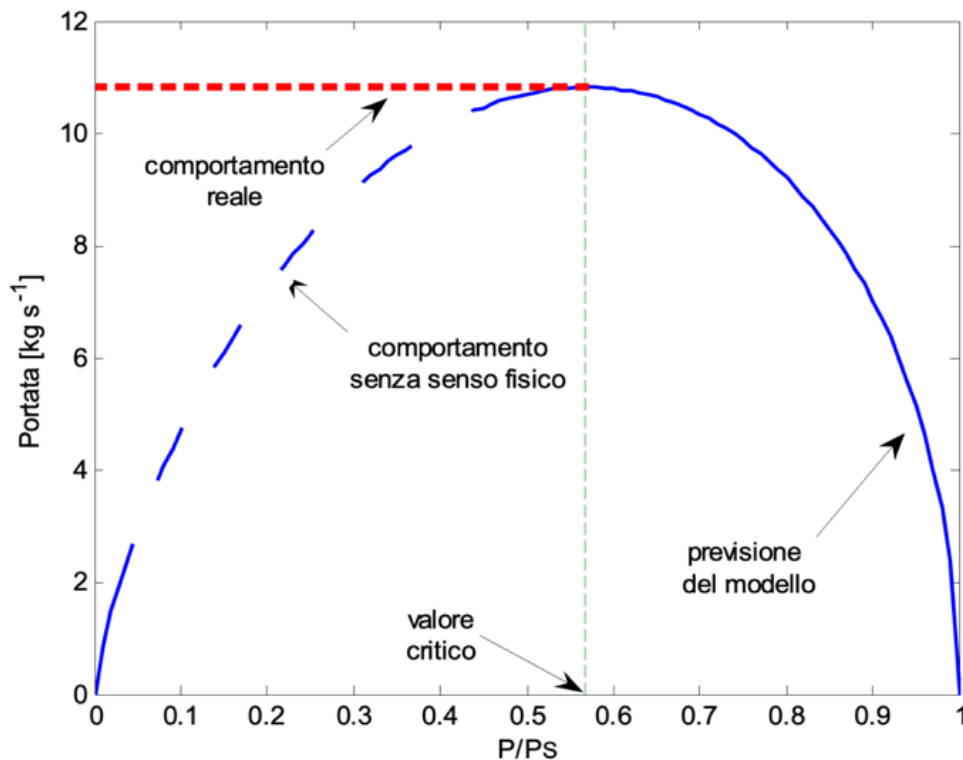


Figura 1.1 - Andamento della portata gassosa scaricata attraverso un orifizio al variare del rapporto tra la pressione interna e quella esterna. P = pressione di stoccaggio, P_s = pressione ambiente [2].

1.2 Struttura di un getto

Come riportato in Figura 1.2, in un getto sotto-espanso si riconoscono tre zone:

- *nearfield zone*;
- *transition zone*;
- *farfield zone*.

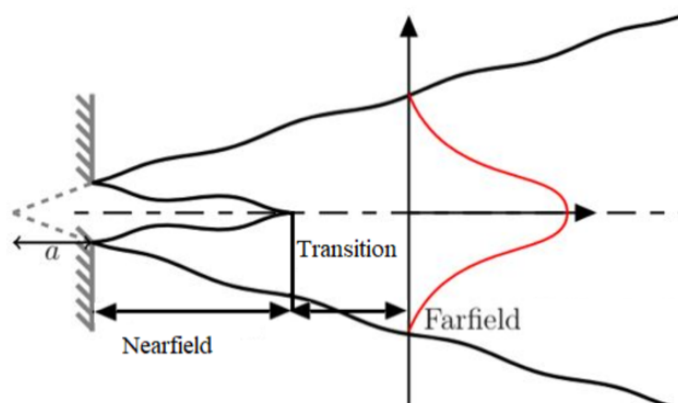


Figura 1.2 - Rappresentazione schematica di un getto sotto-espanso [17].

La *nearfield zone* può essere a sua volta suddivisa in due parti (Figura 1.3):

- *core*;
- *mixing layer*.

All'interno del *core* il fluido può essere considerato comprimibile e la sua velocità di uscita è talmente elevata da non consentire l'interazione con l'ambiente circostante. All'interno del *mixing layer* invece questo non è più vero e gli effetti di turbolenza che crescono regolarmente a valle del fluido inducono uno scambio termico e materiale con l'ambiente circostante.

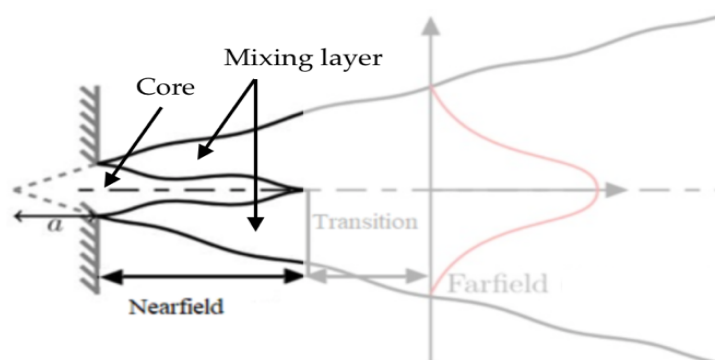


Figura 1.3 - Rappresentazione schematica di un getto sotto-espanso [17] con focus sulla *nearfield zone*.

All'interno della *nearfield zone* il fluido subisce un'espansione isoentropica fino a una ricomprensione dovuta alla generazione di onde d'urto. La pressione, dunque, rappresenta il parametro dominante: il rapporto tra le pressioni, infatti, determina la forma e l'estensione delle onde d'urto, il numero di Mach e l'angolo di divergenza del getto.

È possibile definire due diversi rapporti tra pressioni [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_0 = \frac{P}{P_s} \\ \eta_e = \frac{P_e}{P_s} \end{array} \right. \quad (1.1a)$$

$$(1.1b)$$

Dove P è la pressione interna, P_e è la pressione all'orifizio e P_s è la pressione esterna. Mediante questi due rapporti è quindi possibile ricavare tre situazioni caratteristiche, riepilogate in Tabella 1.1:

Tabella 1.1 - Tipologie di getti sotto-espansi in funzione dei parametri η_0 e η_e

Tipologia di getto	Range di η_0	Range di η_e
Moderatamente sotto-espanso	2 – 4	1,1 – 3
Altamente sotto-espanso	4 – 7	2 – 4
Estremamente sotto-espanso	> 7	> 4

Alla fine della *nearfield* zone, la linea sonica raggiunge l'asse e quindi il *mixing layer* sostituisce completamente il *core*, che scompare. Tale punto corrisponde all'inizio della *transition zone* (Figura 1.4).

In questa zona la variazione delle variabili è piccola sia radialmente che longitudinalmente, con conseguente miglioramento del *mixing* tra i due fluidi e un'omogenizzazione del campo di pressione.

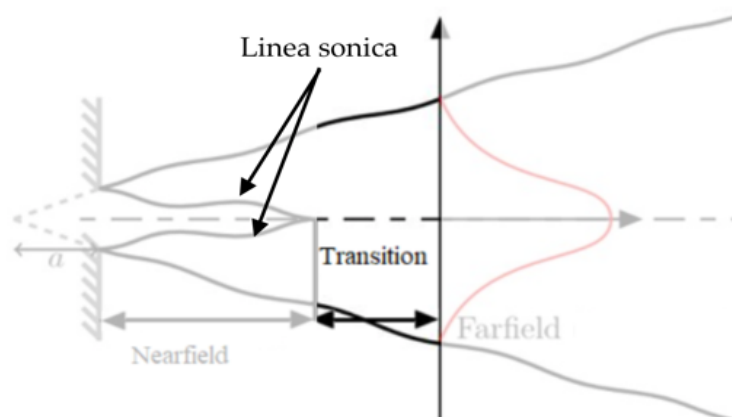


Figura 1.4 - Rappresentazione schematica di un getto sotto-espanso [17] con focus sulla *transition zone*.

Nella *farfield zone* invece il getto è completamente espanso, il flusso è sviluppato e le sue caratteristiche (P , T , v) sono comparabili con quelle ambientali, motivo per cui il getto entra in una fase di dispersione passiva.

La velocità longitudinale e la temperatura sull'asse sono inversamente proporzionali alla distanza dal piano di uscita mentre l'evoluzione radiale può essere descritta da un profilo gaussiano centrato sull'asse (Figura 1.5).

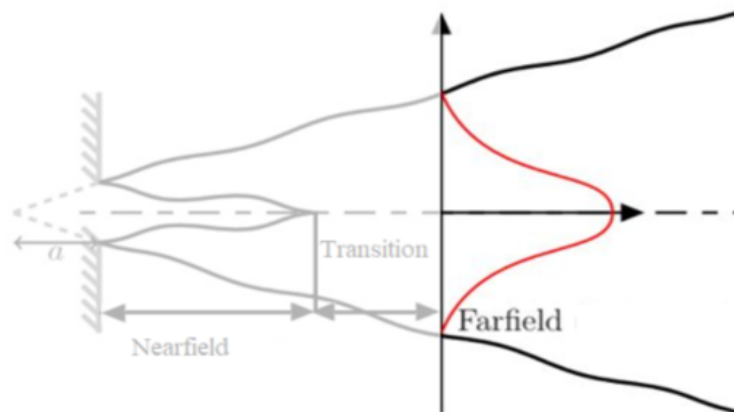


Figura 1.5 - Rappresentazione schematica di un getto sotto-espanso [17] con focus sulla *farfield zone*.

1.3 Metodi matematici

In letteratura esistono tre categorie di metodi per descrivere quantitativamente il comportamento di un getto [18]:

- Modelli gaussiani
- Modelli integrali
- Modelli tridimensionali

1.3.1 Modelli gaussiani

I modelli gaussiani (Figura 1.6) sono modelli di campo lontano, pertanto sono in grado di modellare solo la parte di farfield, indicativamente oltre i cento metri dal punto di rilascio.

L'approccio alla caratterizzazione di un getto mediante modelli gaussiani è il più semplice tra quelli a disposizione [19].

In questo tipo di modelli la sezione del getto è ellittica e la distribuzione delle concentrazioni è lineare lungo l'asse ma gaussiana nelle due direzioni di *crosswind*:

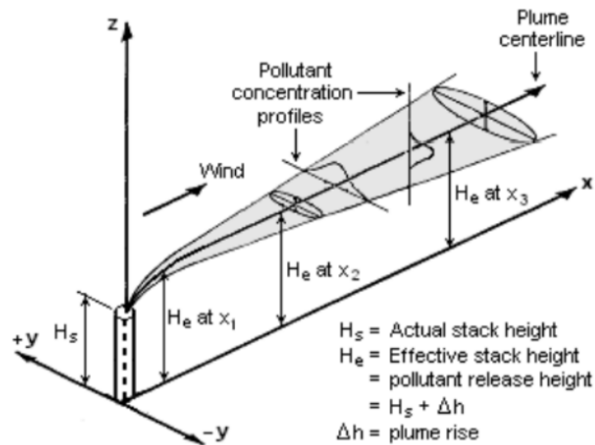


Figura 1.6 - Rappresentazione di un pennacchio mediante modello gaussiano [2].

1.3.2 Modelli integrali

I modelli integrali (Figura 1.7) vengono impiegati nella modellazione di incidenti che coinvolgono gas densi, in quanto nella prima fase della dispersione sono in grado di tenere in considerazione l'effetto della gravità. Oltre allo scambio di materia viene risolto anche il bilancio di energia e quello di quantità di moto utilizzando le equazioni di Navier – Stokes nella forma semplificata di Bernoulli, che attraverso opportune semplificazioni diventa:

$$\frac{dR}{dt} = K \cdot \left(g \cdot \frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} \cdot H \right)^{0,5} \quad (1.5)$$

Dove H e R sono rispettivamente l'altezza e il raggio del getto, K è un parametro sperimentale, g è l'accelerazione di gravità e ρ_g e ρ_a sono rispettivamente la densità del getto e dell'aria ambiente.

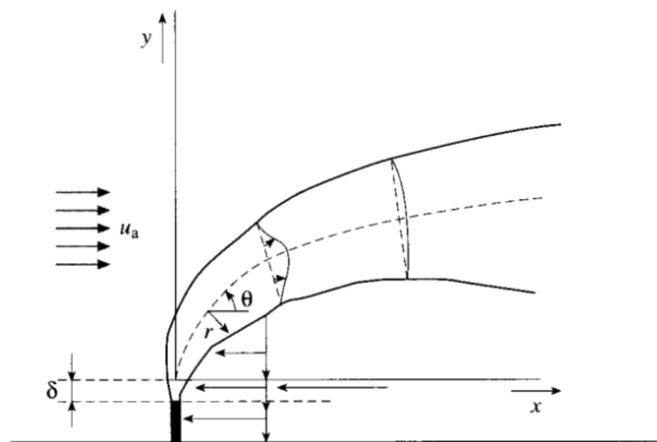


Figura 1.7 - Modellazione di un rilascio continuo a getto con un modello integrale [23].

1.3.3 Modelli tridimensionali

I modelli tridimensionali di fluidodinamica computazionale (Figura 1.8) hanno preso piede negli ultimi anni in quanto richiedono l'impiego di macchine con elevata capacità di calcolo, cosa che fino a poco tempo fa ne limitava molto l'utilizzo. Essi accoppiano i bilanci precedentemente citati a opportuni modelli di turbolenza e a condizioni al contorno in grado di caratterizzare sia l'ambiente che la sorgente. Questi modelli danno origine ad un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che possono essere complessivamente rappresentate con la relazione generale:

$$S = \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla(\rho U \Phi - \Gamma \nabla \Phi) \quad (1.2)$$

Dove U rappresenta il vettore velocità, Φ è una generica variabile associata al moto del fluido, Γ rappresenta il coefficiente di diffusione della variabile Φ , ρ rappresenta la densità del fluido, t rappresenta la coordinata temporale e S rappresenta il termine di generazione.

I modelli CFD sono particolarmente indicati per lo studio di ambienti congestionati caratterizzati da numerosi ostacoli di natura, geometria e configurazione anche molto diverse tra loro.

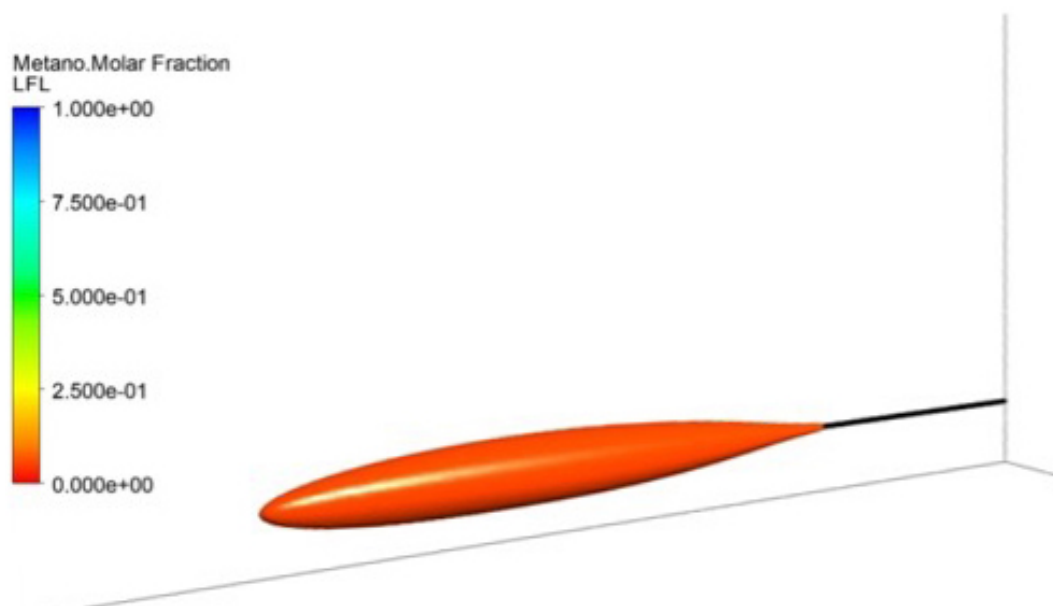


Figura 1.8 - Modellazione di un rilascio continuo a getto con un modello di fluidodinamica computazionale.

1.4 Getto libero

Un getto libero è definito come un getto che non viene influenzato dall'ambiente in cui viene rilasciato.

Il profilo di concentrazione lungo l'asse del getto, sia esso subsonico o supersonico, varia sia lungo la componente assiale x sia lungo la componente radiale r , a causa degli effetti di turbolenza e di trascinamento dell'aria [21].

Il decadimento della frazione molare media lungo l'asse del getto può essere espresso mediante il modello di Chen and Rodi (1980) [22]:

$$ME_{FJ} = \frac{k \cdot d_{ps}}{LFL} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

Dove ME_{FJ} è il *Maximum Extent* del *Free Jet*, k è una costante di decadimento ottenuta sperimentalmente, d_{ps} è il diametro dell'orifizio (discusso più nel dettaglio in Sezione 2.2 "Sorgente virtuale e approccio di Birch"), ρ_a è la densità dell'aria e ρ_g è la densità del gas. Entrambe le densità sono calcolate a temperatura e pressione ambiente.

Per quanto riguarda invece il profilo radiale del getto, esso può essere descritto da una gaussiana [2], ed è espresso come:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \bar{v} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \alpha \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right] \quad (1.4)$$

Dove q è la portata scaricata, \bar{v} è la velocità del vento, σ_y e σ_z sono i parametri di dispersione, $\bar{C}(x, y, z)$ è la concentrazione nel punto desiderato, H è la quota al punto di rilascio e α il parametro di riflessione al suolo.

Un altro aspetto di fondamentale importanza nella caratterizzazione dei getti è l'interazione con il terreno (Figura 1.9): al di sotto di una certa altezza di rilascio, la miscela infiammabile è in grado di raggiungere distanze maggiori di quelle che raggiungerebbe in caso di interazione nulla [21], motivo per cui il punto di rilascio non è trascurabile e l'effetto del terreno va sempre considerato all'interno di un'analisi di rischio:

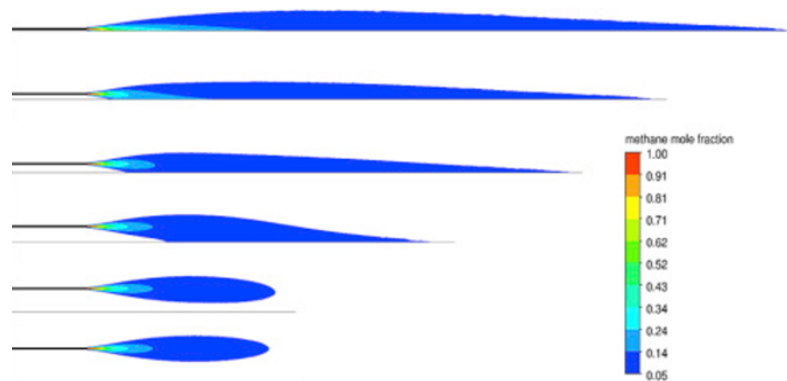


Figura 1.9 - Profilo dell'LFL al variare dell'altezza del punto di rilascio rispetto al terreno [22].

Colombini e colleghi hanno studiato questo fenomeno al variare di:

- altezza di rilascio [23];
- concentrazione di metano [24];
- sostanza rilasciata [25].

Ai fini della trattazione, si riporta la correlazione valida per rilasci di metano. Per la procedura completa, si rimanda a [25]:

$$ME = ME_{FJ} \cdot \left(3,89 - 0,22 \cdot \frac{h}{d_{ps}}\right) \quad (1.5)$$

1.5 Getti che impattano contro un singolo ostacolo

Sono stati condotti numerosi studi volti a valutare l'interazione tra un getto e:

- cilindri verticali [7];
- cilindri orizzontali [26];
- sfere [14];
- muri e barriere [6];
- superfici piane [10];
- *large obstacles* [12];
- *pipe rack* [27], [28].

In particolare, da un precedente lavoro di tesi [7] si evince che il getto assume quattro comportamenti diversi in funzione della distanza dal punto di rilascio (Figura 1.10):

- *ground influence zone*;
- *ground-tank influence zone*;
- *obstacle influence zone*;
- *free jets zone*.

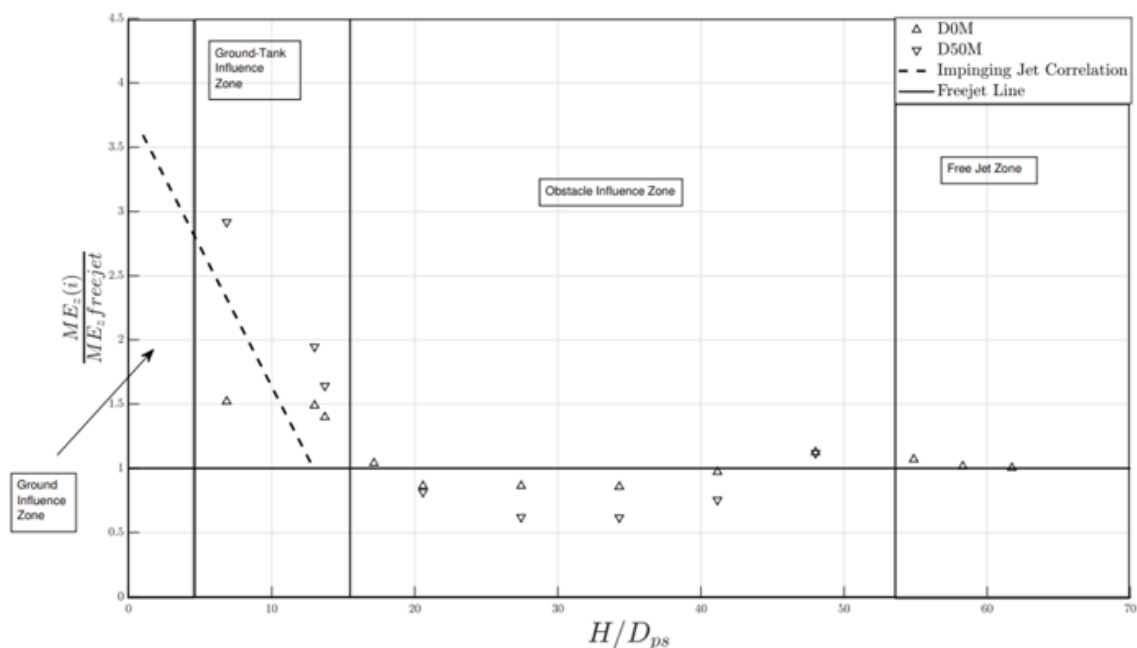


Figura 1.10 - Andamento del ME dei getti in presenza di un ostacolo adimensionalizzato rispetto al caso di getto libero rispetto al rapporto tra la quota del punto di rilascio e il diametro dell'orifizio [7].

Nella prima zona l'effetto predominante è quello del terreno, motivo per cui la massima estensione del limite inferiore di infiammabilità può essere stimata mediante la sopracitata Equazione 1.5. Al di sopra di un valore soglia si entra nella seconda zona, in cui non è più trascurabile la presenza dell'ostacolo. Infatti il getto è influenzato sia dall'interazione con il terreno che da quella con l'ostacolo. L'influenza del terreno, tuttavia, si fa sempre meno importante fino ad entrare nella terza zona in cui essa è nulla e il getto risente esclusivamente della presenza dell'ostacolo. L'estensione di questa zona è direttamente proporzionale alle dimensioni dell'ostacolo. Infine, per grandi distanze il getto non risente più di alcuna interazione e il suo profilo degenera in quello di un free jet.

1.6 Getti che impattano contro ostacoli multipli

I principali lavori che sono stati condotti su ostacoli multipli rappresentavano ambienti urbani congestionati:

- matrici cubiche [29];
- vagoni ferroviari in aree urbane [30];
- conglomerati cittadini [31], [32].

In ambito industriale, l'attenzione è stata rivolta principalmente a geometrie che potessero ben rappresentare dei tank contenenti gas o liquidi, principalmente di forma cilindrica, ma non solo:

- cilindri di pari diametro in serie [33];
- cilindri di diverso diametro in serie [34], [35];
- cilindri in configurazione a croce [36].

In particolare, la significatività degli ostacoli successivi al primo è legata alla formazione o meno di vortici in grado di diluire il getto.

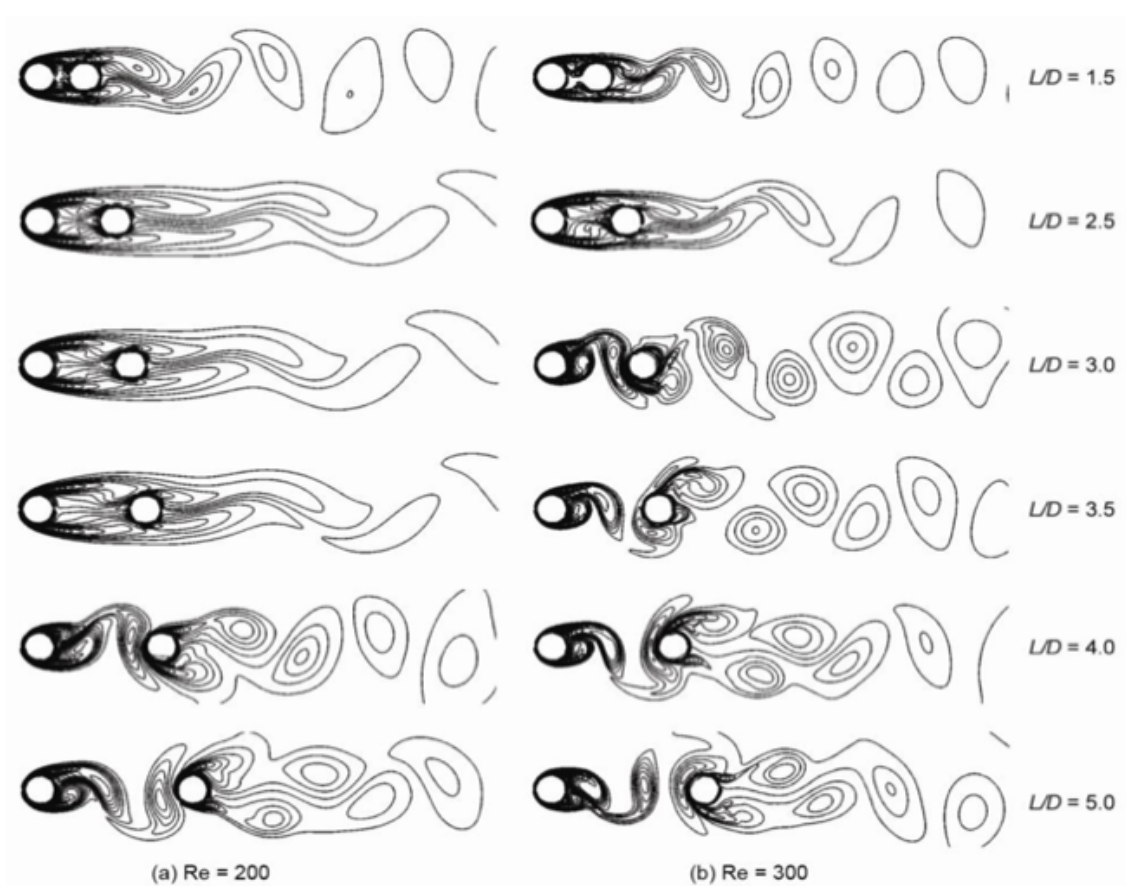


Figura 1.11 - Formazione di vortici in funzione del numero di Reynolds e del rapporto tra il diametro e la distanza tra gli ostacoli [35].

In uno studio precedente [33], ci si è concentrati su due cilindri verticali posti in serie. In questo scenario, è risultato che il secondo tank non avesse un impatto significativo rispetto al primo sulla modellazione dello scenario incidentale. Questo perché i vortici si generano sempre dietro al primo tank e mai dietro al secondo, indipendentemente dalle condizioni operative e dalla distanza relativa dei due tank. Inoltre, come mostrato in Figura 1.11, al crescere del numero di Reynolds il distacco

dei vortici a valle del primo ostacolo avviene per distanze relative tra i due ostacoli minori. In ambito industriale sono comuni alti numeri di Reynolds, tuttavia per questo lavoro di tesi esso risulta di difficile definizione in quanto, a differenza del lavoro citato [35], gli ostacoli non sono immersi in un flusso continuo ma interagiscono con un getto che presenta una velocità decrescente.

Sulla scorta di queste considerazioni si è voluta replicare la ricerca confrontando il caso di ostacoli multipli rispetto al getto libero anziché rispetto all'ostacolo singolo. Questa scelta è stata fatta per poter confrontare i risultati ottenuti con quelli degli altri modelli proposti da Busini e colleghi. Infine, si è analizzato lo scenario in cui due cilindri orizzontali vengono posti in serie, per verificare se sia possibile giungere a considerazioni analoghe o meno.

1.7 Scopo del lavoro

Per poter descrivere l'interazione tra un getto e uno o più ostacoli bisogna ricorrere alla fluidodinamica computazionale che però presenta i seguenti limiti [37]:

- tempi di calcolo elevati;
- costi elevati per le licenze (salvo che per i *software open source*);
- costi aggiuntivi per la formazione degli analisti;
- capacità di calcolo elevata.

Per questo motivo, è importante concentrare gli sforzi per generare degli strumenti in grado di velocizzare i tempi di simulazione. Parallelamente, è utile limitare l'utilizzo della CFD a quelle situazioni in cui essa sia strettamente indispensabile cercando invece di sfruttarne i risultati per generare delle relazioni sperimentali speditive che consentano una rapida valutazione delle conseguenze di un incidente. In quest'ottica, dunque, l'analisi approfondita del fenomeno è il punto di partenza per la definizione di scenari in grado di far emergere le differenze qualitative di comportamento del getto al variare di alcuni parametri a cui il getto è sensibile.

Suddetti scenari verranno poi modellati mediante la fluidodinamica computazionale per la definizione quantitativa della variazione dei parametri preventivamente ipotizzati. Infine, l'analisi di questi risultati permetterà di estrarre degli andamenti generali che potranno essere tenuti in considerazione per modellare, sotto le ipotesi fatte, numerosi scenari incidentali senza dover ricorrere tutte le volte alla fluidodinamica computazionale per l'analisi dello specifico evento. Questo processo permette dunque di semplificare l'analisi dell'incidente senza perdere in significatività, ridurre i tempi di calcolo per l'analista e i costi per il cliente, in modo da rendere più agevole l'analisi di rischio.

Per conciliare un approccio che sia il più possibile preciso e rigoroso con le esigenze industriali, occorre quindi capire fino a che punto sia possibile spingersi con la semplificazione dello scenario incidentale senza perdere la significatività dei risultati. Nello specifico, nella prima parte di questo lavoro si è analizzato il comportamento di un getto che impatta contro un cilindro orizzontale. Successivamente si è posto il focus su quanto questo comportamento differisca da quello dello stesso getto in presenza di un cilindro verticale.

Per fare ciò, in prima battuta ci si è basati sui risultati ottenuti dalle simulazioni di cilindri verticali studiati in altri studi [33]. Il parametro verso il quale è stato fatto questo confronto è stato il *Maximum Extent* (ME) del limite inferiore di infiammabilità (LFL) della miscela di gas naturale.

2. Materiali e metodi

In questa sezione verranno discusse le principali proprietà del metano, che è il gas rilasciato col getto in esame, ponendo particolare attenzione all'importanza di questo gas nell'industria di processo. Verrà poi data una definizione dei limiti superiore e inferiore di infiammabilità e una trattazione sulla loro implementazione in un'analisi di rischio. Per quanto riguarda i metodi, invece, verranno descritti i modelli di turbolenza e i modelli di chiusura che permettono la corretta implementazione della CFD. Infine, verrà data una panoramica del programma utilizzato per svolgere le simulazioni: ANSYS®.

2.1 Metano e gas naturale

Nell'industria del processo, l'uso del gas naturale è sempre stato di particolare interesse per molteplici attività, in particolare per la produzione di energia elettrica. Nonostante la sua composizione possa variare, il componente principale del gas naturale è il metano, la cui formula chimica è CH_4 .

Anche se il metano ha una reattività inferiore a quella degli altri idrocarburi a causa dei forti legami covalenti tra l'atomo di carbonio e quelli di idrogeno, è comunque capace di formare una miscela altamente infiammabile qualora entrasse in contatto con l'ossigeno presente nell'atmosfera [38]. Per questa ragione, quando questo gas viene trasportato in sistemi di tubazioni pressurizzati, la presenza di ossigeno deve essere evitata completamente.

Le caratteristiche termofisiche utilizzate nelle simulazioni sono state quelle del gas naturale, come riassunto in Tabella 2.1. Poiché il gas naturale è una miscela composta al 92,4% da metano e 7,6% da altri idrocarburi leggeri: quali etano e propano [39], si sono mantenute le stesse proprietà di miscela con l'obiettivo di rimanere il più fedele possibile agli scenari incidentali reali. Per semplicità, tuttavia, ci si riferirà al gas naturale come metano.

Tabella 2.1 - Proprietà fisiche del metano. Fonte: NIST (*National Institute of Standards and Technology*)

<i>Peso molare [g/mol]</i>	$c_p(288K) [\frac{J}{kg \cdot K}]$	$\gamma [-]$
17,32	2209,6	1,35

In Tabella 2.2 sono riepilogate invece le proprietà di fiamma del metano valutate in condizioni standard (25°C e 1 atm).

Tabella 2.2 - Caratteristiche di infiammabilità del metano [41].

<i>LFL [%vol]</i>	<i>UFL [%vol]</i>	<i>MIE [mJ]</i>	<i>FTP [°C]</i>	<i>AIP [°C]</i>
5	15	0,26	-222,5	632

L'LFL è la più bassa concentrazione di combustibile in una miscela gassosa necessaria per innescare una combustione, mentre l'UFL è la più alta concentrazione di combustibile in una miscela gassosa oltre la quale non si è in grado di innescare la reazione di combustione per difetto di ossidante. Infine, per poter innescare la reazione è necessario fornire al sistema una certa quantità di energia chiamata energia minima di accensione (MIE, *Minimum Ignition Energy*).

Tuttavia, la reazione di combustione potrebbe innescarsi ma non sostenersi: per questo motivo si definisce la temperatura di *flash point* (FPT, *Flash Point Temperature*), che è la temperatura minima alla quale una miscela infiammabile può infiammarsi in maniera stabile. Se la temperatura è inferiore a FPT, non avviene alcuna reazione.

Viceversa, una volta raggiunta una temperatura sufficientemente elevata all'interno del sistema, non sarà necessaria alcuna sorgente di accensione: in queste condizioni le molecole del sistema hanno raggiunto un livello energetico tale da far avviare l'ignizione senza bisogno di una sorgente esterna. Questa temperatura è definita come temperatura di autoaccensione (AIT, *Auto Ignition Temperature*).

2.2 Sorgente virtuale e approccio di Birch

Il *farfield* di un getto sotto-espanso descritto nella Sezione 1.2 "Struttura di un getto" può essere modellato come getto incomprimibile ed espanso se le variabili che lo caratterizzano sono adeguatamente scalate. Per completare questa operazione, all'interno delle simulazioni si utilizza una pseudo-sorgente come punto di rilascio del getto, la quale dipende dalle dimensioni dell'orifizio ipotizzato nello scenario incidentale [17].

Questo metodo è generalmente usato per evitare di descrivere i complessi effetti di comprimibilità che si manifestano nella *nearfield zone* e nella *transition zone* del getto. Studi sulla comprimibilità del getto sono stati svolti in una tesi precedente [40].

In questo lavoro di tesi si è utilizzato l'approccio introdotto da Birch e collaboratori nel 1984 [39], basato su un esperimento che studia il gradiente di concentrazione di un getto sonico e comprimibile di gas naturale attraverso il processo di cromatografia gassosa. Lo pseudo-diametro introduce una superficie di fronte al serbatoio di stoccaggio che viene attraversata dalla stessa portata massica che fuoriesce dal foro che causa lo scenario incidentale. La portata massica viene definita a temperatura e pressione ambiente, a velocità costante pari a quella del suono.

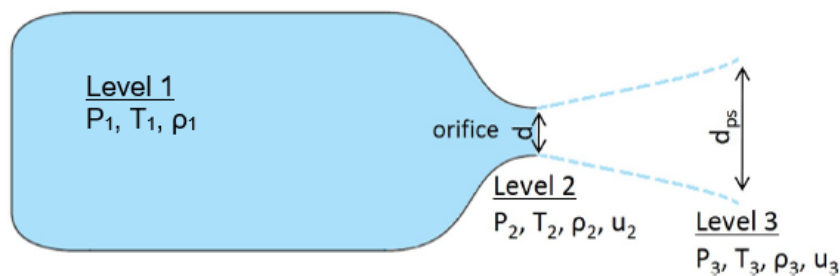


Figura 2.1 - Rappresentazione del modello a tre livelli di Birch [39].

Se consideriamo un rilascio gassoso da un serbatoio di volume infinito, possiamo distinguere tre zone, o livelli, rappresentate in Figura 2.2:

- livello 1: condizioni all'interno del serbatoio, a monte del punto di rilascio;
- livello 2: condizioni all'orifizio di scarico;
- livello 3: condizioni dopo l'espansione del flusso a condizioni ambiente.

Riferendoci allo pseudo-diametro come diametro equivalente, l'Equazione [2.1] è la seguente:

$$\dot{m} = C_d \cdot \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \rho_3 \cdot v_3 \cdot A_3 \quad (2.1)$$

L'equazione sopra citata esprime la portata massica del getto che fuoriesce dal serbatoio attraverso l'orifizio, in cui C_d è il coefficiente di perdite di carico al livello 2 (pari a 0,8), v_2 e v_3 sono le velocità soniche locali rispettivamente ai livelli 2 e 3, ρ_2 e ρ_3 sono le densità del getto libero riferite rispettivamente ai livelli 2 e 3, A_2 è l'area dell'orifizio di scarico e infine A_3 è la sezione del foro avente il diametro equivalente descritto da Birch.

Come definito da Birch nel 1984, il diametro equivalente è descritto dall'Equazione 2.2:

$$\frac{D_{ps}^2}{D^2} = \frac{C_d \cdot \rho_2 \cdot v_2}{\rho_3 \cdot v_3} \quad (2.2)$$

Dove D_{ps} è il diametro equivalente, mentre D è il diametro dell'orifizio. Gli altri parametri sono quelli descritti per l'equazione precedente.

Assumendo una trasformazione isentropica tra livello 1 e 2, la temperatura T_2 e la pressione P_2 al livello 2 saranno le seguenti [41]:

$$\begin{cases} T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right) & (2.3a) \\ P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} & (2.3b) \end{cases}$$

Dove T_1 e P_1 sono rispettivamente la temperatura e pressione al livello 1, mentre γ è il rapporto tra il calore specifico a pressione e volume costante.

Se il gas è ideale, è possibile definire la densità ai livelli 2 e 3 rispettivamente come:

$$\begin{cases} \rho_2 = \frac{P_1 \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cdot MW}{R \cdot T_1} & (2.4a) \\ \rho_3 = \frac{P_3 \cdot MW}{R \cdot T_3} & (2.4b) \end{cases}$$

Nell'Equazione 2.4 MW è la massa molare del gas e R è la costante universale dei gas.

Infine, la velocità sonica ai livelli 2 e 3 è rispettivamente:

$$\begin{cases} v_2 = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_2 \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)}{MW}} & (2.5a) \\ v_3 = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_3}{MW}} & (2.5b) \end{cases}$$

Sostituendo le Equazioni 2.4 e 2.5 all'interno dell'Equazione 2.2, l'equazione del diametro equivalente diventa:

$$\frac{D_{ps}^2}{D^2} = C_d \cdot \frac{P_1}{P_3} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \quad (2.6)$$

2.3 Fluidodinamica computazionale

La fluidodinamica computazionale è uno dei metodi precedentemente introdotti nella Sezione 1.3.3 e viene utilizzato quando è necessario risolvere in maniera rigorosa le equazioni di trasferimento di calore, massa e quantità di moto di un flusso di fluido. A differenza degli altri modelli, la CFD è in grado di gestire flussi in regime turbolento senza dover ricorrere a soluzioni iterative. È anche possibile tenere conto di come potrebbe svilupparsi una reazione chimica attraverso la risoluzione matematica delle equazioni stechiometriche.

All'interno dell'industria di processo, l'uso della fluidodinamica computazionale viene impiegata nei processi di sperimentazione e recupero dei dati in quanto consente di evitare esperimenti sul campo, costosi e spesso pericolosi. Attraverso l'aumento della potenza computazionale, questo strumento è diventato un pilastro del settore, applicabile in molti campi dell'ingegneria [42]. L'approccio CFD può essere suddiviso in tre sezioni:

- *pre processing*;
- *solution*;
- *post processing*.

Per quanto riguarda la prima fase, il *pre-processing*, è necessario costruire adeguatamente la geometria del dominio che si vuole simulare. Questa operazione viene eseguita tramite un software CAD (*Computer Aided Design*) o un software integrato all'interno del programma di fluidodinamica computazionale. Occorre inoltre progettare una mesh computazionale, vale a dire una griglia tridimensionale di celle (*mesh*) entro cui il programma risolve le equazioni di bilancio. La dimensione ottimale della *mesh* viene stabilita mediante un compromesso che consente di bilanciare i tempi di elaborazione con la precisione della risoluzione. Infine, devono essere stabilite le condizioni al contorno della simulazione.

Per la seconda fase, quella di generazione della soluzione, sono disponibili diversi metodi di risoluzione che differiscono l'uno dall'altro per il grado di accuratezza e per le risorse computazionali richieste [42]. I tre metodi principali sono:

- *Direct Numerical Solution (DNS)*
- *Large Eddy Simulation (LES)*
- *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)*

Le risorse computazionali necessarie per la risoluzione mediante DNS sono superiori alle altre due, poiché le equazioni di bilancio vengono risolte fino al vortice più piccolo, senza alcuna semplificazione. Si tratta di un metodo molto accurato ma a causa del suo alto costo e della potenza di calcolo è usato raramente nell'industria di

processo. Il metodo LES è una valida alternativa al DNS: i vortici più grandi sono risolti numericamente, mentre quelli in scale più piccole sono modellati. Questo metodo offre un buon compromesso in termini di accuratezza e gestione delle risorse. Infine, il metodo RANS è stato il primo metodo sviluppato per risolvere problemi di flussi turbolenti. È il risolutore più utilizzato nell'industria di processo grazie ai bassi oneri computazionali richiesti. Consiste in un insieme di equazioni differenziali alle derivate parziali in cui il comportamento del getto viene previsto mediando nel tempo i suoi valori puntuali. Le simulazioni eseguite per questo lavoro sono state condotte utilizzando il risolutore RANS con modello di chiusura $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport).

Il *post processing*, invece, consiste nell'elaborazione dei risultati ottenuti e nella loro rappresentazione in forma grafica tridimensionale. Esso si configura come il punto di partenza per ricavare andamenti, relazioni e valutazioni quantitative.

2.4 ANSYS®

ANSYS® è una suite di svariati software per la progettazione ingegneristica che copre l'intero settore dell'ingegneria, consentendo la simulazione di un gran numero di scenari diversi, dai test di durabilità alla progettazione di semiconduttori fino ad arrivare alle analisi fluidodinamiche oggetto di questa tesi [43].

Nello specifico, i solutori CFD di ANSYS® si basano sul metodo dei volumi finiti, il che significa che il dominio viene discretizzato in un insieme finito di volumi di controllo e le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia sono risolte per ogni singolo volume di controllo.

Tutte le simulazioni CFD eseguite in questo lavoro sono state implementate utilizzando la versione 19.1 di ANSYS®. La pre elaborazione, la soluzione e la post elaborazione sono state eseguite dai seguenti programmi:

- ANSYS® *Design Modeler* è stato usato per la creazione della geometria;
- ANSYS® *Meshing* è stato usato per la creazione della *mesh*;
- ANSYS® *CFX-Pre* è stato usato per la definizione delle condizioni al contorno;
- ANSYS® *CFX-Solver* è stato usato per risoluzione delle equazioni di trasporto;
- ANSYS® *CFD-Post* è stato usato per la post elaborazione dei risultati.

Tutte le simulazioni sono state impostate ed eseguite tramite la suite ANSYS® *Workbench*, che permette una gestione integrata dei cinque programmi sopra citati garantendo un miglior controllo dell'intero processo.

3. Risultati e discussione

Nell'industria del processo si possono verificare svariati scenari incidentali. La foratura di una o più tubazioni che trasportano metano ad alta pressione comporta il rilascio del metano stesso sotto forma di getto ad alta pressione. A distanza ravvicinata dal punto di rilascio le concentrazioni del gas sono troppo alte e impediscono quindi la generazione di una miscela infiammabile. A distanza maggiore dal punto di rilascio, il getto si diluisce attraverso processi di richiamo di aria e dunque la concentrazione del gas diminuisce rientrando all'interno del limite di infiammabilità della miscela gas aria. Poiché il getto è infiammabile tra il limite superiore di infiammabilità e il limite inferiore di infiammabilità, la concentrazione di riferimento per la valutazione dei risultati delle simulazioni è stata appunto l'LFL del metano, come riportato in Tabella 2.2. A causa della presenza di numerosi tipi di ostacoli con il quale il getto può interagire (e.g. serbatoi, fasci tubieri ecc.), notevoli modifiche possono verificarsi sulla distanza finale registrata. Di conseguenza, all'interno di questo lavoro di tesi sono stati studiati gli effetti sulla distanza massima registrata ad una concentrazione pari al limite inferiore di infiammabilità a differenti condizioni di rilascio del getto e considerando come ostacoli di riferimento dei serbatoi cilindrici in linea, con variazione della posizione del secondo serbatoio.

3.1 Caso studio

Ogni scenario è stato analizzato attraverso cinque passaggi (Figura 3.1):

- generazione della geometria;
- generazione della *mesh*;
- definizione dei parametri operativi;
- ricerca della soluzione;
- valutazione dei risultati.

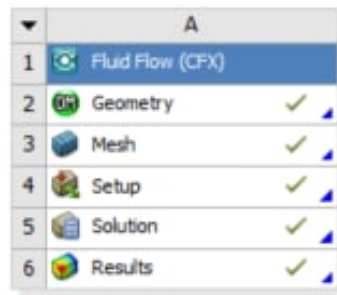


Figura 3.1 - Procedura di elaborazione di uno scenario incidentale.

3.1.1 Parametri operativi

Il fulcro del lavoro svolto in questa tesi si basa sull'analisi degli effetti che l'interazione, tra un getto ad alta pressione di metano e uno o più serbatoi, può avere sulla distanza massima che la miscela infiammabile può raggiungere.

La simulazione è stata completata attraverso il software ANSYS® CFX, dove il getto viene rilasciato da un ugello con diametro uguale al diametro equivalente D_{ps} , calcolato usando il modello di pseudo-diametro di Birch, in assenza di ostacoli che possano interagire con il getto stesso.

Sono state studiate diverse condizioni di rilascio; esse sono definite dalla variazione sia del diametro dell'orifizio generato dall'incidente che della pressione di stoccaggio del metano e dell'altezza dell'ugello di rilascio. Il diametro dell'orifizio e la pressione di stoccaggio del gas servono per definire la portata di rilascio, mentre l'altezza alla quale l'ugello viene posizionato è stata fatta variare in funzione della dimensione degli ostacoli che sono stati usati per i diversi casi (i.e., l'ugello è stato sempre posizionato a metà altezza dell'ostacolo).

Usando le equazioni riportate nella sezione 2.2, i dati caratteristici del metano riportati in Tabella 2.1 e i valori di condizioni ambientali pari a $P=1$ atm e $T=27^{\circ}\text{C}$, sono state definite le seguenti prove:

Tabella 3.1 - Caratteristiche del rilascio di metano.

	Set 1	Set 2	Set 3
Diametro reale dell'orifizio [mm]	25,4	25,4	50,8
Pressione di stoccaggio [bar]	65	130	65
Diametro equivalente [mm]	146	206	292
Portata massica [kg/s]	5,2	10,4	20,7

Per quanto riguarda la geometria degli ostacoli sono state prese in considerazione tre diverse configurazioni in funzione delle quali è stata anche impostata un'altezza di rilascio del gas (Tabella 3.2):

Tabella 3.2 - Geometrie studiate e relative altezze di rilascio.

	Diametro [m]	Altezza/Larghezza [m]	Altezza supporti [m]	Altezza rilascio [m]
Cilindro orizzontale	2	7	0,5	1,5
Cilindro orizzontale	3	7	0,5	2
Cilindro verticale	2	7	-	4

3.2 Modellazione CFD

In questa sezione verranno analizzati e presentati nel dettaglio i cinque passaggi riassunti in Figura 3.1 che sono stati seguiti per la valutazione dei singoli scenari incidentali.

3.2.1 Geometria

Il primo *step* di simulazione consiste nella generazione della geometria. Questa operazione è stata fatta sfruttando il programma *ANSYS® Design Modeler*.

Le dimensioni del dominio e lunghezza dell'ugello sono state scelte in accordo con il lavoro svolto in un precedente lavoro di tesi [7], la cui geometria viene definita seguendo la teoria di Frank [44], che previene qualsiasi influenza relativa alle dimensioni del dominio con il getto a pressione studiato. La teoria di Frank considera che una buona scelta per le diverse lunghezze caratteristiche del dominio dipenda da un valore moltiplicativo e dall'altezza massima dell'ostacolo che viene simulato nel caso predisposto. L'altezza massima equivale a quella del serbatoio verticale di $H_{max} = 7m$, quindi le dimensioni del domino sono quelle descritte in Tabella 3.3 e rappresentate in Figura 3.2:

Tabella 3.3 - Dimensioni caratteristiche del dominio di calcolo.

	Lunghezza L [m]	Altezza H [m]	Larghezza W [m]	Lunghezza ugello L_u [m]
Lunghezza secondo Frank	$15 \cdot H_{max}$	$5 \cdot H_{max}$	$4,6 \cdot H_{max}$	$1 \cdot H_{max}$
Dimensioni del dominio	105	35	32,2	7

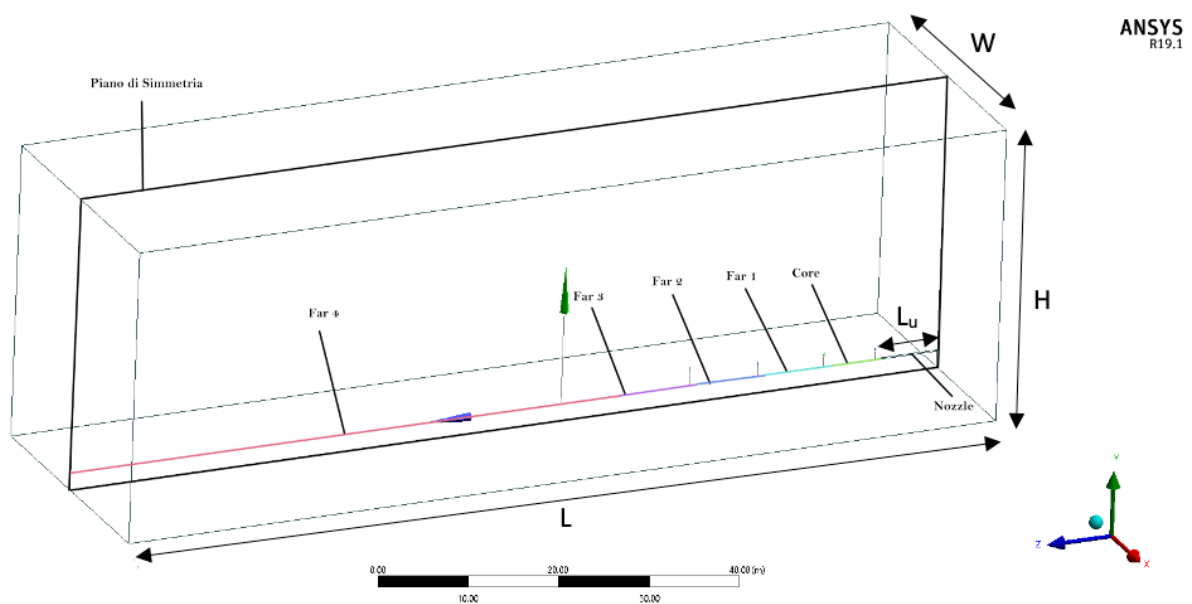


Figura 3.2 - Geometria del dominio vista in ANSYS® Design Modeler.

Come mostrato in Figura 3.2, sulla linea assiale del getto, tra il punto di rilascio e la fine del dominio, sono state costruite cinque *Body Lines* chiamate rispettivamente *Core*, *Far 1*, *Far 2*, *Far 3* e *Far 4*, che verranno utilizzate in seguito per la generazione della *mesh* poligonale necessaria per portare a termine la simulazione.

Le dimensioni dei serbatoi verticali sono state reperite dal catalogo dei serbatoi della società Linde® [7, 45], le cui dimensioni sono rappresentate in Figura 3.3. Si è poi ruotata la geometria per generare un nuovo set di cilindri orizzontali, rappresentato in Figura 3.4.

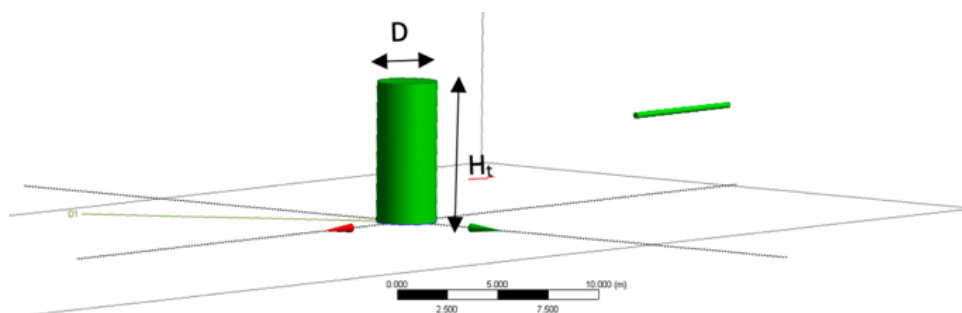


Figura 3.3 - Geometria del serbatoio verticale costruita con ANSYS® Design Modeler: $D = 2m, H_t = 7m$.

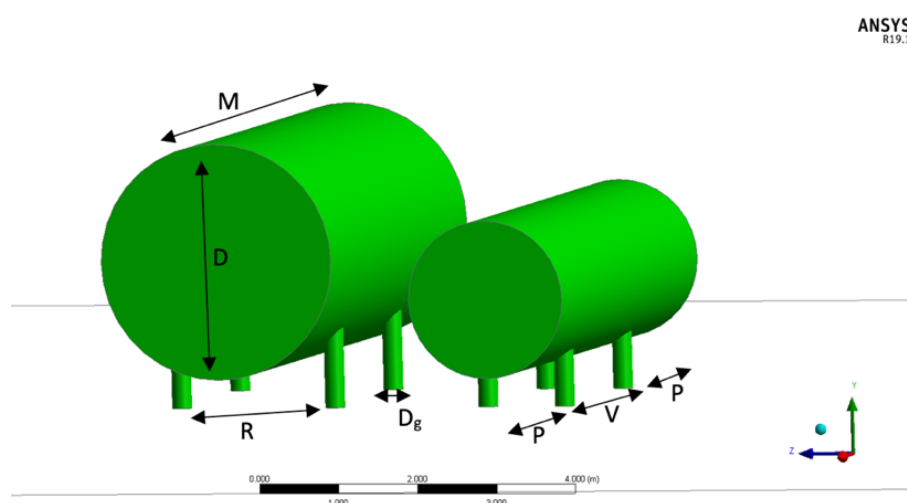


Figura 3.4 - Geometria dei serbatoi orizzontali costruita con ANSYS® Design Modeler: altezza da terra = 0,5m, $M = 7m$.

Per quanto riguarda i cilindri orizzontali, in funzione del diametro D sono state definite le caratteristiche delle gambe di supporto, come riassunto in Tabella 3.4:

Tabella 3.4 - Dimensioni caratteristiche delle gambe dei serbatoi al variare del diametro D .

D [m]	D_g [m]	R [m]	P [m]	V [m]
2	0,25	1	2	3
3	0,25	2	2	3

In tutte le simulazioni il primo ostacolo è stato posto alla metà della distanza raggiunta dal getto libero a parità di condizioni operative, dunque a parità di set. Infine, essendo la geometria simmetrica rispetto all'asse del rilascio, è possibile alleggerire il processo di calcolo attraverso l'impostazione *Symmetry*. Questo metodo consente di simulare solamente metà del dominio.

3.2.2 Mesh

Grazie alle *body lines* precedentemente costruite mediante ANSYS® *Design Modeler*, è possibile elaborare una griglia di calcolo adatta per descrivere i gradienti di velocità e concentrazione. Questa operazione viene effettuata nel secondo passaggio di simulazione attraverso il programma ANSYS® *Meshing*. Le dimensioni delle celle che compongono la griglia di calcolo sono state fatte variare a seconda della precisione con la quale si vogliono studiare i gradienti di velocità e di concentrazione. Di conseguenza, per limitare il consumo di risorse computazionali, la *mesh* è più fitta nella zona in prossimità dell'ugello mentre, con l'allontanarsi da esso, le dimensioni delle celle aumentano con un tasso di crescita ben definito lungo l'asse del getto. In analogia con i lavori precedenti, anche per questo lavoro si è scelto di lavorare con una griglia non strutturata e celle di forma tetraedrica. I dati usati per poter definire la lunghezza delle *body lines*, le dimensioni delle celle ed il tasso di crescita sono stati ereditati dal lavoro [7] e riassunti in Tabella 3.5:

Tabella 3.5 - Parametri caratteristici della *mesh*.

	Lunghezza [m]	Dimensione celle [m]	Tasso di crescita [-]
Superficie laterale dell'ugello	-	0,030	1,200
Superficie di rilascio	-	0,015	1,200
Core	6	0,015	1,075
Far 1	8	0,022	1,100
Far 2	8	0,030	1,150
Far 3	10	0,090	1,175
Far 4	66	0,180	1,200
Superficie degli ostacoli	-	0,015	1,200

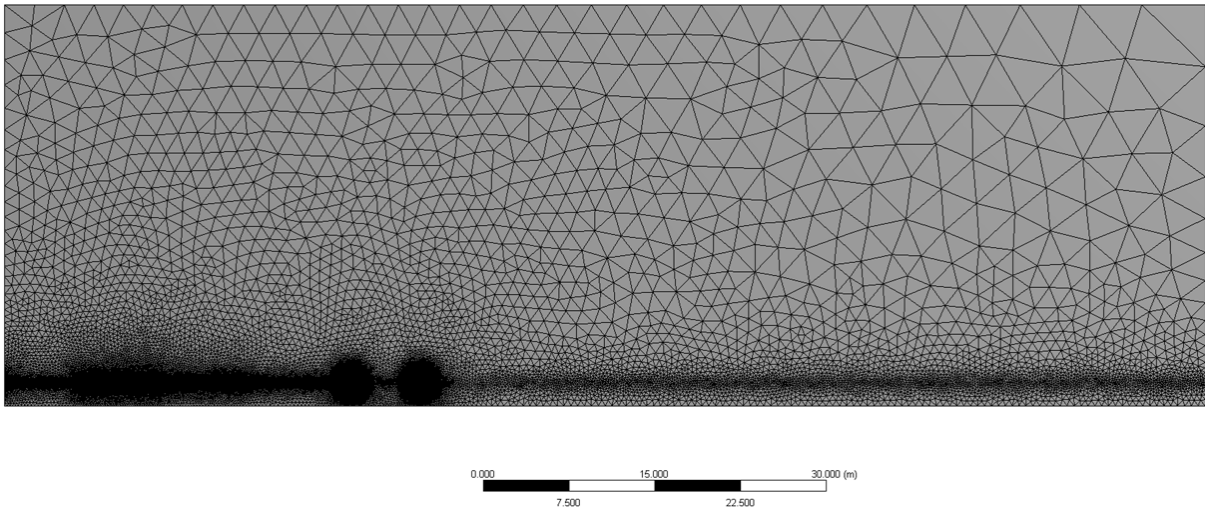


Figura 3.5 - Grigliatura con ANSYS® Meshing vista dal piano di simmetria. I parametri utilizzati per la sua generazione sono quelli riassunti in Tabella 3.4.

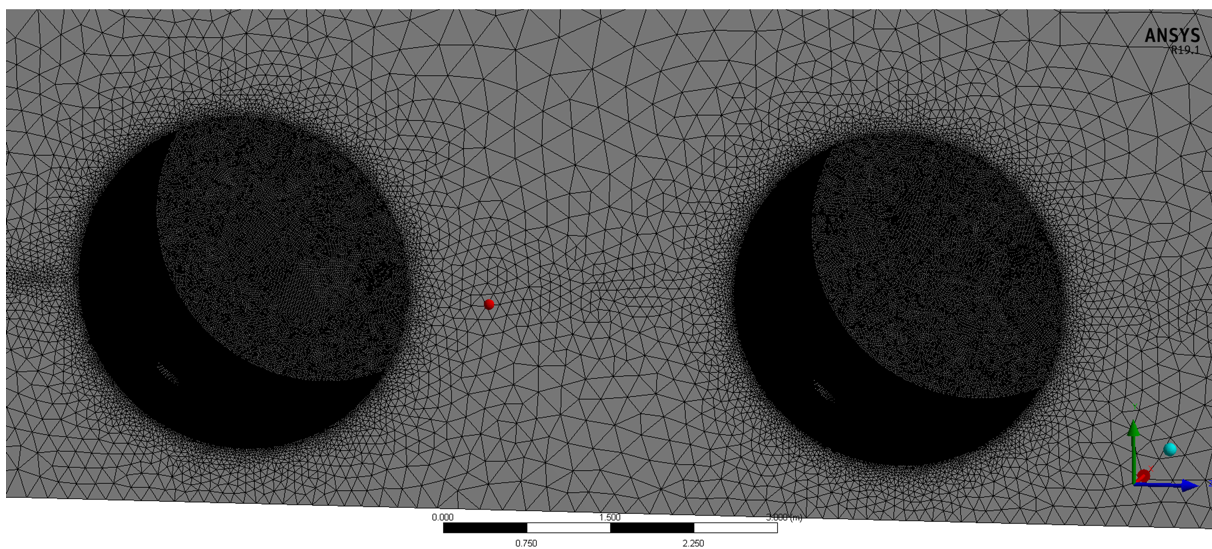


Figura 3.6 - Particolare della grigliatura dei serbatoi in Figura 3.5.

I risultati della grigliatura sono mostrati in Figura 3.5 e in Figura 3.6. Il processo di generazione della *mesh* si conclude mediante la generazione di un *Body of Influence* a partire da ogni *Body Line* e di un *Face Sizing* che definisce la dimensione delle celle attorno alla superficie di un elemento solido.

3.2.3 Setup

Per poter arrivare alla soluzione del sistema impostato, è necessario definire:

- condizioni al contorno di ogni superficie presente nel dominio;
- impostazioni del risolutore.

In Figura 3.7 viene mostrata la suddivisione delle superfici per poter specificare le condizioni al contorno. Queste ultime sono state riassunte in Tabella 3.6 e rimangono costanti per tutte le simulazioni, ad eccezione della portata massica che varia secondo quanto riportato in Tabella 3.1.

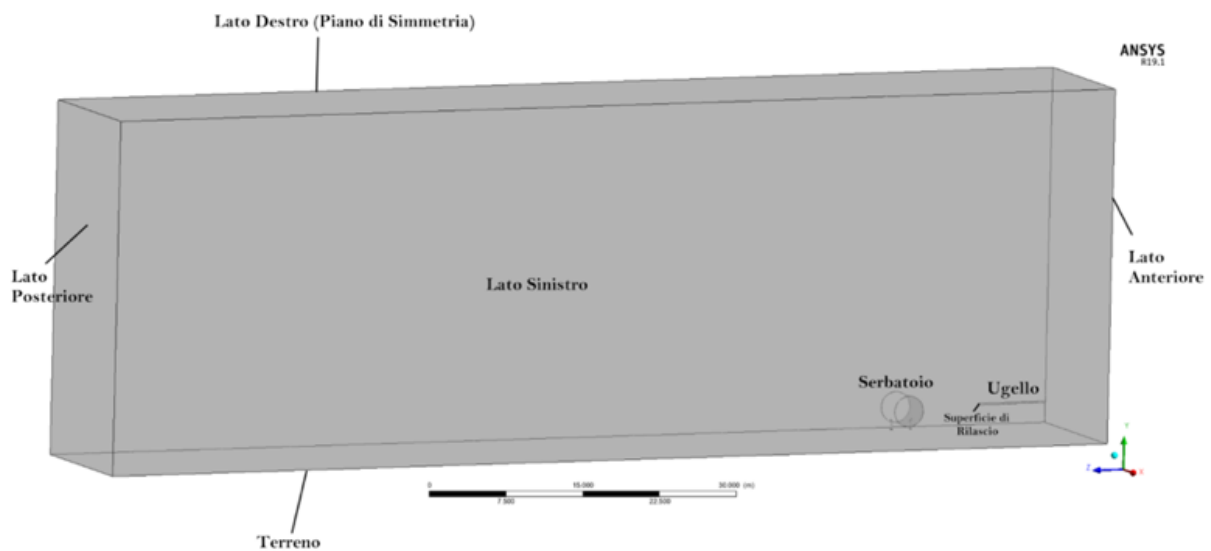


Figura 3.7 - Superfici che costituiscono il dominio di calcolo.

Tabella 3.6 - Condizioni al contorno inserite all'interno del programma ANSYS® CFX-Pre.

Ingresso vento	Velocità	Temperatura statica
Lato Anteriore	$V_x = 0$ [m/s] $V_y = 0$ [m/s] $V_z =$ Profilo di velocità	$T = 300$ [K]
Lato Sinistro	$V_x = 1E-09$ [m/s] $V_y = 0$ [m/s] $V_z =$ Profilo di velocità	$T = 300$ [K]
Cielo	$V_x = 0$ [m/s] $V_y = 0$ [m/s] $V_z =$ Profilo di velocità	$T = 300$ [K]

Ingresso metano	Portata massica	Temperatura totale
Superficie di Rilascio	Tabella 3.1	T= 344.11 [K]
Uscita vento	Pressione relativa	Mediazione pressione
Lato Posteriore	$P_{rel}= 0$ [Pa]	Tutta la superficie di uscita
Pareti	Condizione al contorno	Scabrezza
Terreno	No slip condition	0.01 [m]
Ugello	No slip condition	Smooth wall
Serbatoi	No slip condition	0.001 [m]
Altre impostazioni		
Lato Destro	Symmetry	

La velocità lungo l'asse Z è definita attraverso un profilo di velocità che cresce con l'altezza mediante una legge di potenza, rappresentata in Figura 3.8. La seguente equazione descrive il profilo di velocità partendo dal terreno:

$$v(z) = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{\beta} \quad (3.1)$$

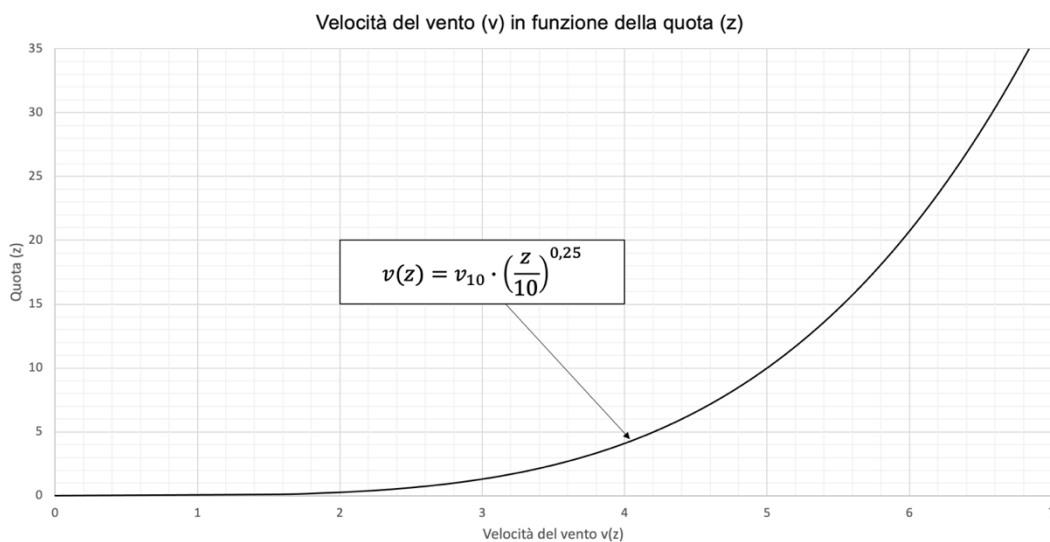


Figura 3.8 - Profilo di velocità del vento. $v_{10} = 10$ m/s è la velocità del vento misurata a 10m e $\beta = 0,25$ è un fattore esponenziale che tiene conto della stabilità atmosferica e della natura del suolo [4].

Il fattore β è stato scelto usando la classificazione atmosferica di Pasquill [46] riportata in Tabella 3.7. Si è scelto il valore che descrive un ambiente con stabilità atmosferica di classe D, con un terreno di tipo urbano.

Tabella 3.7 - Valori dell'esponente β in funzione della classe di stabilità atmosferica di Pasquill.

Categoria	Condizioni dell'atmosfera	Terreno urbano	Terreno rurale
A	Estremamente instabile	0,15	0,07
B	Moderatamente instabile	0,15	0,07
C	Poco instabile	0,20	0,10
D	Neutra	0,25	0,15
E	Poco stabile	0,30	0,35
F	Moderatamente stabile	0,30	0,55

In Tabella 3.8, invece, sono indicate le impostazioni del risolutore CFX. Esse indicano il metodo di discretizzazione con il quale le equazioni vengono risolte, includendo modelli di turbolenza e di trasferimento di calore.

Tabella 3.8 - Impostazioni del risolutore ANSYS® CFX-Pre.

Parametro	Impostazione del risolutore
Modello di turbolenza	Shear Stress Transport (k- ω SST)
Modello di trasferimento di calore	Total Energy
Forza di gravità	-9,81 m/s ² lungo l'asse y
Densità atmosferica	1,225 kg/m ³
Pressione atmosferica	101325 Pa
Turbolence numerics	High Resolution
Physical Timescale	0,1 s
Criterio di convergenza	RSM = 0,000001

3.2.4 Soluzione

Nella fase di risoluzione, per ogni cella del dominio il solutore risolve le equazioni di conservazione. Per valutare la bontà della simulazione ci si è affidati a due parametri:

- *momentum and mass;*
- *imbalance.*

L'andamento del primo parametro permette di valutare quando il gradiente degli sforzi di Reynolds (RMS) per massa e momento si annulla. Una simulazione si considera andata a buon fine quando per ogni parametro tale valore è inferiore a 10^{-4} .

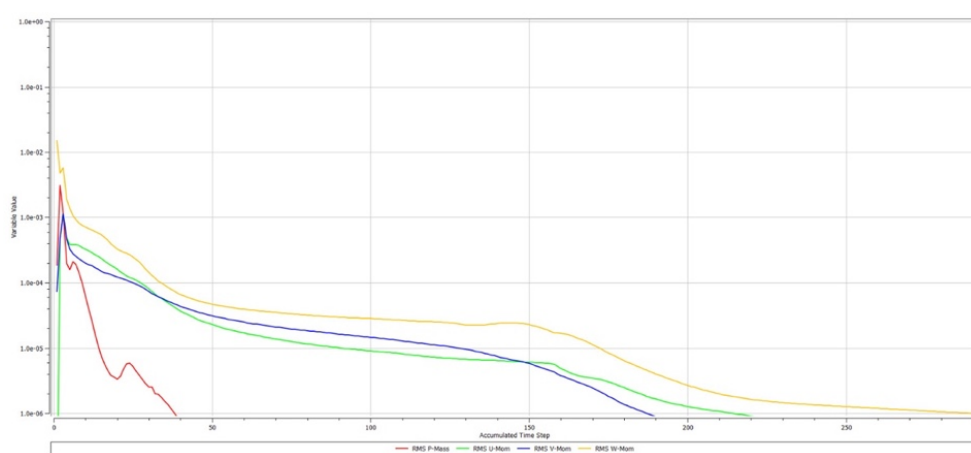


Figura 3.9 - Andamento del gradiente degli sforzi di Reynold in ANSYS® CFX-Solver.

L'andamento del secondo parametro, invece, permette di valutare la convergenza della soluzione. Una simulazione si considera andata a buon fine quando per ogni parametro tale valore è pari a zero e le funzioni non presentano un andamento oscillatorio.

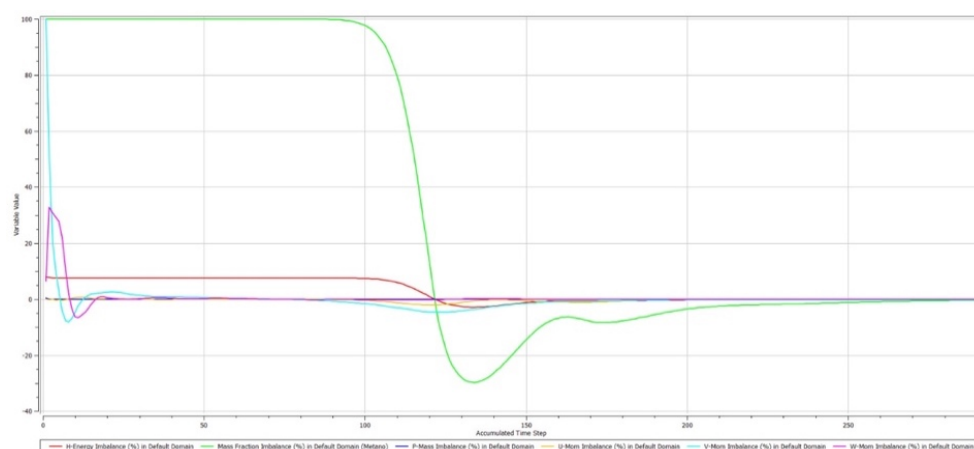


Figura 3.10 - Andamento dell'imbalance in ANSYS® CFX-Solver.

3.2.5 Risultati

Per quanto riguarda la valutazione dei risultati ottenuti, ci si è basati principalmente su due parametri:

- estensione del limite inferiore di infiammabilità;
- generazione di vortici.

Il primo parametro serve a valutare l'estensione del getto infiammabile e l'interazione con gli ostacoli e con il terreno. Per fare ciò si è scelto di visualizzare la superficie isoconcentrazione corrispondente all'LFL, come mostrato in Figura 3.11:

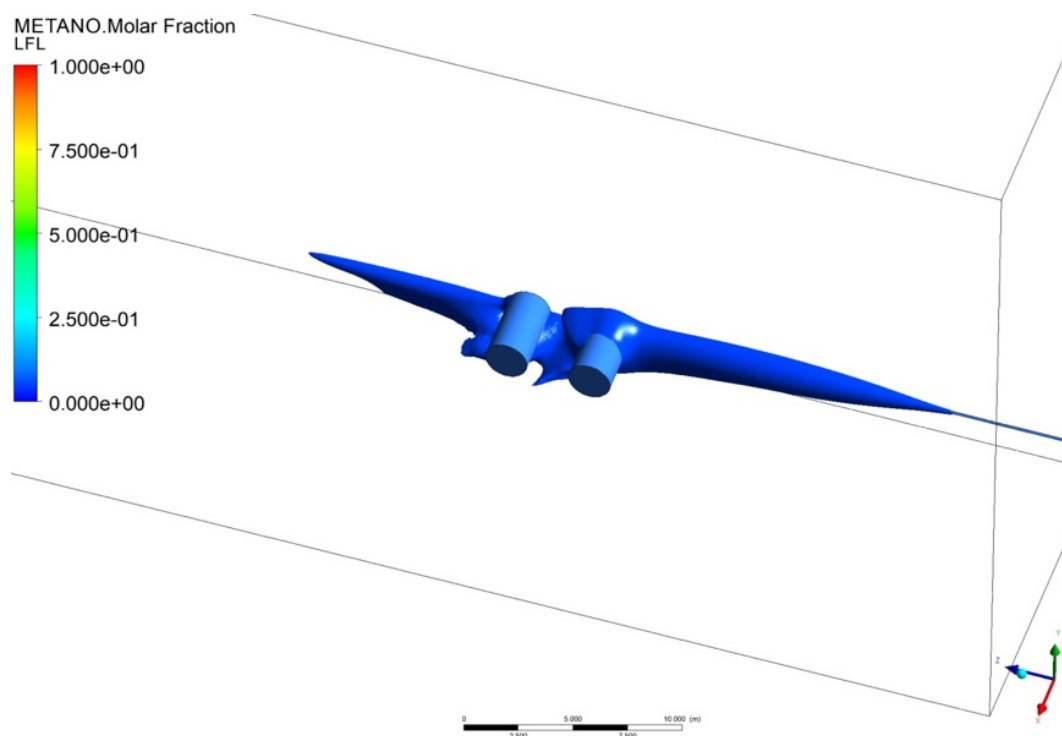


Figura 3.11 - Rappresentazione dell'LFL di un getto in ANSYS® CFD-Post.

La valutazione della presenza o meno di vortici, invece, serve a valutare l'influenza di un generico ostacolo: infatti, la generazione di vortici a valle dell'ostacolo crea dei rimescolamenti che modificano il profilo dell'LFL, diluendo la miscela (Figura 3.12).

Viceversa, l'assenza di vortici indica che l'influenza dell'ostacolo sul moto del getto è modesta, se non addirittura assente.

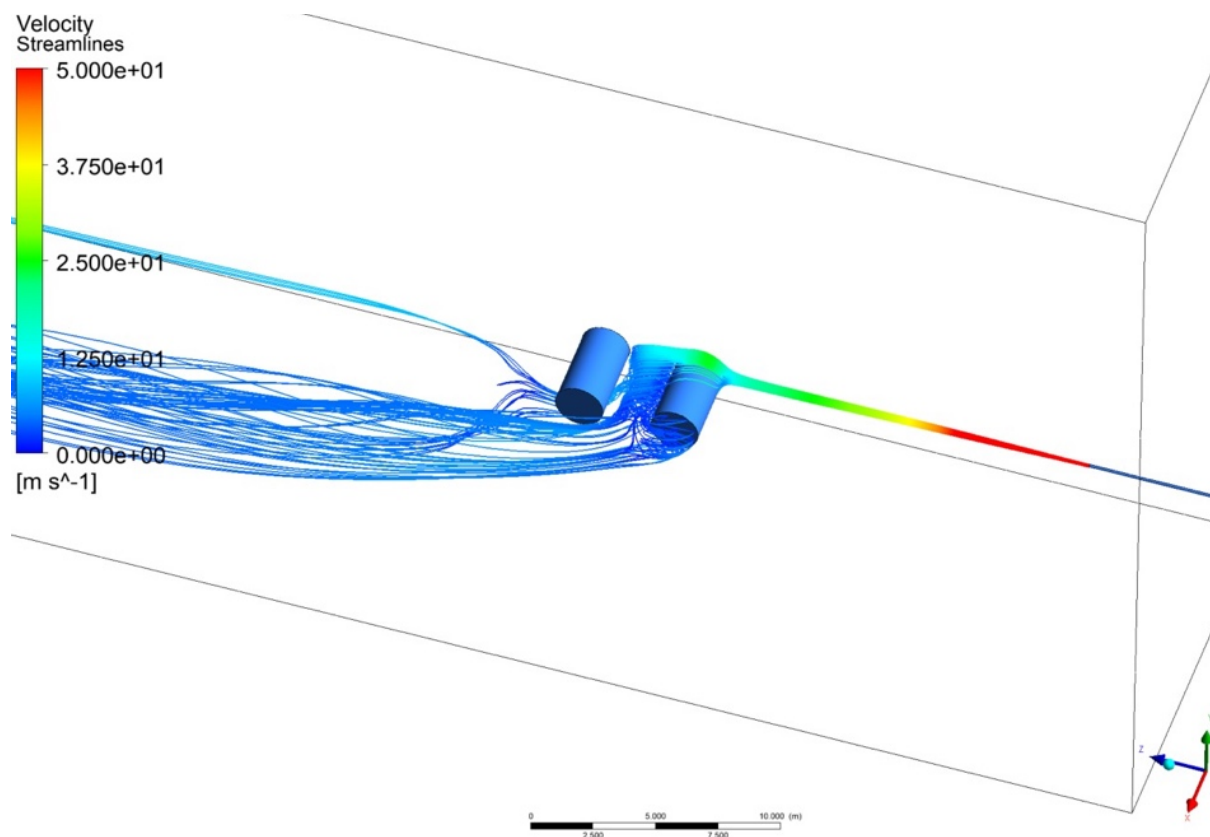


Figura 3.12 - Rappresentazione delle *streamline* di un getto in ANSYS® CFD-Post.

3.3 Assunzioni e considerazioni fondamentali

Poiché questo lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto più ampio già avviato, alla base di questo lavoro sono state poste delle analisi preliminari svolte da altri autori sulla bontà del metodo utilizzato, in particolare:

- indipendenza dalla simmetria;
- indipendenza dalla mesh.

3.3.1 Indipendenza dalla simmetria

La possibilità di tagliare il dominio in verticale attraverso un piano di simmetria permette di ridurre del 50% il numero di celle coinvolte nelle operazioni di calcolo, consentendo un notevole abbassamento degli oneri computazionali. Per verificare se sia possibile condurre questa operazione, in [7] sono state condotte delle prove dalle quali è emerso che la forma e l'estensione del getto è invariante rispetto all'asse di rilascio e pertanto lavorare in simmetria non introduce delle modifiche della rappresentazione dei risultati (Figura 3.13).

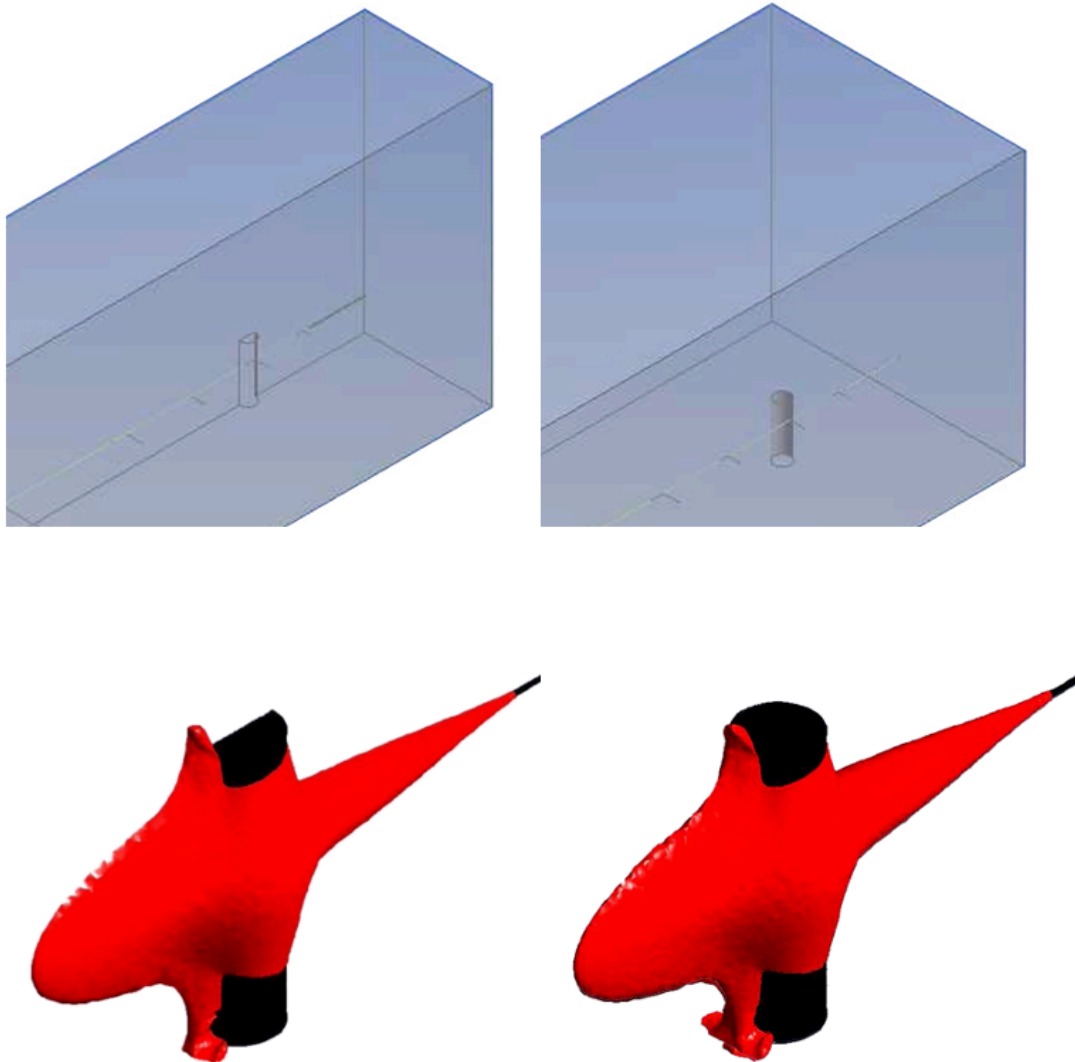


Figura 3.13 - Convalida dell'indipendenza dalla simmetria in ANSYS® CFD-Post [7].

3.3.2 Indipendenza dalla griglia di calcolo

Le simulazioni CFD vengono eseguite attraverso la discretizzazione del dominio in celle di calcolo; quindi, è molto importante avere risultati che non siano influenzati dalla dimensione delle celle utilizzate. Questa condizione è chiamata indipendenza della griglia ed è raggiunta attraverso la cosiddetta analisi di sensitività della *mesh*. Scelta una certa dimensione della *mesh*, è stata fatta poi variare di un fattore $\pm 20\%$. I risultati delle simulazioni possono dirsi invarianti rispetto alla *mesh* se per ogni caso

la forma e l'estensione del getto rimangono costanti indipendentemente dalla grandezza delle celle utilizzate (Figura 3.14).

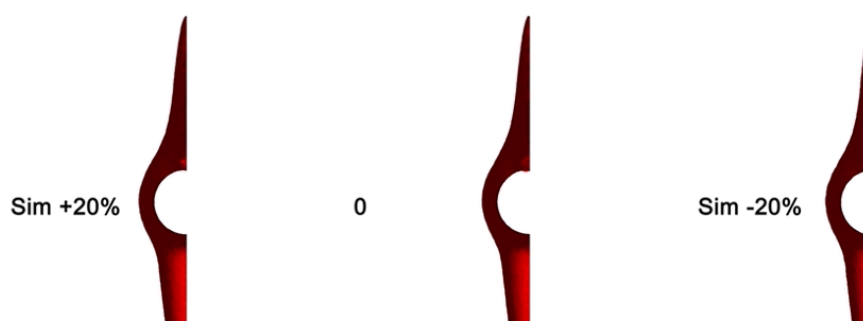


Figura 3.14 - Convalida dell'indipendenza dalla *mesh* in ANSYS® CFD-Post [7].

3.4 Definizione degli scenari incidentali

Come precedentemente descritto, in questo lavoro ci si è focalizzati su ostacoli cilindrici orizzontali e verticali, svolgendo diverse simulazioni al variare del diametro e della distanza tra gli ostacoli, oltre alle caratteristiche del rilascio.

3.4.1 Cilindri verticali

In analogia con la tesi precedente [33] sono stati definiti 35 casi riassunti in Tabella 3.9; la distanza relativa tra i serbatoi è stata definita in accordo con uno studio precedente [35], saltando la condizione s/D pari a 1,5 (Figura 1.11) perché non realistica in un layout di impianto:

Tabella 3.9 - Dettagli delle simulazioni effettuate: D = diametro ostacolo, s/D = distanza relativa ostacoli.

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
	5	2	5	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
	5	3	5	Set 1

c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
	5	2	5	Set 2
d	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
	5	2	5	Set 3
e	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3
	5	3	5	Set 3

3.4.2 Cilindri orizzontali

Per i cilindri orizzontali si sono effettuate le 42 simulazioni riassunte in Tabella 3.10:

Tabella 3.10 - Dettagli delle simulazioni effettuate: D = diametro ostacolo, s/D = distanza relativa ostacoli.

Case	Ref	D [m]	s/D [-]	Release set
a	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	2	0	Set 1
	1	2	2	Set 1
	2	2	2,5	Set 1
	3	2	3	Set 1
	4	2	4	Set 1
	5	2	5	Set 1
b	FJ	n.a.	n.a.	Set 1
	0	3	0	Set 1
	1	3	2	Set 1
	2	3	2,5	Set 1
	3	3	3	Set 1
	4	3	4	Set 1
	5	3	5	Set 1
c	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	2	0	Set 2
	1	2	2	Set 2
	2	2	2,5	Set 2
	3	2	3	Set 2
	4	2	4	Set 2
	5	2	5	Set 2

	FJ	n.a.	n.a.	Set 2
	0	3	0	Set 2
	1	3	2	Set 2
d	2	3	2,5	Set 2
	3	3	3	Set 2
	4	3	4	Set 2
	5	3	5	Set 2
	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	2	0	Set 3
	1	2	2	Set 3
e	2	2	2,5	Set 3
	3	2	3	Set 3
	4	2	4	Set 3
	5	2	5	Set 3
	FJ	n.a.	n.a.	Set 3
	0	3	0	Set 3
	1	3	2	Set 3
f	2	3	2,5	Set 3
	3	3	3	Set 3
	4	3	4	Set 3
	5	3	5	Set 3

3.5 Casi di confronto

Per poter generalizzare i risultati ottenuti ed estenderli anche ad altri possibili casi che non sono stati simulati, occorre adimensionalizzarli dividendo ogni valore ottenuto per un caso di riferimento.

In base a ciò che si vuole mettere in risalto, sono stati individuati due casi di confronto:

- getto libero;
- getto contro un ostacolo singolo.

3.5.1 Confronto con getto libero

Il getto libero è la simulazione più semplice che si possa svolgere per questo caso, grazie al suo basso costo computazionale e al limitato numero di interazioni tra il getto e l'ambiente. In questo scenario si ipotizza la mancanza di ostacoli come serbatoi che possano avere effetti sull'estensione massima del getto stesso. L'unica interazione significativa che può verificarsi è quella tra il getto ed il terreno: è possibile definire un'altezza minima alla quale deve essere posizionato l'ugello per poter assicurare che il getto non impatti con il terreno e non soffra gli effetti di trascinamento.

Il modello CFD è stato impostato come descritto in Sezione 3.2 ricordando che i serbatoi devo essere esclusi. Questo processo è stato ripetuto per ogni *set* descritto in Tabella 3.1 alle diverse altezze degli ugelli descritti in Tabella 3.2.

3.5.2 Confronto con ostacolo singolo

In alcuni casi, per verificare se il secondo ostacolo abbia un effetto significativo o se invece è solo il primo ostacolo a modificare la forma e l'estensione del getto, è utile confrontarsi per l'appunto con il caso di ostacolo singolo.

In questo caso, il modello CFD è stato impostato come descritto in Sezione 3.2 ponendo la distanza relativa tra i due ostacoli pari a zero. In questo modo i due ostacoli, aventi geometria identica, degenerano in un unico ostacolo. Questo processo è stato ripetuto per ogni set descritto in Tabella 3.1 alle diverse altezze degli ugelli descritti in Tabella 3.2.

3.6 Analisi dell'influenza del terreno

Come già anticipato in Sezione 1.4, uno degli aspetti fondamentali che hanno un notevole effetto sul modo in cui il getto si sviluppa è proprio l'interazione potenziale con il terreno. Questo fenomeno, ampiamente studiato nel lavoro di Colombini [21], conferma che la lunghezza dell'estensione massima del getto cresce all'aumentare dell'interazione con il terreno, il cui effetto dipenderà dal tipo di sostanza simulata, dall'altezza del punto di rilascio e dal diametro equivalente secondo Birch, già trattato in Sezione 2.2. Per i rilasci di metano è possibile prevedere l'interazione del getto libero con il terreno attraverso l'Equazione 1.5, come riportato in Figura 3.15.

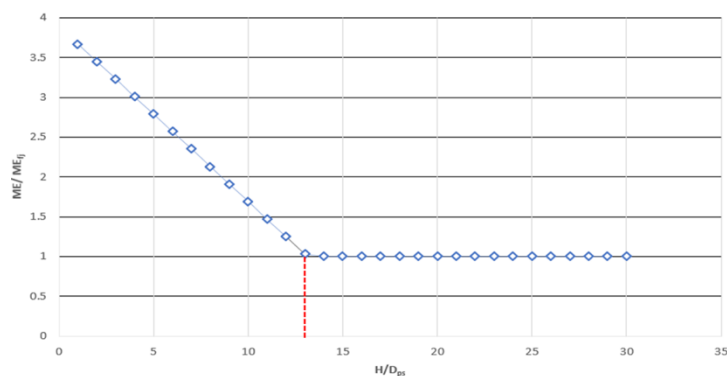


Figura 3.15 - Interpolazione dei punti del ME adimensionalizzato rispetto all'altezza del punto di rilascio, adimensionalizzata a sua volta rispetto al diametro del foro: H è l'altezza alla quale viene messo il punto di rilascio, mentre D_{ps} è il diametro equivalente misurato usando l'approccio di Birch.

In Figura 3.15 si può apprezzare l'andamento dell'Equazione 1.5 al variare del rapporto tra l'altezza del punto di rilascio ed il diametro equivalente. Tale rapporto permette di definire una soglia di significatività per l'influenza del terreno su ME del getto, trovando un valore critico pari a $H/D_{ps} = 13$, come indicato dalla linea rossa. Oltre questo valore il getto libero non interagisce con il terreno.

3.6.1 Influenza del terreno sull'estensione massima del getto

In questo lavoro di tesi si è voluto analizzare come l'influenza del terreno possa far variare l'estensione massima raggiunta dal getto, con l'obiettivo di distinguere se l'allungamento o accorciamento del getto sia dovuto all'effetto del terreno o all'interazione con l'ostacolo studiato. Per fare ciò, si sono tenute in considerazione le variazioni del diametro equivalente per ogni set e l'altezza del punto di rilascio di ogni caso, che varia a seconda dell'orientamento dell'ostacolo e del diametro dei serbatoi studiati, come precedentemente riassunto in Tabella 3.2. Per ogni simulazione, il ME è stato adimensionalizzato dividendolo per il ME dei getti liberi che non interagiscono con il terreno, in modo tale da ricavare un andamento simile a quello visto in Figura 3.15.

Tenendo conto del valore critico dell'influenza del terreno dato dall'Equazione 1.5 è stato possibile definire un'altezza critica relativa ad ogni set studiato (Sezione 3.5.1). I valori sono riportati in Tabella 3.11.

Tabella 3.11 - Altezze critiche al variare delle caratteristiche del rilascio.

	Altezza critica H_c [m]
Set 1	1,920
Set 2	2,678
Set 3	3,796

Se l'altezza del punto di rilascio è minore all'altezza critica il getto libero simulato entra in contatto con il terreno; viceversa se il punto di rilascio è superiore all'altezza critica, allora il terreno non ha alcuna influenza sul getto libero. Come si può intuire dai valori riportati in Tabella 3.11, quando questi vengono confrontati con le altezze di rilascio (Tabella 3.2) si nota che in tutti i casi che coinvolgono ostacoli verticali non si hanno getti liberi che interagiscono con il terreno, mentre i casi che coinvolgono ostacoli orizzontali, ad eccezione del *caso b*, prevedono getti liberi che interagiscono con il terreno.

3.6.2 Casi con ostacolo singolo

Come primo passo per analizzare l'effetto del terreno ci si è concentrati su scenari che prevedono la presenza di un singolo ostacolo, sia per i casi orizzontali che per i casi verticali, e su come questa possa avere un effetto sull'estensione massima del getto libero (Figura 3.16).

Inoltre, all'interno dei casi con serbatoi orizzontali si è scelto di fare una distinzione in funzione del tipo di getto libero utilizzato per adimensionare la massima estensione del getto:

- getto libero senza influenza del terreno (misurati ad un'altezza di rilascio di 4m, quindi maggiore dell'altezza critica per tutti i tre set.);
- getto libero con influenza del terreno (misurati ad un'altezza di rilascio rispettivamente di 1,5m e 2m, pari a quella di set e minore della rispettiva altezza critica).

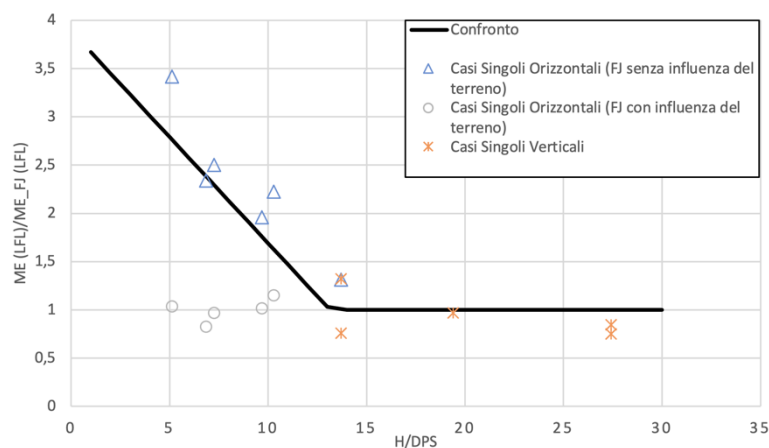


Figura 3.16 - Posizione del ME adimensionalizzato in funzione dell'altezza del punto di rilascio adimensionalizzata rispetto al diametro del foro per i casi con ostacolo singolo orizzontali e verticali.

Influenza del terreno su ostacoli singoli: casi con serbatoio orizzontale

I risultati ottenuti dall'analisi sono riportati in Figura 3.16: tutti i casi orizzontali ad eccezione di uno, il *caso b*, sono presenti nella parte sinistra del grafico indipendentemente dal getto libero utilizzato, prima del valore critico $H/D_{ps} = 13$. Come menzionato in precedenza, ciò significa che l'influenza del terreno ha avuto un effetto fondamentale sull'estensione massima del getto.

È importante notare che nei casi in cui la massima estensione del getto viene confrontata con il getto libero che non risente della presenza del terreno, è confermato l'andamento imposto dall'Equazione 1.5 e indicati in Figura 3.16 dalle

croci blu. Viceversa, se la massima estensione del getto viene confrontata con il getto influenzato dalla presenza del terreno (ME_{EJW}) i valori di ME/ME_{EJW} sono circa unitari con variazioni massime del 15% (vedi Tabella 3.12 e cerchi grigi in Figura 3.16). a titolo di esempio si veda Figura 3.17:

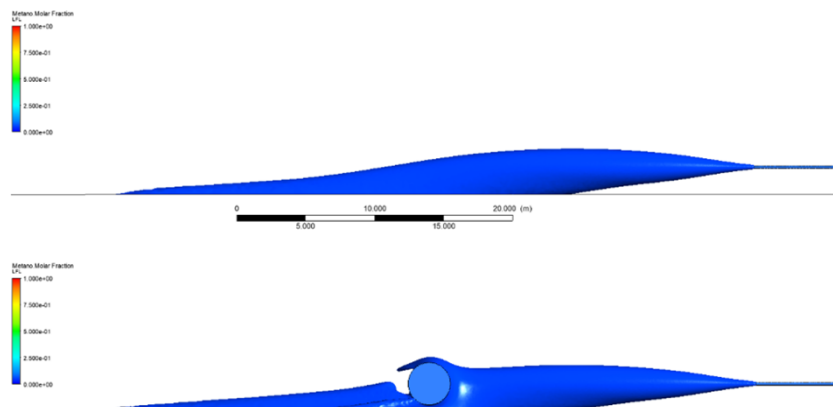


Figura 3.17 - Confronto tra getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale. Diametro serbatoio 3m, set di rilascio 2.

Nella maggior parte dei casi si verifica un incremento della massima estensione del getto all'impatto con l'ostacolo, come mostrato in Tabella 3.12:

Tabella 3.12 - Risultati del rapporto ME/ME_{EJW} del singolo ostacolo orizzontale.

Casi orizzontali con ostacolo singolo	ME/ME_{EJW} [-]
Caso a	1,15
Caso c	0,97
Caso d	1,01
Caso e	1,06
Caso f	0,82

La variazione dell'estensione massima del getto è dovuta fondamentalmente a due contributi, schematizzati in Figura 3.18 e analizzati più nel dettaglio nelle sezioni successive:

- diluizione del getto (Focus 1);
- distacco dal terreno (Focus 2).

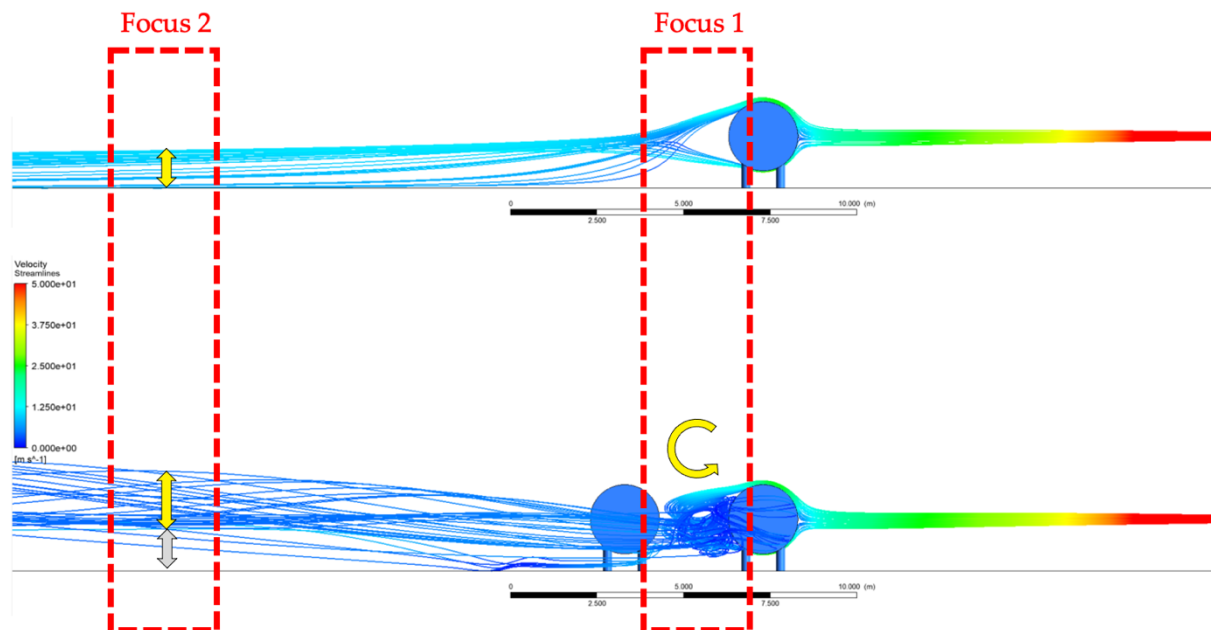


Figura 3.18 - Andamento delle linee di velocità del getto infiammabile in funzione del rapporto s/D con enfasi sui punti critici.

Per quanto riguarda l'effetto di diluizione del getto, quando esso impatta contro il primo ostacolo in presenza del secondo, a valle del primo serbatoio si genera una quantità considerevole di vortici (Focus 1) che ingabbiano il getto e lo diluiscono. In secondo luogo, una volta che il getto riesce a superare anche il secondo ostacolo, quest'ultimo ne provoca un distacco da terra (Focus 2) tale da affievolire il contributo di trascinamento del terreno, favorendo un ulteriore accorciamento della massima distanza raggiunta dal getto. Un'analisi più approfondita sulla diluizione dovuta all'aumento dei vortici viene svolta nelle sezioni successive.

In Tabella 3.12 si può notare che l'aumento della massima estensione si verifica per quattro casi su cinque, solo uno di essi va incontro a variazioni maggiori del 10% (*caso a*). Inoltre, in un caso si osserva una diminuzione della massima estensione del getto superiore al 10% (*caso f*). Un'analisi di dettaglio la merita anche il *caso b* che vede un aumento significativo della distanza di danno.

Infine, una variazione significativa è individuata solo in tre casi, che verranno esplorati nella seguente sezione. Dall'altra parte, il *caso c*, il *caso d* ed il *caso e* presentano variazioni del getto trascurabili. Da questa analisi è possibile concludere che la deformazione della massima estensione è dovuta in gran parte all'interazione con il terreno e in minor misura a quella con il primo ostacolo.

Peculiarità del *caso a* orizzontale

Il *caso a* orizzontale è un caso che evidenzia un allungamento del 15% rispetto al getto libero. Quest'ultimo è caratterizzato da un'altezza di rilascio pari a 1,5 m, inferiore all'altezza critica indicata in Tabella 3.11. L'allungamento iniziale del getto è dovuto interamente al terreno, tuttavia risulta evidente che l'allungamento successivo all'impatto con l'ostacolo è dovuto all'interazione tra l'ostacolo e il getto, come mostrato in Figura 3.19.

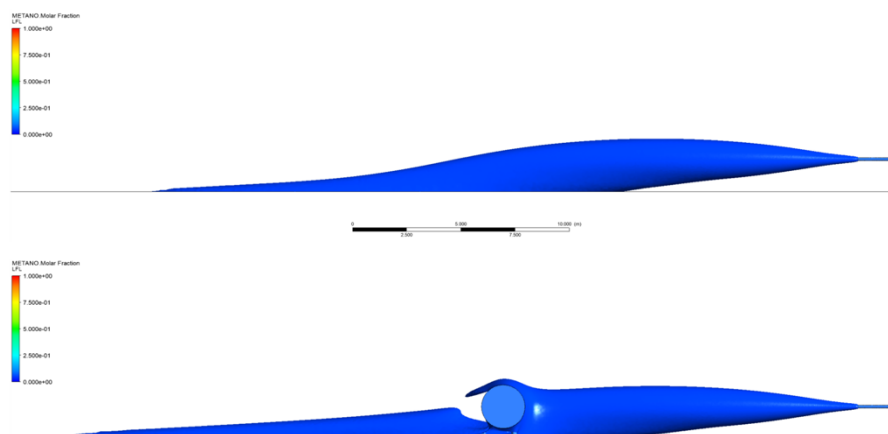


Figura 3.19 - Confronto tra getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale. Diametro serbatoio 3m, set di rilascio 1.

Si nota come il getto colpisce il serbatoio e viene abbattuto verso il terreno, che fa sì che gli effetti di allungamento si accentuino sul getto. Per la maggior parte il getto interagisce con la sezione inferiore del serbatoio, essendo deformato dalle sue gambe e forzato attraverso l'intercapedine tra serbatoio e terreno.

Peculiarità del *caso b* orizzontale

Il *caso b* è un caso anomalo in quanto è l'unico tra i casi orizzontali caratterizzato da un'altezza di rilascio superiore a quella critica (i.e., il getto libero non interagisce con il terreno, si veda Figura 3.20). In questo caso particolare si nota che l'estensione del getto in presenza di ostacolo è dovuta interamente all'interazione tra il getto e l'ostacolo, che devia verso terra il getto e permette la sua successiva interazione con il terreno. Ne consegue dunque un allungamento del getto molto più significativo.

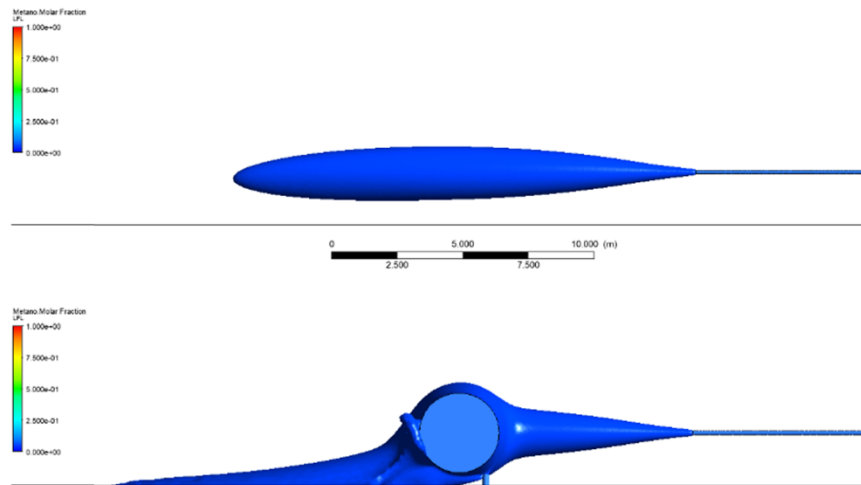


Figura 3.20 - Confronto tra getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale. Diametro serbatoio 3m, set di rilascio 1.

Peculiarità del caso *f* orizzontale

Il caso *f* orizzontale è un caso che evidenzia un accorciamento del 18% rispetto al getto libero. Quest'ultimo si trova ad un'altezza di rilascio inferiore all'altezza critica indicata in Tabella 3.11 per il Set 3.

L'allungamento iniziale del getto è dovuto interamente al terreno, tuttavia risulta evidente che l'accorciamento successivo all'impatto con l'ostacolo è dovuto all'interazione tra l'ostacolo e il getto, come mostrato in Figura 3.21.

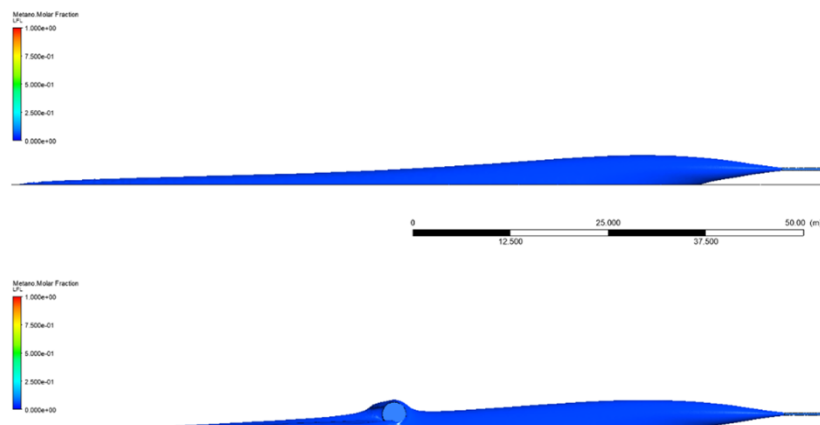


Figura 3.21 - Confronto tra getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale. Diametro serbatoio 3m, set di rilascio 3.

È evidente che l'impatto del getto con l'ostacolo comporta un aumento della turbolenza di quest'ultimo. Inoltre, una deviazione del getto verso la parte superiore

del serbatoio, al quale esso aderisce, limita il contatto con il terreno, diminuendo gli effetti che il terreno ha sull'allungamento del getto.

Influenza del terreno su ostacoli singoli: casi con serbatoio verticale

I risultati ottenuti dall'analisi sono riportati in Figura 3.16: tutti i casi verticali sono presenti nella parte destra del grafico indipendentemente dal getto libero utilizzato, oltre al valore critico $H/D_{ps} = 13$. Come per il *caso b* menzionato in precedenza, ciò significa che i getti liberi si trovano ad una quota sufficientemente elevata da non risentire dell'influenza del terreno.

Dai risultati riportati in Figura 3.28 si evince che per la maggior parte dei casi l'impatto con un ostacolo comporta un accorciamento del getto rispetto al getto libero.

L'unico caso in cui si verifica un allungamento del getto rispetto al getto libero è il *caso e*. Come mostrato in Figura 3.22, esso interagisce con l'ostacolo che, a sua volta, porta il getto ad abbassarsi e ad interagire con il terreno favorendo un allungamento del getto superiore al 30% rispetto al getto libero. Questo comportamento non si verifica in nessun altro caso.

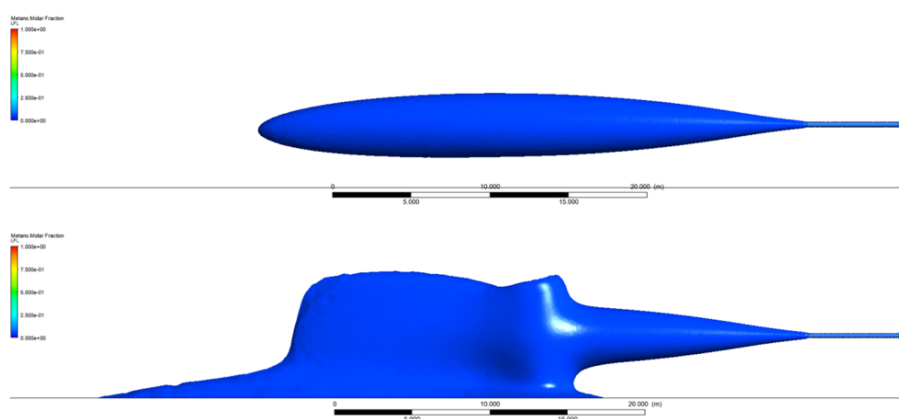


Figura 3.22 - Confronto tra getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale. Diametro serbatoio 2m, set di rilascio 3.

Si può dunque concludere che per i casi verticali singoli, l'influenza principale che altera l'estensione massima del getto libero è l'interazione dello stesso con l'ostacolo e non con il terreno, dato che nella maggior parte dei casi non è in grado di raggiungere il suolo. Nonostante ciò, qualora il getto riuscisse a superare l'ostacolo ed andare a contatto il terreno, come nel *caso e*, il getto tenderà ad allungarsi piuttosto che ad accorciarsi.

Per la maggior parte dei casi si verifica un decremento del ME del getto all'impattare l'ostacolo, come dimostrato in Tabella 3.13.

Tabella 3.13 - Risultati del rapporto ME/ME_{FJ} del singolo ostacolo verticale.

Casi orizzontali con ostacolo singolo	ME/ME_{FJ} [-]
Caso a	0,84
Caso b	0,74
Caso c	0,96
Caso d	0,75
Caso e	1,31

3.6.3 Casi con ostacoli in tandem

Il grafico in Figura 3.23 è stato costruito tenendo conto di tutti i dati delle massime estensioni che sono stati ricavati dalle prove descritte in Tabelle 3.9 e 3.10, considerando che l'adimensionalizzazione è stata svolta rispetto alla massima estensione del getto libero che non interagisce con il terreno.

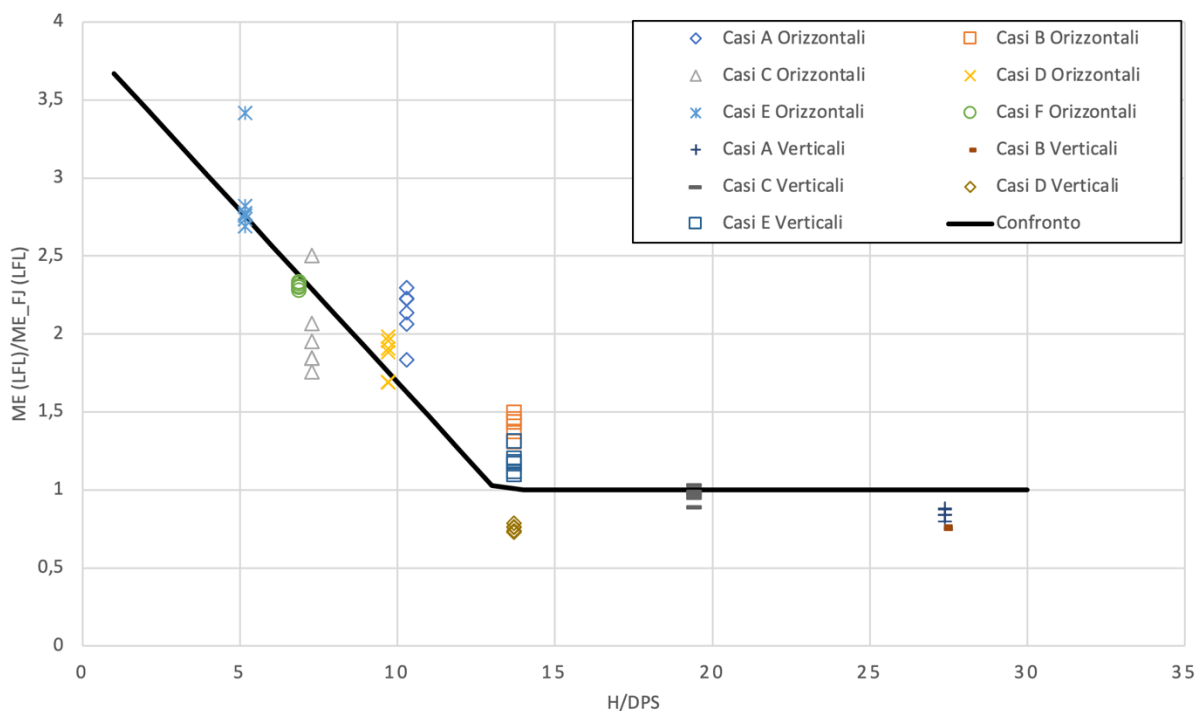


Figura 3.23 - posizione del ME adimensionalizzato in funzione dell'altezza del punto di rilascio adimensionalizzato rispetto al diametro del foro per i casi con coppie di ostacoli orizzontali e verticali.

Influenza del terreno su ostacoli in tandem: casi con serbatoi orizzontali

Un modo più semplice per vedere l'effetto del secondo ostacolo è tramite il grafico mostrato in Figura 3.24, il quale viene costruito adimensionalizzando le massime

estensioni dei getti rispetto a quelle dei rispettivi casi singoli. Quest'analisi viene fatta per verificare come varia la massima estensione del getto quando viene introdotto un secondo ostacolo. Ricordiamo che il rapporto s/D equivale alla distanza relativa tra i due serbatoi, ovvero il numero di diametri di distanza tra un serbatoio e il successivo.

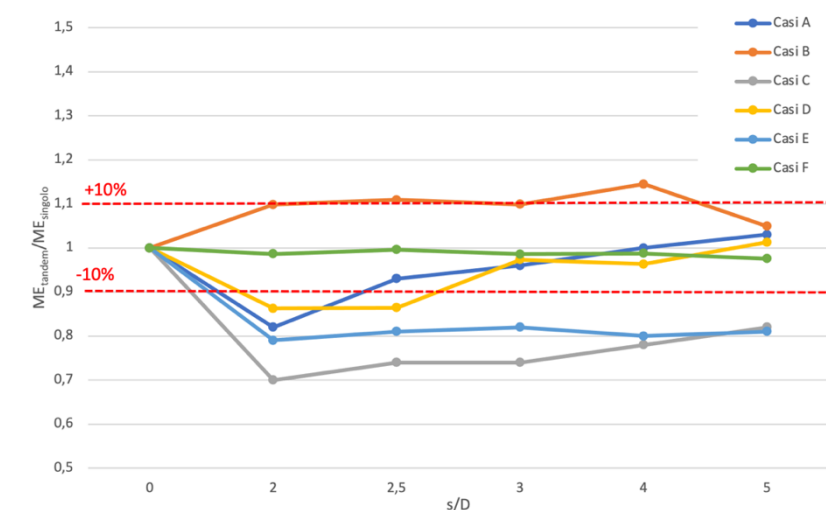


Figura 3.24 - Andamento della massima estensione dei getti dei casi aventi serbatoi orizzontali in tandem rispetto al rapporto delle distanze tra i serbatoi e i loro rispettivi diametri.

È possibile notare come nella maggior parte dei casi si verifichi un decrescimento della massima estensione del getto quando viene posizionato un secondo ostacolo a valle del primo (Figura 3.25).

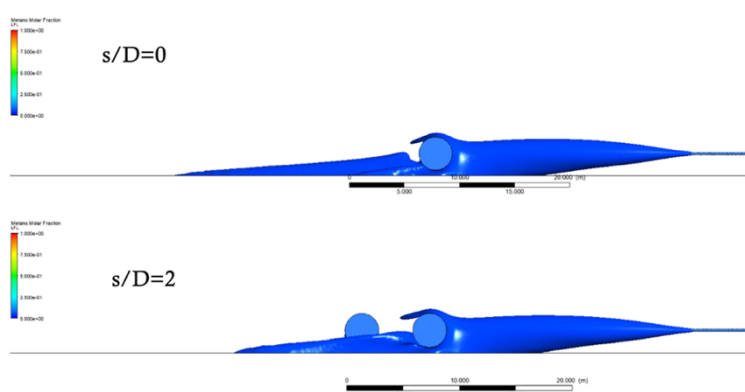


Figura 3.25 - Confronto tra getti che interagiscono con un solo ostacolo e con due ostacoli.

Si nota che il distacco del getto dal primo serbatoio, come mostrato in Figura 3.25, viene ritardato dalla presenza del secondo ostacolo e l'effetto del terreno è di

conseguenza attenuato. Per ognuna di queste simulazioni, la presenza del secondo ostacolo fa sì che l'andamento della variazione della massima estensione del getto vada a collassare in punti sempre più prossimi a quelli descritti dall'andamento dell'Equazione 1.5, come visto in Figura 3.15.

Ad una certa distanza tra il secondo ostacolo e il primo si verifica, per quasi tutti i casi, una decrescita della massima estensione del getto, tornando a una lunghezza che è più prossima a quella del caso a singolo ostacolo. È importante notare che per quasi tutti i casi, a eccezione del caso f, le variazioni del getto causate dalla presenza del secondo ostacolo sono tutte oltre al 10%, con una diminuzione massima in corrispondenza del *caso c* (diametro dell'ostacolo pari a 2 metri e set di rilascio 2) con un $ME_{tandem}/ME_{singolo}$ pari a 0,7 per una distanza tra i serbatoi di 4 metri.

Da questa analisi si evince che le variazioni che si verificano sono per lo più una conseguenza dell'interazione tra getto ed il secondo ostacolo, dove il terreno gioca un ruolo meno importante nel governare l'allungamento o l'accorciamento del getto. L'analisi del modo in cui questi getti si sviluppano all'interagire con entrambi gli ostacoli verrà approfondita nei prossimi paragrafi, dove viene proposta un'analisi più approfondita delle superfici isoconcentrazione del *caso b*, del *caso c* e del *caso e*.

Peculiarità del *caso b* orizzontale

Come descritto in precedenza, il *caso b* è anomalo rispetto agli altri casi di ostacoli orizzontali per il fatto che il getto libero non interagisce con il terreno prima di impattare contro l'ostacolo. Nella sezione precedente si è visto come la presenza del secondo ostacolo porta all'allungamento del getto, invece che alla sua riduzione.

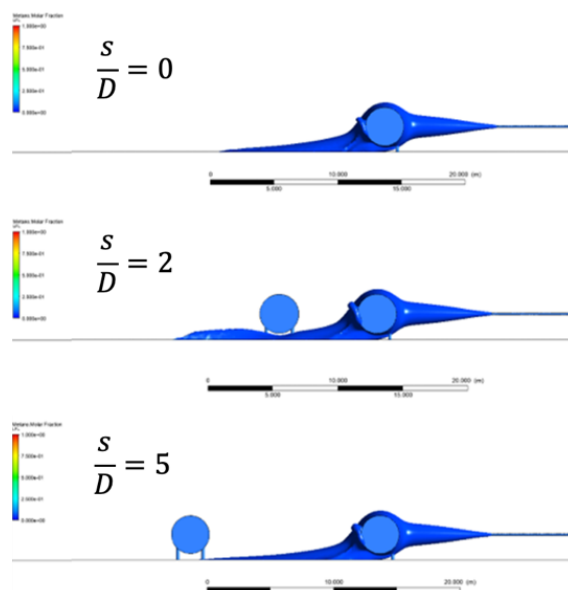


Figura 3.26 - Confronto tra getti del *caso b* che interagiscono con un ostacolo e con due ostacoli posti a diversa distanza tra loro.

Mentre l'interazione tra il primo ostacolo e il getto è evidente, l'interazione con il secondo ostacolo è molto più ridotta, limitandosi a deformare il getto nel punto di contatto con i piedi del serbatoio (Figura 3.26). Per questo motivo, l'allungamento è dovuto ad un appiattimento del getto rispetto al caso dell'ostacolo singolo, verificatosi per l'effetto di deviazione verso terra, precedentemente descritto, indotto dai serbatoi, che spingono il getto verso il terreno e di conseguenza allungano la massima estensione del getto. L'effetto di allungamento scompare una volta raggiunto un rapporto s/D pari a cinque, quando la distanza tra i due serbatoi diventa abbastanza significativa da permettere al solo effetto del terreno e all'interazione con il primo serbatoio di governare l'allungamento del getto libero. In questo caso, infatti, l'interazione con il secondo ostacolo non è significativa, come già descritto per i casi orizzontali della sezione precedente.

Peculiarità del *caso c* orizzontale

Le simulazioni del *caso c* mostrano un andamento particolare quando si fa un'analisi sulla forma del getto oltre il secondo ostacolo. Inizialmente, come si può notare dalla Figura 3.27, si verifica un accorciamento del getto in quanto le interazioni con il terreno vengono limitate dalla presenza del secondo ostacolo.

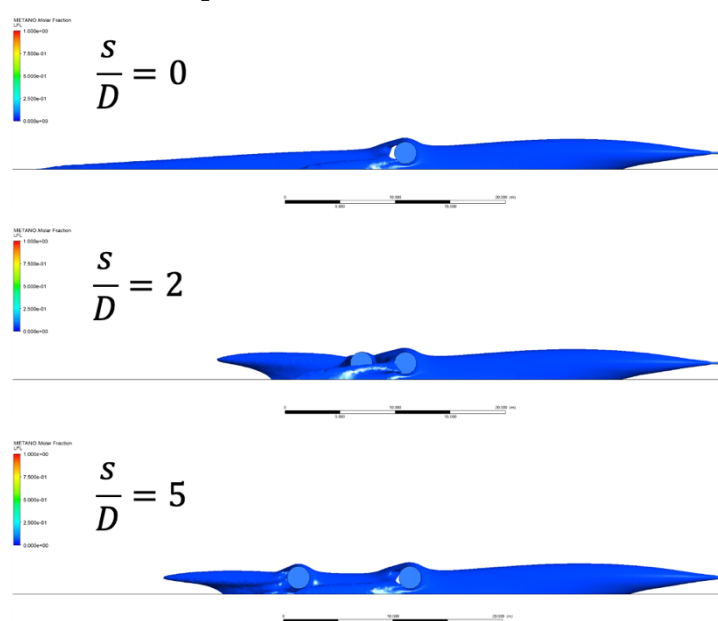


Figura 3.27 - Confronto tra getti del *caso c* che interagiscono con un ostacolo e con due ostacoli posti a diversa distanza tra loro.

Dopo il secondo ostacolo il getto si rialza, staccandosi completamente dal terreno. Quindi, non solo si verifica un aumento di turbolenza dovuto alla formazione dei vortici a valle del primo ostacolo, ma si ha anche un accorciamento dovuto alla

direzione che il getto prende dopo il secondo ostacolo. Questo andamento non cambia all'aumentare le distanze tra i serbatoi, anche se, all'aumentare del rapporto s/D , si ha un aumento parziale della lunghezza del getto, tornando ad un valore del rapporto $ME_{tandem}/ME_{singolo}$ pari a 0,8 quando il rapporto s/D diventa pari a 5, dimostrando che nonostante cresca la distanza tra serbatoi, il secondo serbatoio ha un'influenza non trascurabile sulla lunghezza finale. Ciò avviene a causa della diminuzione dei vortici formati a valle del primo ostacolo, che di conseguenza diminuiscono la diluizione.

Peculiarità del *caso e* orizzontale

Le simulazioni del *caso e* hanno un comportamento simile a quello descritto per le simulazioni del *caso c*: Il getto viene accorciato a causa della presenza del secondo ostacolo che, come visto nella Figura 3.28, allontanandosi dal primo ostacolo genera una variazione trascurabile nell'allungamento o accorciamento del getto.

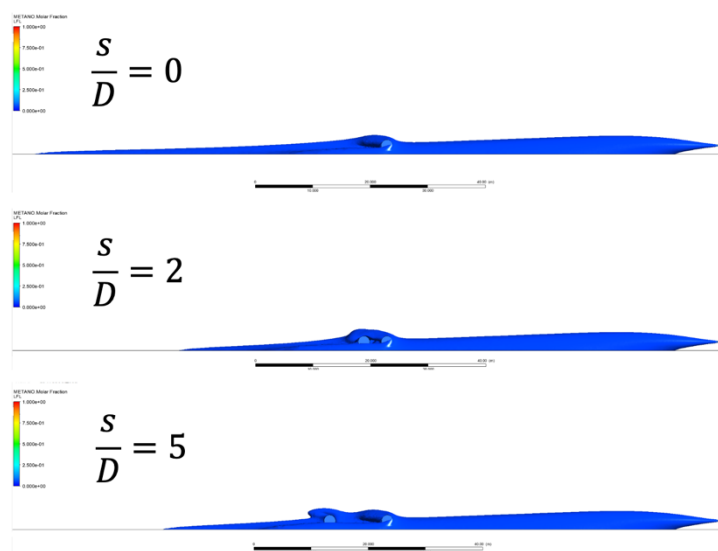


Figura 3.28 - Confronto tra getti del *caso e* che interagiscono con un ostacolo e con due ostacoli posti a diversa distanza tra loro.

Come nelle simulazioni del *caso c*, si verifica un distacco parziale del getto dal terreno, che passa sopra al secondo ostacolo evitando di arenarsi nello spazio tra il primo ed il secondo ostacolo. La diminuzione di contatto limita gli effetti di allungamento che il terreno può indurre. Inoltre, è possibile notare che il secondo ostacolo interagisce quasi nello stesso modo tra le diverse simulazioni del *caso e* al variare del rapporto s/D , andando da un valore di $ME_{tandem}/ME_{singolo}$ pari a 0,82 quando il rapporto s/D è pari a 2 ad un valore di $ME_{tandem}/ME_{singolo}$ pari a 0,84 quando il rapporto s/D è pari a 5. Di conseguenza, si può considerare che la distanza tra il primo ed il secondo ostacolo diventi trascurabile per rapporti s/D superiori a 2.

Influenza del terreno su ostacoli in tandem: casi con serbatoi verticali

Come per i casi con ostacoli cilindrici orizzontali, l'analisi dell'effetto del secondo ostacolo in Figura 3.29 viene svolta confrontando i risultati delle massime estensioni dei getti per i casi con due ostacoli con la massima estensione del getto in presenza di un singolo ostacolo.

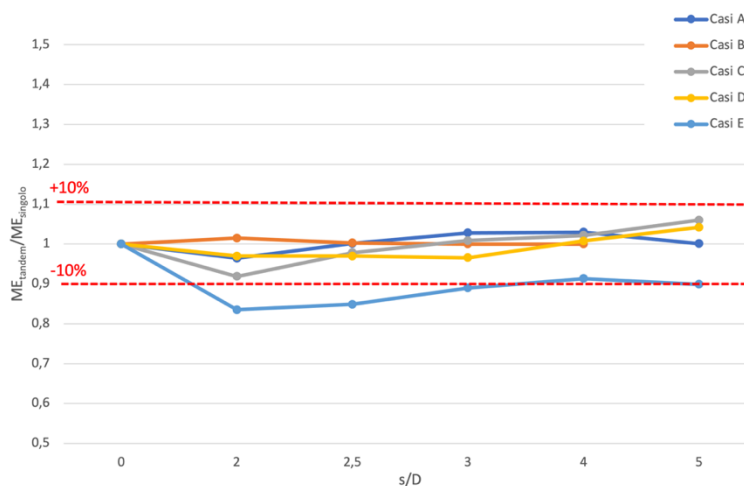


Figura 3.29 - Andamento della massima estensione dei getti dei casi aventi serbatoi verticali in tandem rispetto al rapporto delle distanze tra i serbatoi e i loro rispettivi diametri.

Per la maggior parte dei casi la presenza del secondo ostacolo comporta una diminuzione della massima estensione misurata. I vortici che si formano subito dopo i serbatoi diluiscono il getto di metano, rendendo più difficile l'allungamento. Inoltre, la mancanza di contatto con il terreno per la maggior parte di questi casi dimostra che l'effetto di accorciamento è dovuto per lo più all'interazione con l'ostacolo.

Per quattro casi su cinque la variazione della lunghezza del getto causata dalla presenza del secondo ostacolo è sempre minore al 10%, che è un valore industrialmente significativo. All'aumentare della distanza tra il primo e il secondo ostacolo, l'influenza del secondo ostacolo diminuisce sempre di più tornando all'estensione del getto misurata per il caso di ostacolo singolo. È bene notare che il *caso c* e il *caso d*, per alti rapporti s/D , si trovano ancora nella zona di trascinamento, che comporta un leggero allungamento del getto.

L'unico caso che varia molto più degli altri è il *caso e*, che manifesta un accorciamento superiore al 10%, con un rapporto $ME_{tandem}/ME_{singolo}$ pari a 0,83 come valore minimo raggiunto.

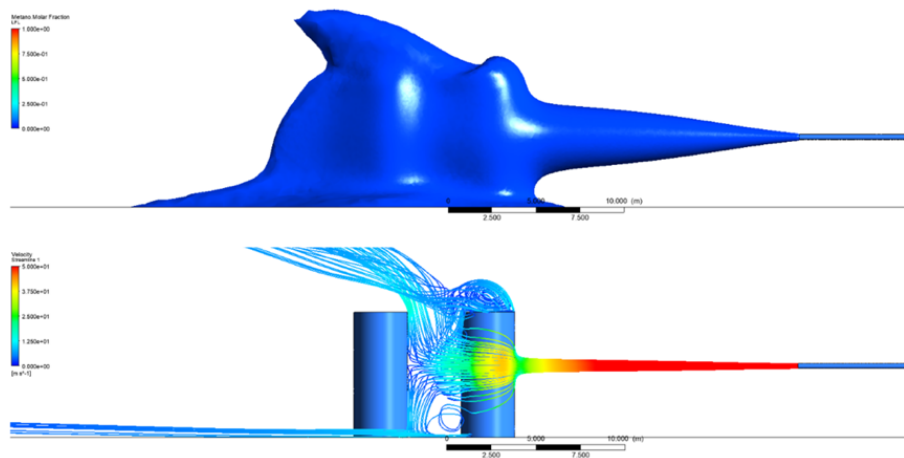


Figura 3.30 - Risultati del *contour* di LFL e *streamline* per una simulazione del *caso e* avente distanza tra gli ostacoli pari a due diametri.

In Figura 3.30 si vede come il secondo ostacolo, in posizione s/D pari a 2, provochi la formazione di molteplici vortici a valle del primo ostacolo. Inoltre, le linee di velocità del getto non si muovono lungo il perimetro del secondo cilindro bensì lungo la sua altezza. In questo caso particolare vediamo quindi che, anche se l'interazione con il terreno ha un'influenza non banale sull'allungamento del getto, si ha come risultato un accorciamento legato alla presenza del secondo ostacolo.

Anche per le simulazioni del *caso e* si può individuare un aumento della massima estensione del getto all'aumentare del parametro s/D dovuto alla minore influenza del secondo ostacolo, ma a differenza di altri casi il secondo ostacolo diventa leggermente meno significativo raggiungendo un rapporto $ME_{\text{tandem}}/ME_{\text{singolo}}$ pari a 0,89 per una distanza tra gli ostacoli pari a cinque diametri.

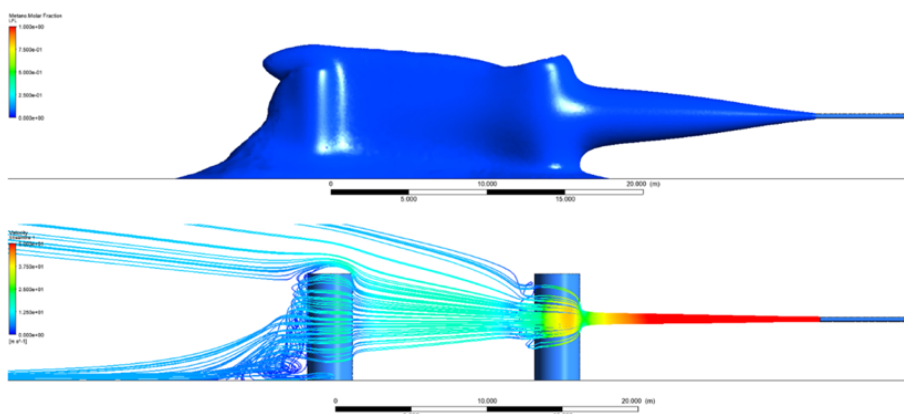


Figura 3.31 - Risultati del *contour* di LFL e *streamline* per una simulazione del *caso e* avente distanza tra gli ostacoli pari a cinque diametri.

Nel caso mostrato in Figura 3.31, si evince che passando dal caso avente rapporto s/D pari a 2 al caso avente rapporto s/D pari a 5 l'accorciamento del getto si verifica per l'effetto di diluizione dei vortici generati a valle del secondo ostacolo (Figura 3.30) anziché a valle del primo (Figura 3.31).

Si può dunque concludere che per tutti i casi con serbatoi verticali in tandem si può avere un accorciamento del getto dovuto alla presenza del secondo ostacolo oppure si possono avere situazioni in cui il secondo ostacolo è ininfluyente. Con queste prove si può confermare che, come predetto dall'Equazione 1.5 e com'è stato descritto nel grafico in Figura 3.23, ogni variazione registrata in questa sezione è legata all'influenza che l'ostacolo ha sul getto, anche se l'influenza del terreno può giocare un piccolo ruolo in alcuni casi particolari.

Volendo generalizzare l'andamento della massima estensione dei getti che impattano contro ostacoli verticali, è possibile ricontestualizzare i risultati descritti in precedenza in un grafico che esprime il rapporto tra la distanza del secondo ostacolo (r_0) e quella del primo ostacolo (L_0) rispetto al punto di rilascio, dove il pedice zero indica che la distanza è stata calcolata rispetto al centro del serbatoio. Poiché questo parametro presuppone la presenza di almeno un ostacolo, si è scelto di adimensionalizzare la massima estensione del getto lungo l'asse del rilascio $ME(LFL)_i$ rispetto al caso con ostacolo singolo $ME(LFL)_0$

Nello specifico, poiché i casi simulati aventi diametro del serbatoio pari a due metri sono tre (a, c, d) mentre quelli con diametro pari a tre metri sono soltanto due (b, e), si è scelto di utilizzare i primi per la ricerca vera e propria di un andamento, mentre gli ultimi sono stati impiegati per la verifica della validità delle ipotesi fatte.

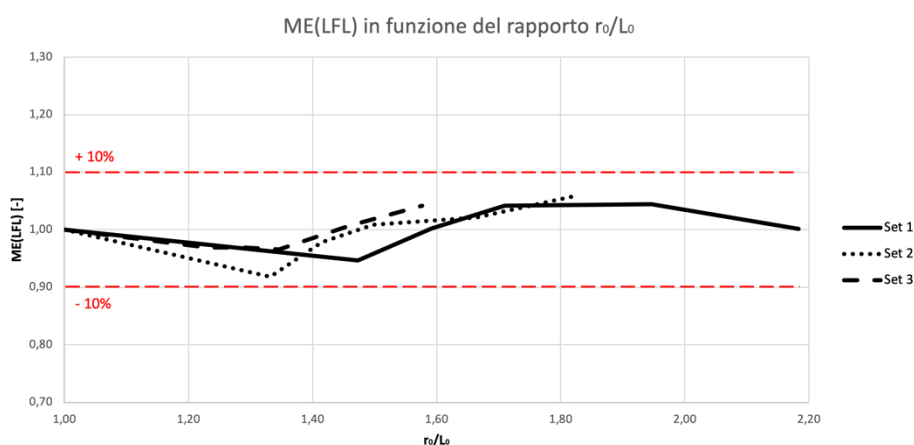


Figura 3.32 - Andamento del $ME(LFL)$ in funzione del rapporto r_0/L_0 per cilindri verticali aventi diametro pari a 2m (casi a, c e d).

Come si evince dalla Figura 3.32, è possibile individuare un andamento dapprima decrescente, poi via via crescente fino al raggiungimento di un asintoto in prossimità del valore unitario:

- “zona turbolenta”: il secondo ostacolo induce la generazione di un maggior numero di vortici a valle del primo ostacolo, che a loro volta inducono una diluizione maggiore del getto [$ME(LFL) < 1$];
- “zona di trascinamento”: la superficie del secondo ostacolo induce un trascinamento del getto dovuto all’effetto Coanda [47], e la mancanza di vortici fa sì che esso si mantenga ad una concentrazione più elevata per una distanza maggiore [$ME(LFL) > 1$];
- “zona neutra”: il secondo ostacolo non induce né la generazione di un maggior numero di vortici a valle del primo ostacolo né un trascinamento del getto, che si comporta come se vedesse un singolo ostacolo, il primo [$ME(LFL) = 1$].

Come accennato in precedenza, per la verifica della validità delle ipotesi fatte si è fatto ricorso alle simulazioni con ostacoli aventi diametro pari a tre metri. La Figura 3.33 mostra come fissato un set, la variazione di diametro porta per ogni simulazione ad un abbassamento del $ME(LFL)$, ma l’andamento qualitativo rimane sostanzialmente analogo.

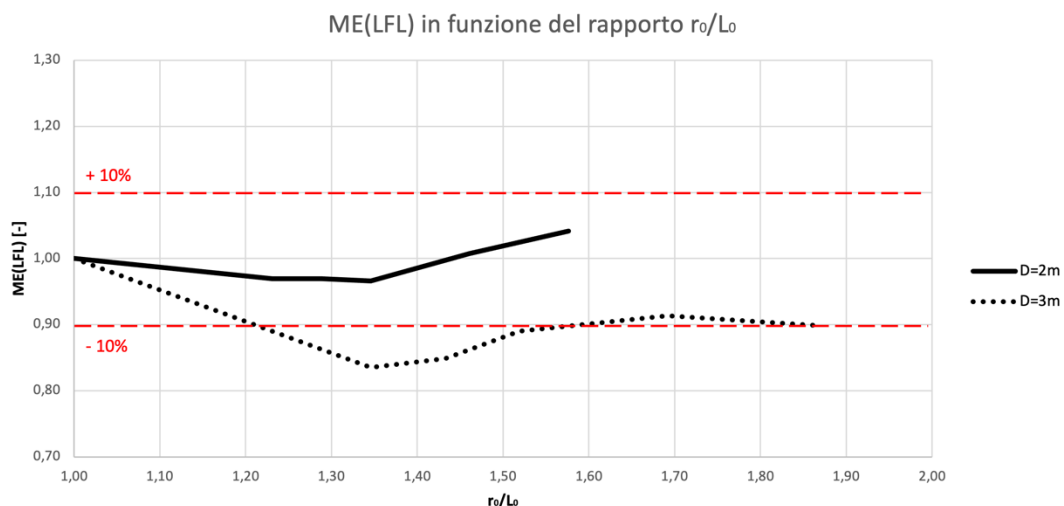


Figura 3.33 - Andamento del $ME(LFL)$ in funzione del rapporto r_0/L_0 a pari set di rilascio al variare del diametro dell’ostacolo (casi d, e).

3.7 Analisi delle interazioni tra getto e ostacolo

L’analisi presente in questa sezione viene basata sullo studio delle streamline generate a conclusione di ogni simulazione.

Come concluso nelle precedenti sezioni, il terreno ha un effetto limitato nella variazione dell'estensione massima del getto quando questo interagisce con due ostacoli orizzontali uno dietro l'altro. Rispetto ai casi verticali, quelli orizzontali subiscono più frequentemente una variazione che va oltre il 10% della massima estensione del getto. Per questa ragione, anche se le conclusioni sono analoghe a quelle formulate per i casi verticali, in questa sezione ci si è concentrati nello specifico sui casi orizzontali.

Dalla Figura 3.34 alla Figura 3.39 sono rappresentate le linee di velocità di tutti i casi aventi due ostacoli orizzontali ad una distanza relativa s/D pari a 2.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso a* mostra un accorciamento di circa il 17,4% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo. Dalla Figura 3.34 si evince una formazione di un'alta quantità di vortici a valle del primo ostacolo che promuovono la diluizione del getto. In questo caso l'interazione con il secondo ostacolo è limitata e l'assenza di vortici a valle di esso non permette il ritorno al valore di massima estensione misurato nel caso di getto libero.

Tra le altre cose, il ritorno del fluido ad alta quantità di energia cinetica si verifica in prossimità del secondo ostacolo, promuovendo così la diluizione e, come conseguenza, l'accorciamento rispetto al caso singolo. Il getto non va ad interagire molto con il secondo ostacolo, tranne che per il modo in cui i piedi hanno un effetto sulla forma del getto. Questo tipo di getto è stato analizzato nella sezione precedente.

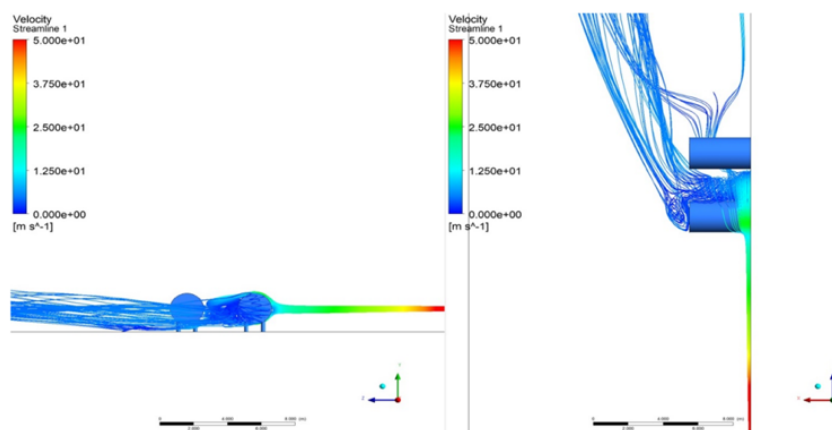


Figura 3.34 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il *caso a*.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso b* mostra un allungamento di circa il 9,5% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo. Dalla Figura 3.35 si nota come i vortici generati si trovano quasi interamente sul bordo sinistro del primo ostacolo. Questo non significa che non ci siano dei vortici che si formano a valle del primo ostacolo, ma che a differenza del caso avente s/D

pari a 2 per le simulazioni del *caso a*, l'aumento del diametro a 3m comporta un dispendio maggiore di energia cinetica per il superamento del primo ostacolo.

Ciò è evidenziato dalla drastica diminuzione della velocità nel punto di contatto per le sezioni del fluido che non interagiscono direttamente con il serbatoio, non permettendo la formazione di vortici di significative dimensioni e limitando la diluizione del getto. Inoltre, l'interazione tra il getto che supera il primo ostacolo e il secondo ostacolo è minima, infatti non si genera alcun vortice a valle del secondo.

A causa della mancanza di vortici, l'effetto del terreno è significativo rispetto alle variazioni del getto, comportando un allungamento (Sezione 3.6.3).

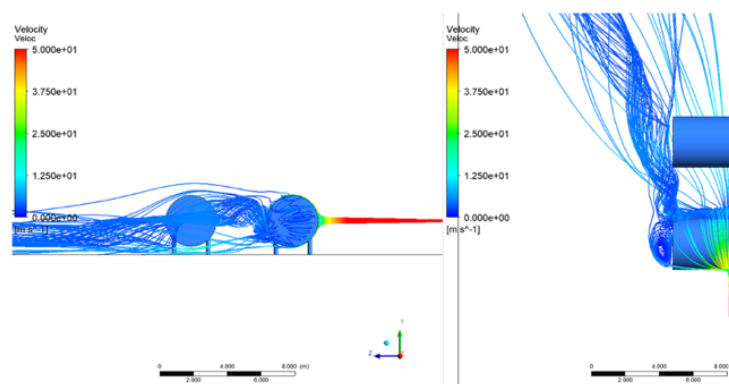


Figura 3.35 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il *caso b*.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso c* mostra un accorciamento di circa il 29,9% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo. Dalla Figura 3.36 si nota come questo caso si distingue dagli altri, essendo l'unico che porta il getto in modo significativo sia al di sopra che al di sotto del secondo ostacolo. Questo è uno dei pochi casi in cui a valle del secondo ostacolo si generano dei vortici che contribuiscono alla diluizione del getto. Le *streamline* presentano un moto particolare: una volta superato il primo ostacolo, si verifica un parziale cambio di direzione, in parte si dirigono verso il terreno attraversando lo spazio tra il secondo serbatoio ed il terreno e in parte rimangono in quota e superano il secondo serbatoio. Per questa ragione, il getto presenta una forma particolare che si può verificare solo per questo caso particolare. Infine, i numerosi vortici aumentano la turbolenza del flusso, promuovendo la diluizione e l'accorciamento del getto.

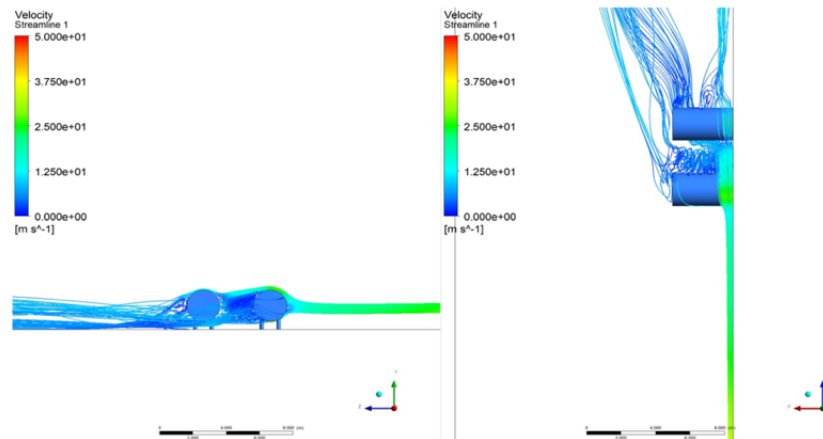


Figura 3.36 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il *caso c*.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso d* mostra un accorciamento di circa il 13,8% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo.

Dalla Figura 3.37 si nota un'altra propensione alla formazione di vortici a valle del primo ostacolo a causa dell'impatto del fluido sul fronte del secondo ostacolo, inducendo il ritorno del fluido e il suo conseguente ricircolo.

Nell'intercapedine che si trova nella sezione del fluido che impatta il secondo ostacolo, il fluido presenta diversi punti di distacco dal primo ostacolo, evento dimostrato dall'aumento dei vortici a velocità ridotte in quella zona.

Nonostante il secondo ostacolo non generi nessun vortice a valle di esso, esso è essenziale per la formazione dei vortici che promuovono la diluizione del getto e dunque il suo accorciamento.

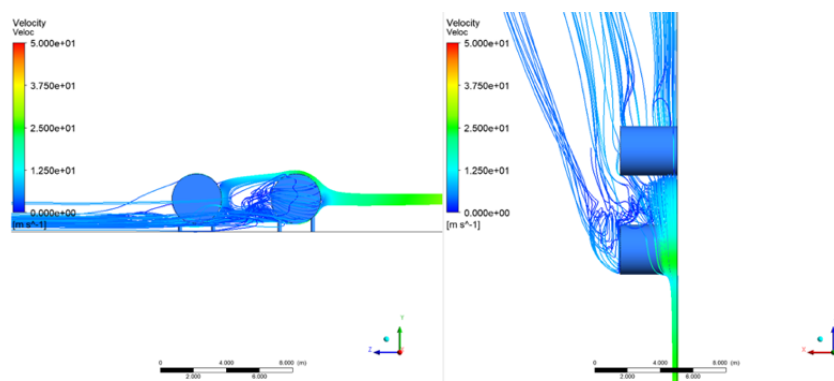


Figura 3.37 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il *caso d*.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso e* mostra un accorciamento di circa il 21,1% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo.

Dalla Figura 3.38 si nota come l'effetto del terreno perda significatività qualora venga introdotto un secondo ostacolo a valle del primo. In questo caso, a differenza di quelli menzionati finora, l'effetto di riduzione della massima estensione del getto si manifesta per un effetto scia prodotto dalla presenza del secondo ostacolo e non per eventuali vortici che si possono formare a valle del primo o del secondo ostacolo.

Generalmente, l'effetto scia tende ad allungare la massima estensione dei getti grazie alla sua tendenza a permettere al fluido di rimanere su valori di turbolenza che non favoriscono la diluizione. In questo caso particolare si verifica un evento nel quale il getto viene spinto dal secondo ostacolo ad una quota sufficientemente elevata da portare alcune parti del getto oltre l'altezza critica riportata in Tabella 3.11. Al di sopra di questa quota critica il getto viene limitato nelle sue interazioni con il terreno, che è il fattore principale che governa l'allungamento del getto.

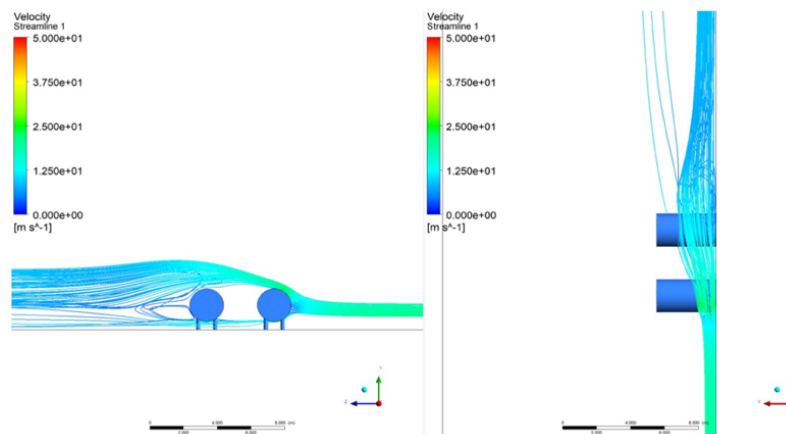


Figura 3.38 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il *caso e*.

Il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso f* mostra un accorciamento di circa l'1,2% della massima estensione del getto rispetto al caso con ostacolo singolo. Dalla Figura 3.39 si nota il verificarsi di un effetto simile a quello individuato per il caso avente s/D pari a 2 per le simulazioni del *caso e*. A sua volta, però, la presenza del secondo ostacolo è quasi totalmente influente nella variazione della massima distanza raggiunto dal getto. Esso, infatti, viene deviato dal primo ostacolo, ma il distacco avviene oltre il punto più alto del cilindro, facendo sì che il getto rimanga ad una quota sufficientemente bassa da interagire con il secondo ostacolo. Queste interazioni permettono la formazione di una quantità limitata di vortici a valle del secondo serbatoio, che dunque non promuovono una diluizione sostanziale del getto tale da portare ad un accorciamento significativo.

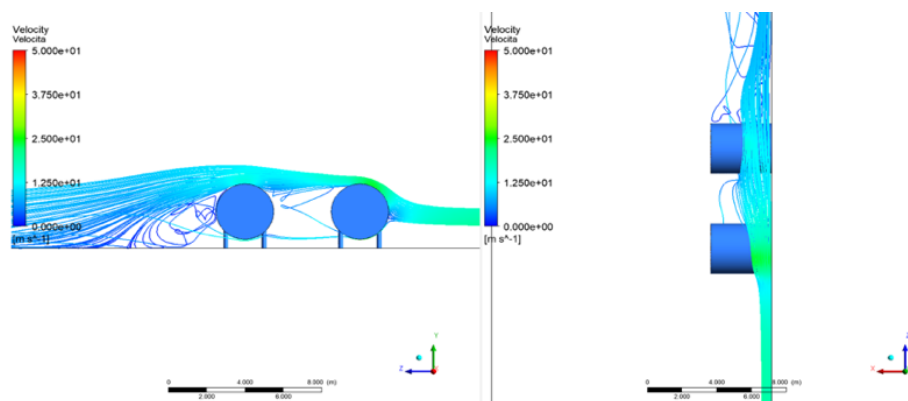


Figura 3.39 - Streamline vista dal fronte e dall'alto del caso avente s/D pari a 2 per il caso f .

3.8 Confronto con lavori precedenti

Come evidenziato nella Sezione 3.6.1, la maggior parte dei casi orizzontali analizzati posseggono un getto libero che interagisce con il terreno, come conseguenza di aver un punto di rilascio ad un'altezza al di sotto dell'altezza critica, espressa in Tabella 3.11. L'estensione del getto viene quindi definita da quest'interazione, portandoci a delle conclusioni che sono solo relative ai casi che dimostrano questo comportamento. A causa della mancanza di ulteriori dati sull'andamento dei getti liberi nel caso in cui non ci siano le interazioni tra il getto e il terreno, si è ritenuto utile fare un confronto con il lavoro di Colombini e colleghi [48], riguardante l'interazione tra getti liberi ed un serbatoio orizzontale cilindrico senza interazioni con il terreno.

Il lavoro di Colombini e colleghi consiste nello studio di un elevato set di casi con serbatoi cilindrici a orientamento orizzontale aventi diametri che variano tra 2 metri e 7,5 metri, lunghezze che variano tra 11 metri e 20 metri e pressioni nel serbatoio di stoccaggio che variano tra 65 bar e 650 bar. L'estensione massima dei getti risultanti è stata valutata a diverse concentrazioni di metano nell'aria ma, per l'analisi presente in questa sezione, ci si è riferiti solo ai dati relativi alle concentrazioni pari al 5,3%. L'obiettivo del lavoro di Colombini e colleghi è stato quello di verificare l'effetto che l'impatto tra un singolo serbatoio orizzontale e un getto libero che non interagisce con il terreno ha sull'estensione del getto, con la possibilità di semplificare la CFD e di utilizzare i modelli proposti da Chen-Rodi [22] e Cushman-Rosin [49] per la stima del ME/ME_{fj} in relazione al rapporto d_{fj}/D , dove d_{fj} equivale al diametro del getto nel punto di contatto tra getto e ostacolo. Il lavoro di Colombini include un'ulteriore analisi di sette casi dove i serbatoi orizzontali sono stati orientati verticalmente. Per questo motivo si è deciso di estendere il confronto anche ai casi verticali svolti in questo lavoro di tesi.

In Figura 3.40 sono riportati i risultati del confronto tra il lavoro svolto in questa tesi e il lavoro svolto da Colombini e colleghi.

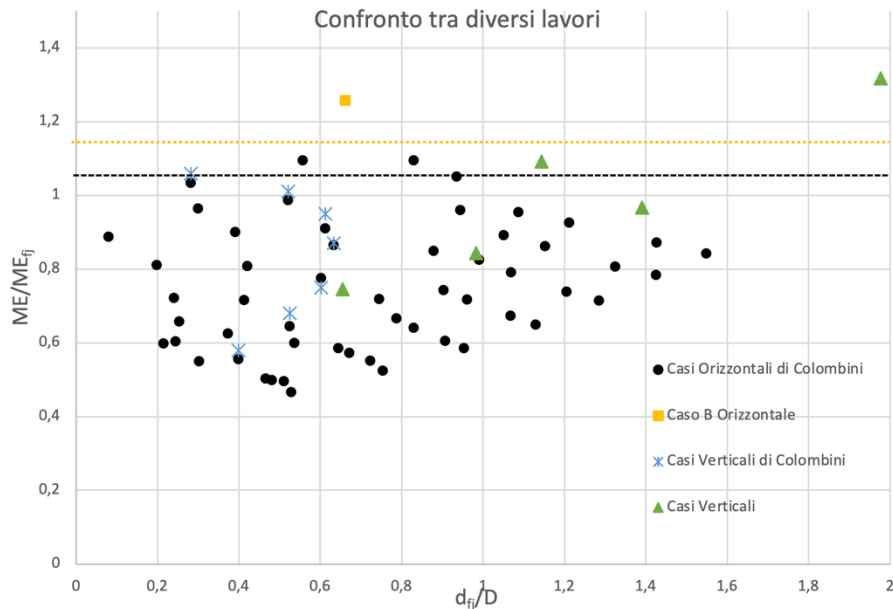


Figura 3.40 - Confronto tra i risultati del lavoro svolto in questa tesi e del lavoro svolto da Colombini e colleghi.

In accordo con i modelli precedentemente menzionati, se il rapporto d_{fj}/D è inferiore a 1,8 allora si può stimare che la massima estensione del getto ha delle dimensioni assimilabili a quelle della massima estensione del getto libero, considerando che variazioni ritenute industrialmente rilevanti si trovano oltre al 10%.

Dai risultati ottenuti si possono proporre quattro considerazioni: in primo luogo, per i casi orizzontali studiati da Colombini e colleghi l'ostacolo comporta sempre un accorciamento, o al più un leggero allungamento, per getti liberi che non interagiscono con il terreno, in secondo luogo, per i sette casi studiati da Colombini e colleghi con serbatoi verticali, i valori di ME/ME_{fj} rimangono molto simili a quelli definiti da serbatoi orizzontali. Si dimostra quindi che l'estensione massima di un getto che non interagisce con il terreno non dipende in un modo particolarmente gravoso dall'orientamento dell'ostacolo. In terzo luogo, è importante evidenziare che in questo lavoro di tesi, di tutti i risultati ottenuti con serbatoi orizzontali solo uno manifesta un getto libero che non interagisce con il terreno, ovvero il *caso b*. Questo caso è stato l'unico inserito nel grafico di Figura 3.40 per il confronto in quanto tutti gli altri casi hanno un getto libero che presenta una forte interazione con il terreno che comporta una deformazione del getto stesso, non permettendo la quantificazione del diametro d_{fj} . Il *caso b* mostra una crescita dell'estensione del getto dovuta alla deviazione del getto verso il terreno, permettendone il suo allungamento. Ciò

suggerisce che l'ipotesi previamente discussa non sia valida per tutte le altezze tali per cui il getto libero non interagisce con il terreno. Infine, in quarto luogo, per i casi verticali analizzati in questo lavoro di tesi si ritrovano risultati simili a quelli presenti nel lavoro di Colombini e colleghi, ricadendo all'interno della nube di dati in cui la maggior parte dei risultati presenta un rapporto d_{fj}/D inferiore a 1,8. Infatti, l'unico caso che ha un valore del rapporto d_{fj}/D superiore a 1,8 è il *caso e*, per il quale il getto si deforma all'impattare con il serbatoio portandolo a interagire con il terreno e ad allungare l'estensione massima del getto libero.

Da questo confronto si conferma che l'orientamento del serbatoio cilindrico abbia un effetto limitato sull'estensione del getto: i fattori che realmente governano il comportamento del getto sono le condizioni di rilascio, l'altezza del punto di rilascio, il diametro del serbatoio e la distanza tra il getto e il serbatoio.

4. Conclusioni e prospettive future

In questo lavoro di tesi è stato simulato e studiato attraverso un modello di fluidodinamica computazionale lo scenario incidentale che prevede l'interazione tra un getto di metano ad alta pressione e diverse configurazioni di uno o più ostacoli cilindrici aventi diverso orientamento, diverso diametro D e diverso rapporto s/D . Per ognuno dei casi svolti, si è valutata l'estensione massima del getto libero misurato a una concentrazione pari al limite inferiore di infiammabilità ($0,05 \text{ vol}_{\text{CH}_4}/\text{vol}_{\text{aria}}$).

Le prove sono state svolte valutando diversi set di rilascio (Tabella 3.1). Le differenze tra i diversi risultati sono state definite attraverso un'analisi fluidodinamica delle superfici isoconcentrazione (LFL) e delle *streamline* dei getti che interagiscono con il terreno o con gli ostacoli. L'aspetto più importante che si è riscontrato è stato l'influenza del terreno nelle variazioni di estensione massima del getto, un fenomeno ampiamente studiato da Colombini e colleghi [21], con l'obiettivo di verificare se, in presenza di uno o più ostacoli, l'eventuale allungamento o accorciamento del getto è dovuto alle interazioni tra il getto e il terreno oppure alle interazioni tra il getto e l'ostacolo, oppure a entrambi.

4.1 Conclusioni

Le seguenti conclusioni saranno espresse in base ai set di rilascio utilizzati.

4.1.1 Set di rilascio 1

Questo set di rilascio è caratterizzato da una pressione di stoccaggio di 65 bar e da un orifizio con un diametro di 25,4 mm (1 pollice). In queste condizioni abbiamo studiato un totale di quattro serie di casi:

- due serie di casi orizzontali: *caso a* ($D=2$ m) e *caso b* ($D=3$ m);
- due serie di casi verticali: *caso a* ($D=2$ m) e *caso b* ($D=3$ m).

Prima di qualsiasi prova svolta in presenza di ostacoli, sono state portate a termine tre prove a getto libero a diverse altezze di rilascio. In questo caso, due delle tre prove a getto libero non hanno avuto un'interazione con il terreno, dato che le altezze di rilascio di queste prove, indicate in Tabella 3.2, superano l'altezza critica di 1,92 metri definita dall'Equazione 1.5. Per tutti i casi con questo set di rilascio, l'impatto del getto con il primo ostacolo ha creato forti variazioni nella lunghezza del getto libero. Come ampiamente descritto nella Sezione 3.6.1, l'effetto del terreno ha forti ripercussioni nell'estensione massima del getto in presenza del singolo ostacolo: infatti, per i casi orizzontali si raggiunge un forte allungamento, superiore al 10%, mentre per i casi verticali si raggiunge un forte accorciamento, inferiore al 10%.

Casi con singolo ostacolo

Si esclude la possibilità di poter semplificare questi casi, usando queste condizioni, attraverso la simulazione del semplice getto libero. Quando il secondo ostacolo viene introdotto, i casi orizzontali e verticali si comportano in modo antitetico.

Nei casi orizzontali ci sono effetti discordanti, dove la massima estensione del getto diminuisce per il *caso a*, mentre aumenta per il *caso b*, con variazioni in entrambi i casi superiori al 10%. Nel *caso a* si nota una forte diluizione dovuta ai vortici generati a valle del primo serbatoio, che si formano grazie agli effetti di ricircolo introdotti dal secondo serbatoio. Nel *caso b* la diluizione è molto più limitata, con vortici di dimensioni ridotte per la maggiore energia cinetica consumata per superare il primo ostacolo e con il contatto con il terreno che evita la generazione di ulteriori vortici a valle del secondo ostacolo.

Nei casi verticali, invece, si individuano dei risultati simili tra loro. Sia per il *caso a* che per il *caso b* si osserva una diminuzione della massima estensione del getto quasi impercettibile, conseguenza della mancanza di contatto con il terreno. Per il *caso a* il contatto con il secondo ostacolo porta a variazioni minime, mentre per il *caso b* il getto non va a contatto con il secondo ostacolo, per cui il contributo principale è quello dato dal primo ostacolo.

Casi con ostacoli multipli

Per i casi orizzontali, al variare delle distanze tra i serbatoi, il *caso a* dimostra che il secondo ostacolo continua ad avere un effetto sulla massima estensione del getto, rendendo impossibile la semplificazione della CFD attraverso la rimozione di quest'ultimo. Dall'altra parte, per il *caso b* si può considerare la semplificazione della CFD una volta raggiunta una distanza tra serbatoi equivalente ad un rapporto s/D pari a 2, oltre al quale le variazioni della massima estensione del getto sono trascurabili a causa della limitata interazione tra getto ed il secondo ostacolo.

Per i casi verticali le variazioni introdotte dalla presenza del secondo ostacolo e la variazione tra le distanze dei due ostacoli sono quasi impercettibili; perciò, si considera la possibilità di semplificare il CFD attraverso la simulazione di un singolo ostacolo per entrambi set di casi.

In conclusione:

- per il *caso a* orizzontale (singolo e tandem), la geometria non è semplificabile;
- per il *caso b* orizzontale (singolo), la geometria non è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso b* orizzontale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo solo se il rapporto s/D è superiore a 2;
- per il *caso a* e per il *caso b* verticali (singolo), la geometria non è semplificabile;
- per il *caso a* e per il *caso b* verticali (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo.

4.1.2 Set di rilascio 2

Questo set di rilascio è caratterizzato da una pressione di stoccaggio di 130 bar e da un orifizio con un diametro di 25,4 mm (1 pollice). In queste condizioni abbiamo studiato un totale di tre serie di casi:

- due serie di casi orizzontali: *caso c* ($D=2$ m) e *caso d* ($D=3$ m);
- due serie di casi verticali: *caso c* ($D=2$ m).

Prima di qualsiasi prova svolta in presenza di ostacoli, sono state portate a termine tre prove a getto libero a diverse altezze di rilascio. In questo caso, due delle tre prove a getto libero hanno avuto un'interazione con il terreno, dato che le altezze di rilascio di queste prove, indicate in Tabella 3.2, non superano l'altezza critica di 2,678 metri definita dall'Equazione 1.5. Per tutti i casi con questo set di rilascio, l'impatto del getto con il primo ostacolo ha creato modeste variazioni nella lunghezza del getto libero. Come si è concluso nella Sezione 3.6.1, per i casi orizzontali gli effetti di allungamento per le simulazioni a singolo ostacolo sono dovuti quasi interamente al contatto tra il terreno ed il getto. D'altra parte, per il caso verticale si hanno risultati simili a quelli individuati per il set di rilascio 1, che presenta un forte accorciamento del getto, inferiore al 10%.

Casi con singolo ostacolo

Si conclude che per il *caso c* e per il *caso d* orizzontali e per il *caso c* verticale, l'effetto del primo ostacolo sul getto libero può essere modellato con la CFD tramite una semplice simulazione del getto libero.

Casi con ostacoli multipli

Quando il secondo ostacolo viene introdotto, i casi orizzontali e verticali si comportano in modo simile. Nei casi orizzontali ci sono degli accorciamenti per entrambi i casi, pur risentendo maggiormente il *caso c* della presenza di ostacoli. Questo si deve al numero elevato di vortici generati, i quali, a causa delle dimensioni ridotte del serbatoio (2 metri di diametro), si formano più facilmente se confrontati a quelli con serbatoi aventi diametri pari a 3 metri. L'andamento di decrescita della massima estensione del getto non continua in maniera indefinita all'aumentare della distanza tra i serbatoi: per il *caso c* una volta raggiunto un rapporto s/D pari a 5 il getto si comporta come se il secondo ostacolo non fosse presente. Dall'altra parte, per il *caso d* il secondo ostacolo continua a generare un effetto significativo sulla massima estensione del getto. Nel *caso c* verticale l'introduzione del secondo ostacolo comporta un accorciamento del getto. All'aumentare della distanza tra i serbatoi, quanto è stato descritto in sezione 3.7.1 diventa più evidente: superato un rapporto s/D pari a 2,5 le variazioni sulla massima estensione del getto diventano trascurabili.

In conclusione:

- per il *caso c* orizzontale (singolo), la geometria è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso c* orizzontale (tandem), la geometria non è semplificabile con il relativo ostacolo singolo;
- per il *caso d* orizzontale (singolo), la geometria è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso d* orizzontale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo solo se il rapporto s/D è superiore a 2,5;
- per il *caso c* verticale (singolo), la geometria è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso c* verticale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo solo se il rapporto s/D è superiore a 2,5.

4.1.3 Set di rilascio 3

Questo set di rilascio è caratterizzato da una pressione di stoccaggio di 65 bar e da un orifizio con un diametro di 50,8 mm (2 pollici). In queste condizioni abbiamo studiato un totale di quattro serie di casi:

- due serie di casi orizzontali: *caso e* ($D=2$ m) e *caso f* ($D=3$ m);
- due serie di casi verticali: *caso d* ($D=2$ m) e *caso e* ($D=3$ m).

Prima di qualsiasi prova svolta in presenza di ostacoli, sono state portate a termine tre prove a getto libero a diverse altezze di rilascio. In questo caso, due delle tre prove a getto libero hanno avuto un'interazione con il terreno, dato che le altezze di rilascio di queste prove, indicate in Tabella 3.2, non superano l'altezza critica di 3,796 metri definita dall'Equazione 1.5.

Casi con singolo ostacolo

Per tutti i casi con questo set di rilascio, l'impatto del getto con il primo ostacolo ha creato delle variazioni nella lunghezza del getto libero. Per i casi orizzontali, si ottengono delle variazioni quasi impercettibili per il *caso e* mentre per il *caso f* si raggiunge un forte accorciamento, inferiore al 10%. Esso infatti mostra come il distacco del getto dal terreno sia in grado di accorciare di molto la massima estensione del getto.

Per i casi verticali, si registra un accorciamento inferiore al 10% per il *caso d* e un forte allungamento, superiore al 10%, per il *caso e*. Come analizzato nella Sezione 3.6.1, l'allungamento del *caso e* è dovuto all'abbattimento del getto verso il terreno.

Casi con ostacoli multipli

Quando il secondo ostacolo viene introdotto, i casi orizzontali e verticali si comportano in modo molto diverso.

Nel *caso e* orizzontale si verifica un forte accorciamento dovuto al distacco del getto dal terreno, dovuto a sua volta alla presenza del secondo ostacolo. Questo distacco limita l'interazione tra il terreno e il getto, fenomeno che rimane costante al variare del rapporto s/D tra i serbatoi. Nel *caso f* orizzontale, il getto si comporta come se il secondo ostacolo non fosse presente. Dalle streamline descritte in sezione 3.8 si può notare che il getto viene deviato verso il terreno, portando alla formazione di vortici a valle del secondo ostacolo che promuovono la diluizione del getto. Questo comportamento rimane costante al variare della distanza relativa s/D .

Nel *caso d* verticale le variazioni dell'estensione massima del getto sono minime, mostrando un comportamento simile a quello visto per il set di rilascio 1. Il *caso e* verticale, invece, mostra una sostanziale variazione nell'estensione massima del getto all'introduzione del secondo ostacolo, dove l'accorciamento è dovuto all'incremento della turbolenza tra i serbatoi per la generazione di vortici che promuovono la diluizione del getto. Come per i casi precedenti, all'aumentare delle distanze relative tra serbatoi, l'influenza del secondo getto diminuisce, come descritto in sezione 3.6.1.

In conclusione:

- per il *caso e* orizzontale (singolo), la geometria è semplificabile con il relativo getto libero;

- per il *caso e* orizzontale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo solo se il rapporto s/D è superiore a 2;
- per il *caso f* orizzontale (singolo), la geometria non è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso f* orizzontale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo;
- per il *caso d* verticale (singolo), la geometria non è semplificabile con il relativo getto libero;
- per il *caso d* verticale (tandem), la geometria è semplificabile con il relativo ostacolo singolo;
- per il *caso e* verticale (singolo e tandem), la geometria non è semplificabile.

4.2 Prospettive future

Sulla base di quanto discusso nella Sezione 3 sono state identificate cinque aree che meritano di essere sviluppate in successivi approfondimenti sul tema dei getti che impattano contro ostacoli multipli.

In primo luogo, per verificare la correttezza del “*modello a tre zone*” proposto nella Sezione 3.7.1 bisognerebbe estendere le simulazioni per i set di rilascio 2 e 3 aumentando il rapporto r_0/L_0 fino a che il ME(LFL) adimensionalizzato rispetto al caso con ostacolo singolo ritorna al valore unitario (Figura 3.15). Questo permetterebbe di confermare e generalizzare l’andamento del set di rilascio 1. Inoltre, si consiglia la ricerca di un parametro tale per cui tutte le curve degenerino in un’unica interpolante: in questo modo è possibile ricavare una correlazione che permetta di predire il comportamento di getti con diverse condizioni di rilascio, con ostacoli di diversi diametri e con diversi rapporti r_0/L_0 .

A tal proposito, per concludere l’analisi sugli ostacoli verticali in tandem e sulla loro interazione con i getti in pressione si potrebbe condurre un’analisi di sensibilità approfondita sul diametro degli ostacoli in quanto, come si evince dall’andamento dei casi aventi diametro pari a tre metri in Figura 3.33, in taluni casi il ME(LFL) adimensionalizzato rispetto al caso con ostacolo singolo sembrerebbe non ritornare al valore unitario bensì tenderebbe ad attestarsi su valori inferiori. Questo comportamento non è stato investigato ulteriormente in questo lavoro di tesi perché è conservativo rispetto alla simulazione dell’interazione con il singolo ostacolo.

Come terzo ambito di ricerca, si potrebbero svolgere delle simulazioni in cui il primo ostacolo non è posizionato ad una distanza fissa pari, come in questo lavoro di tesi, alla metà della distanza raggiunta dal limite inferiore di infiammabilità del getto

libero, bensì farla variare avvicinandola o allontanandola per capire se le considerazioni ricavate in questa sede sono valide anche per altre distanze.

Ad integrazione di ciò, come quarto ambito di ricerca per i casi orizzontali si suggerisce di far variare la distanza del primo ostacolo (Figura 3.27) e set di rilascio al fine di trovare una correlazione che indichi sotto quali condizioni il getto viene deviato verso l'alto, producendo un accorciamento rispetto al getto libero, e sotto quali condizioni il getto viene deviato verso il basso, producendo un allungamento rispetto al getto libero.

Infine, meritano di essere investigate le condizioni in cui il getto libero è al di sopra dell'altezza critica (Equazione 1.5) ma il getto, a causa dell'impatto contro il primo ostacolo, arriva comunque ad interagire con il terreno (Figura 3.19). In tutti questi casi, infatti, non è più possibile semplificare lo scenario in quanto il ME(LFL) percentuale eccede il valore unitario di più del 10% (Figura 3.22). Per questo motivo vale la pena effettuare un'analisi di sensibilità approfondita sui parametri che incidono su questo comportamento al fine di ricavare una correlazione in grado di predire anche questo genere di comportamenti. Poiché dunque la condizione di altezza critica tale per cui il getto libero non interagisce con il terreno non è sufficiente a garantire la mancata interazione anche in presenza dell'ostacolo, si suggerisce di alzare l'altezza di rilascio fino a ricavare una nuova altezza critica tale per cui né il getto libero né il getto che impatta contro l'ostacolo vadano a contatto con il terreno.

Bibliografia

- [1] C. Colombini and V. Busini. *Obstacle influence on high-pressure jets based on computational fluid dynamics simulations*. Chemical Engineering Transactions, 75, 2019.
- [2] R. Rota and G. Nano. *Introduzione alla Affidabilità e Sicurezza nell'Industria di Processo*. Pitagora, 2007.
- [3] M. Pontiggia, V. Busini, M. Ronzoni, G. Uguccioni and R. Rota. *Effect of large obstacles on high momentum jet dispersion*. Chemical Engineering Transactions, 2014.
- [4] D. A. Crowl and J. F. Louvar. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Pearson, 2012.
- [5] J. Casal. *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. Elsevier, 2017.
- [6] P. Salcher and J. Whitelaw. *Über den ausfluss stark verdichteter luft*. Sitzungsber, Akad. Wiss. Wien, 98:267–287, 1889.
- [7] A. Martani. *Vertical cylindrical tank influence on high-pressure jets: a computational fluid dynamics study*. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2018.
- [8] C. F. Sposato. *The effects of obstacle geometry on jet mixing in releases of silane*. Master's thesis, Texas A&M University, 2000.
- [9] A. Hourri, B. Angers, P. Bernard, A. Tchouvelev, and V. Agranat. *Numerical investigation of the flammable extent of semi-confined hydrogen and methane jets*. International journal of hydrogen energy, 2011.
- [10] P. Bernard, A. Hourri, B. Angers, A. Tchouvelev, and V. Agranat. *Effects of surface on the flammable extent of hydrogen jets*. Conference Paper, 2009.
- [11] B. Angers, A. Hourri, P. Bernard, and A. Tchouvelev. *Numerical investigation of a vertical surface on the flammable extent of hydrogen and methane vertical jets*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011.

- [12] M. Pontiggia, V. Busini, M. Ronzoni, G. Uguccioni, and R. Rota. *Effect of large obstacles on high momentum jets dispersion*. Conference on Safety & Environment in Process & Power Industry, pages 523–528, 2014.
- [13] R. W. Schefer, W. G. Houf, T. C. Williams, B. Bourne, and J. Colton. *Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007.
- [14] M. L. Ducasse, J. Dubois, M. Amielh, and F. Anselmet. *Experimental investigation of a turbulent variable density jet impinging on a sphere*. Conference Paper, 2010.
- [15] C. Colombini, E. Carminati, A. Parisi, R. Rota and V. Busini. *Safety evaluations on unignited high-pressure methane jets impacting a spherical obstacle*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021.
- [16] J.E. Hall, P. Hooker, L. O’Sullivan, B. Angers, A. Hourri and P. Bernard. *Flammability profiles associated with high-pressure hydrogen jets released in close proximity to surfaces*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017.
- [17] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout and B. Pascal. *Free underexpanded jets in a quiescent medium: A Review*. Progress in Aerospace Sciences, 2015.
- [18] R. Rota and V. Busini. *Modellazione delle Conseguenze di Incidenti Industriali*. Politecnico di Milano, 2018.
- [19] A. Mazzoldi, T. Hill and J. J. Colls. *CFD and gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities*. Atmospheric environment, 2008.
- [20] V. Molkov, D. Makarov and M. Bragin. *Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere*. University of Ulster, 2009.
- [21] C. Colombini, A. Martani, R. Rota and V. Busini. *Ground influence on high-pressure methane jets: practical tools for risk assessment*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020.
- [22] C. J. Chen and W. Rodi. *Vertical turbulent buoyant jets: a review of experimental data*. Nasa STI/Recon Technical Report A, 80, 1980.
- [23] L. Carlini. *Influenza del terreno su getti ad alta pressione*. Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2019.
- [24] C. Colombini, M. Pontiggia, G. Uguccioni, R. Rota and V. Busini. *Ground Influence on High-Pressure Methane Jets: Different Concentration Clouds Scenarios*. Chemical Engineering Transactions, 2021.

- [25] C. Colombini, L. Carlini, R. Rota and V. Busini. *Ground Influence on High-Pressure Methane Jets: Effect on Different Substances*. Chemical Engineering Transactions, 2020.
- [26] C. Colombini, C. Iannantuoni, R. Rota and V. Busini. *Unignited high-pressure methane jet impacting a cylindrical obstacle: An assessment tool for consequences analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021.
- [27] G. Maugeri and G. Zanon. *Unignited high-pressure methane jet impinging on a pipe rack: a computational fluid dynamics study*. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2018.
- [28] C. Colombini, G. Maugeri, G. Zanon, R. Rota and V. Busini. *Unignited high-pressure methane jet impacting a cylindrical obstacle: An assessment tool for consequences analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021.
- [29] D. Hamlyn, T. Hilderman and R. Britter. *A simple network approach to modelling dispersion among large groups of obstacles*. Atmospheric Environment, 2007.
- [30] S. R. Hanna, O. R. Hansen, M. Ichard and D. Strimaitis. *CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas*. Atmospheric Environment, 2009.
- [31] J. Labovský and L. Jelemenský. *CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments*. Slovak University of Technology in Bratislava, 2013.
- [32] Y. Tominaga and T. Stathopoulos. *CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques*. Atmospheric Environment, 2013.
- [33] G. Romano, P. Tombini, P. Blas and V. Busini. *Multi-obstacles influence on High-Pressure Methane Jets*. Research Publishing, 2021.
- [34] B. S. Carmo, J. R. Meneghini and S. J. Sherwin. *Secondary instabilities in the flow around two circular cylinders in tandem*. Cambridge University Press, 2010.
- [35] G. Huang, H. Huan, X. Xu and Y. Liu. *Simulation of flow past two tandem cylinders using deterministic vortex method*. Thermal Science, 2012.
- [36] M. M. Zdravkovich. *Interference between two circular cylinders forming a cross*. Journal of Fluid Mechanics, 1982.
- [37] M. Derudi, D. Bovolenta, V. Busini and R. Rota. *Heavy gas dispersion in presence of large obstacles: selection of modeling tools*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014.

- [38] AA. VV. *Enciclopedia degli Idrocarburi*. Treccani, 2005.
- [39] A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson and F. Swaeld. *The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas*. Combustion Science and Technology, 1984.
- [40] A. Taccori. *Studio dei rilasci di metano ad alta pressione da fori di grande diametro con il supporto della CFD*. Master's thesis, Politecnico di Milano, 2021.
- [41] AA. VV. *Methods for the Calculation of Physical Effects Due to Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases)*. Committee for the Prevention of Disasters, 1997.
- [42] Y. Tu, G. H. Yeah and C. Liu. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [43] AA. VV. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. ANSYS, 2011.
- [44] J. Franke. *Best practice guideline for the CFD simulation of ows in the urban environment*. Meteorological Institute, 2007.
- [45] AA. VV. *Cryogenic Standard Tanks LITS 2*. Linde Engineering.
- [46] AA. VV. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. John Wiley & Sons, 2000.
- [47] B.D. Giles. *Fluidics, the Coanda Effect, and Some Orographic Winds*. University of Birmingham, 1976.
- [48] C. Colombini, C. Iannantuoni, R. Rota and V. Busini. *Unignited High-Pressure Methane Jet Impacting a Cylindrical Obstacle: An Assessment Tool for Consequences Analysis*. Journal of loss prevention in the process industries, 2021.
- [49] B. Cushman-Roisin. *Environmental Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, 2020.

Indice delle figure

Figura 1.1 - Andamento della portata gassosa scaricata attraverso un orifizio.	4
Figura 1.2 - Rappresentazione schematica di un getto sotto-espanso.	5
Figura 1.3 - Getto sotto-espanso con focus sulla <i>nearfield zone</i>	5
Figura 1.4 - Getto sotto-espanso con focus sulla <i>transition zone</i>	6
Figura 1.5 - Getto sotto-espanso con focus sulla <i>farfield zone</i>	7
Figura 1.6 - Rappresentazione di un pennacchio mediante modello gaussiano.	8
Figura 1.7 - Modellazione di un getto con un modello integrale.	8
Figura 1.8 - Modellazione di un getto con un modello CFD.	9
Figura 1.9 - Profilo dell'LFL al variare dell'altezza del punto di rilascio.	11
Figura 1.10 - Andamento del ME dei getti in presenza di un ostacolo.	12
Figura 1.11 - Formazione di vortici in funzione del numero di Reynolds.	13
Figura 2.1 - Rappresentazione del modello a tre livelli di Birch.	19
Figura 3.1 - Procedura di elaborazione di uno scenario incidentale.	26
Figura 3.2 - Geometria del dominio vista in ANSYS® <i>Design Modeler</i>	28
Figura 3.3 - Geometria del serbatoio verticale con ANSYS® <i>Design Modeler</i>	29

Figura 3.4 - Geometria dei serbatoi orizzontali con ANSYS® <i>Design Modeler</i>	29
Figura 3.5 - Grigliatura con ANSYS® <i>Meshing</i> vista dal piano di simmetria.	31
Figura 3.6 - Particolare della grigliatura dei serbatoi.	31
Figura 3.7 - Superfici che costituiscono il dominio di calcolo.	32
Figura 3.8 - Profilo di velocità del vento.	33
Figura 3.9 - Gradiente degli sforzi di Reynold in ANSYS® <i>CFX-Solver</i>	35
Figura 3.10 - Andamento dell' <i>imbalance</i> in ANSYS® <i>CFX-Solver</i>	35
Figura 3.11 - Rappresentazione dell'LFL di un getto in ANSYS® <i>CFD-Post</i>	36
Figura 3.12 - Rappresentazione delle <i>streamline</i> di un getto in ANSYS® <i>CFD-Post</i>	37
Figura 3.13 - Convalida dell'indipendenza dalla simmetria in ANSYS® <i>CFD-Post</i>	38
Figura 3.14 - Convalida dell'indipendenza dalla <i>mesh</i> in ANSYS® <i>CFD-Post</i>	39
Figura 3.15 - Interpolazione del ME rispetto all'altezza di rilascio.	42
Figura 3.16 - Posizione del ME rispetto al diametro del foro.	44
Figura 3.17 - Getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale.	45
Figura 3.18 - Linee di velocità del getto infiammabile in funzione di s/D	46
Figura 3.19 - Getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale.	47
Figura 3.20 - Getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale.	48
Figura 3.21 - Getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale.	48
Figura 3.22 - Getto libero e getto impattante contro un ostacolo orizzontale.	49
Figura 3.23 - posizione del ME per coppie di ostacoli orizzontali e verticali.	50
Figura 3.24 - Andamento della massima estensione dei getti.	51
Figura 3.25 - Getti che interagiscono con un solo ostacolo e con due.	51
Figura 3.26 - Getti del <i>caso b</i> che interagiscono con un ostacolo e con due.	52
Figura 3.27 - Getti del <i>caso c</i> che interagiscono con un ostacolo e con due.	53
Figura 3.28 - Getti del <i>caso e</i> che interagiscono con un ostacolo e con due.	54
Figura 3.29 - ME dei casi aventi serbatoi verticali in tandem.	55
Figura 3.30 - LFL e <i>streamline</i> per una simulazione del <i>caso e</i>	56
Figura 3.31 - LFL e <i>streamline</i> per una simulazione del <i>caso e</i>	56
Figura 3.32 - Andamento del ME(LFL) in funzione del rapporto r_0/L_0	57

Figura 3.33 - Andamento del ME(LFL) in funzione del rapporto r_0/L_0	58
Figura 3.34 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>a</i>	59
Figura 3.35 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>b</i>	60
Figura 3.36 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>c</i>	61
Figura 3.37 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>d</i>	61
Figura 3.38 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>e</i>	62
Figura 3.39 - <i>Streamline</i> vista dal fronte e dall'alto per il caso <i>f</i>	63
Figura 3.40 - Confronto tra i risultati di questo lavoro di tesi e di Colombini.	64

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 - Tipologie di getti sotto-espansi.....	6
Tabella 2.1 - Proprietà fisiche del metano.....	18
Tabella 2.2 - Caratteristiche di infiammabilità del metano.	18
Tabella 3.1 - Caratteristiche del rilascio di metano.....	26
Tabella 3.2 - Geometrie studiate e relative altezze di rilascio.....	27
Tabella 3.3 - Dimensioni caratteristiche del dominio di calcolo.....	28
Tabella 3.4 - Dimensioni caratteristiche delle gambe dei serbatoi al variare del diametro..	29
Tabella 3.5 - Parametri caratteristici della <i>mesh</i>	30
Tabella 3.6 - Condizioni al contorno del programma ANSYS® CFX-Pre.....	32
Tabella 3.7 - Valori dell'esponente β in funzione della stabilità atmosferica.....	34
Tabella 3.8 - Impostazioni del risolutore ANSYS® CFX-Pre.....	34
Tabella 3.9 - Dettagli delle simulazioni verticali effettuate.	39
Tabella 3.10 - Dettagli delle simulazioni orizzontali effettuate.....	40
Tabella 3.11 - Altezze critiche al variare delle caratteristiche del rilascio.....	43
Tabella 3.12 - Risultati del rapporto ME/ME_{FJW} del singolo ostacolo orizzontale	45
Tabella 3.13 - Risultati del rapporto ME/ME_{FJ} del singolo ostacolo verticale.	50

