

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

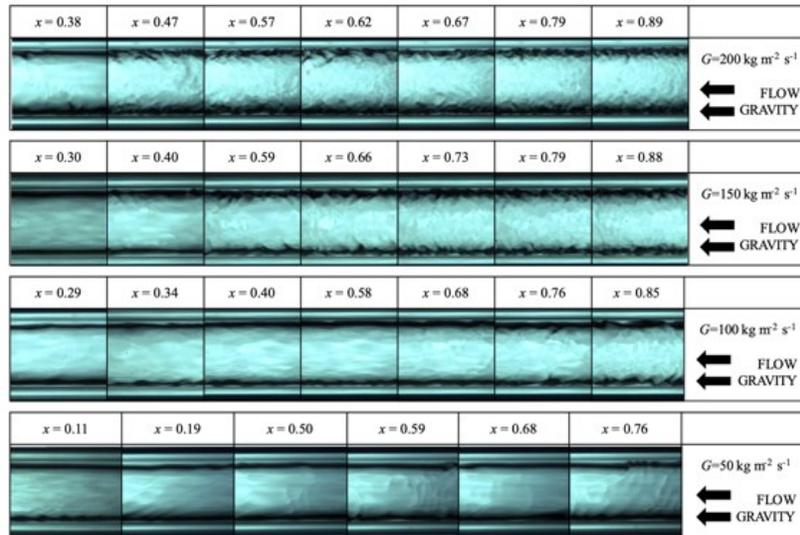
Relazione per la prova finale

Metodi di previsione della turbolenza nel film di liquido durante la condensazione all'interno di canali verticali

Tutor Universitario: Prof. Azzolin

Laureando: Anna Gianceselli

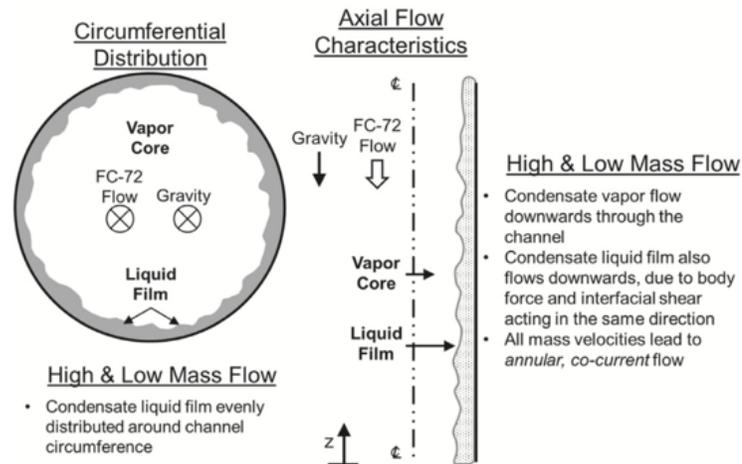
L'oggetto di studio del presente lavoro è lo scambio termico all'interno di canali sottili (mini-canali) durante la condensazione.



L'obiettivo principale è conoscere il comportamento del fluido all'interno per poter predire il coefficiente di scambio termico.

Esso infatti può assumere diverse configurazioni, al variare della frazione di vapore, del flusso di massa, dell'orientamento dei canali, etc..

Tra le configurazioni che si possono riscontrare, ci si sofferma nella condizione di flusso anulare.

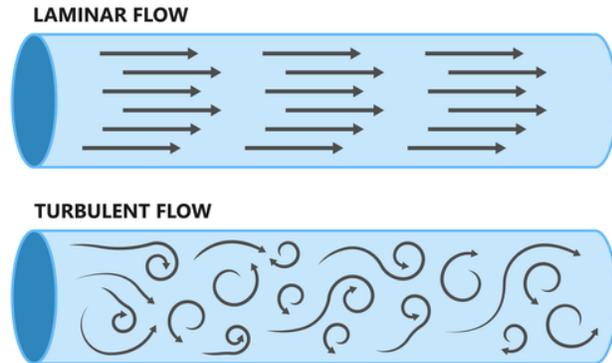


Caratteristiche del moto anulare:

- Simmetria assiale
- Film di liquido condensato esterno, adiacente alle pareti
- Nucleo centrale di vapore
- Interferenza Bifase
- Spessore del film di liquido

È la configurazione che si osserva più di frequente nel caso di downflow, quindi è quella che viene trattata. Ci si concentra ora sullo studio del film di liquido, che rappresenta la maggior resistenza nello scambio termico.

Il presente lavoro si focalizza proprio sullo studio della turbolenza del film di liquido. Esistono dei metodi, infatti, che permettono di predire il punto di passaggio da regime laminare a turbolento.



L'importanza di questi metodi è spiegabile in quanto è necessario stabilire il regime di moto per sviluppare e applicare qualsiasi correlazione per il coefficiente di scambio termico. I fenomeni vorticosi andranno quindi tenuti in considerazione, in quanto agiscono per agitare e mescolare il fluido.

L'insorgenza della turbolenza non si può osservare ad occhio nudo e pertanto ci si serve di altri mezzi, come la misurazione dello spessore del film o il calcolo del coefficiente di scambio termico.

I metodi si basano sul numero di Reynolds del film di liquido, un parametro adimensionale che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi.

Si definisce come segue:

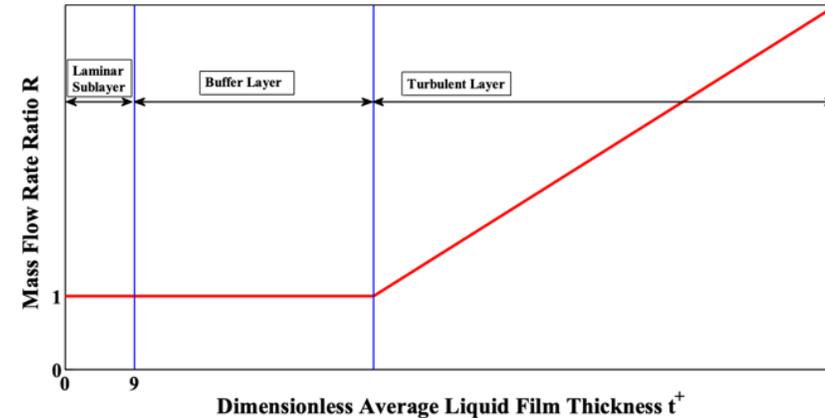
$$Re_{LF} = (1 - e) \cdot (1 - x) \cdot \frac{G \cdot d}{\mu_L}$$

La frazione di liquido e è tale per cui si può scrivere il seguente sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} e = (1 + 279,6 \cdot We_c^{-0,8395})^{-2,209}; \text{ se } 10 < We_c < 10^5 \\ We_c = \frac{\rho_c \cdot J_g^2 \cdot d}{\sigma} \quad ; \quad J_g = \frac{x \cdot G}{\rho_g} \\ \rho_c = \frac{x + e(1 - x)}{\frac{x}{\rho_g} + \frac{e(1 - x)}{\rho_L}} \end{array} \right.$$

Quando Re_{LF} raggiunge un certo valore, definito dal metodo in questione, è prevista la transizione.

Il metodo di Cioncolini, Del Col e Thome si basa sullo spessore del film di liquido. La transizione è prevista quando il flusso di massa calcolato con l'ipotesi di flusso anulare non rispecchia più la realtà .



Siccome non è sempre possibile conoscere lo spessore del film, la correlazione trovata è stata trasposta anche per dei corrispettivi numeri di Reynolds.

- Stato Laminare se $Re_{LF} < 162$;
- Regime di transizione se $162 < Re_{LF} < 2785$;
- Stato Turbolento $Re_{LF} > 2785$.

Il metodo di McNaught e Butterworth prevede la transizione per un valore del numero di Reynolds che dipende solo dal numero di Prandtl del liquido.

$$Re_{TR} = 4658 \cdot Pr_L^{-1,05}$$

Il metodo di Chun e Seban prevede un valore di transizione che dipende dal numero di Kapitza, un coefficiente che rappresenta il rapporto tra le forze di tensione superficiale e le forze di inerzia.

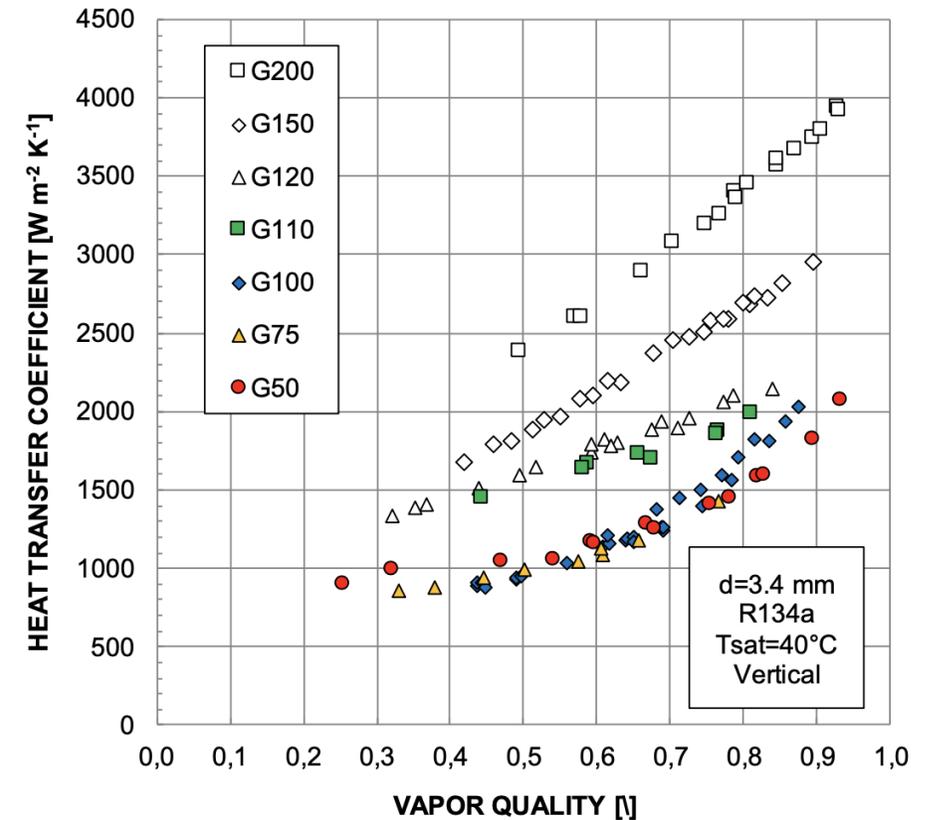
$$Re_{L,turb} = 0,215 \cdot Ka^{-\frac{1}{3}} = 0,215 \cdot \left(\frac{\mu_L^4 \cdot g}{\rho_L \cdot \sigma^3} \right)^{-1/3}$$

Il metodo di Azzolin, Bortolin e Del Col si basa invece sul numero di Weber, un altro parametro che esprime il rapporto tra forze di tensione superficiale e forze di inerzia.

$$We_G = \frac{G^2 \cdot d}{\rho_G \cdot \sigma}$$

Si calcola We_G per le condizioni in cui in laboratorio si riscontra un aumento del coefficiente di scambio termico non spiegabile semplicemente con l'aumento del flusso di massa. La transizione viene fissata a $We_G = 120$, da cui si può quindi ricavare un valore di G per cui calcolare Re_{LF} di transizione.

È, quindi, l'unico metodo per cui il valore di transizione varia al variare di x .



Calcolo del Reynolds del film di liquido

```
function [Re_LF_vett]=cioncolini(x, d, G, name_ref, T_sat)
miu_l=refpropm('V','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
rho_l= refpropm ('D', 'T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
sigma= refpropm('I','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
rho_g= refpropm ('D', 'T', T_sat, 'Q', 1, name_ref);
e_vett=[];
Re_LF_vett=[];
for it=x;
    e=0.1;
    err=1;
    while err>0.03;
        J_g=it*G/rho_g;
        rho_c=(it+e*(1-it))/((it/rho_g)+(e*(1-it)/rho_l));
        We_c=rho_c*(J_g^2)*d/sigma;
        if 10<We_c<10^5;
            e_new=(1+279.6*We_c^(-0.8395))^(-2.209);
        else disp('e non calcolabile')
        end
        err=e_new-e;
        e=e_new;
    end
    e_vett=[e];
    Re_LF=(1-e)*(1-x)*G*d/miu_l;
    Re_LF_vett=[Re_LF];
end
```

Calcolo del Reynolds del liquido

```
function [Re_L_vett]=cioncolini_fac(x, d, G, name_ref, T_sat)
miu_l=refpropm('V','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
Re_L_vett=G*d*(1-x)/miu_l;
```

Metodo di McNaught e Butterworth

```
function [Re_tr]=mcnaught_butterworth(x, name_ref, T_sat)
Pr=refpropm('^','T',T_sat, 'Q', 0, name_ref);
Re_tr=4658*Pr^(-1.05);
```

Metodo di Chun e Seban

```
function [Re_tr_CS]=chun_seban(name_ref, T_sat)
g=9.81;
miu_l=refpropm('V','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
rho_l= refpropm ('D', 'T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
sigma= refpropm('I','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
Ka= (miu_l^4)*g/(rho_l*(sigma^3));
Re_tr_CS= 0.215*Ka^(-1/3);
```

Metodo di Azzolin et al.

```
function [Re_L_A]=azzolin(x,d,name_ref, T_sat);
miu_l=refpropm('V','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
sigma= refpropm('I','T', T_sat, 'Q', 0, name_ref);
rho_g= refpropm ('D', 'T', T_sat, 'Q', 1, name_ref);
We_G=120;
G_new=sqrt(We_G*rho_g*sigma/d);
Re_L_A=G_new*d*(1.-x)/miu_l;
it=1;

for u=Re_L_A;
    if u<240;
        Re_L_A(it)=240;
    end
    it=it+1;
end
```

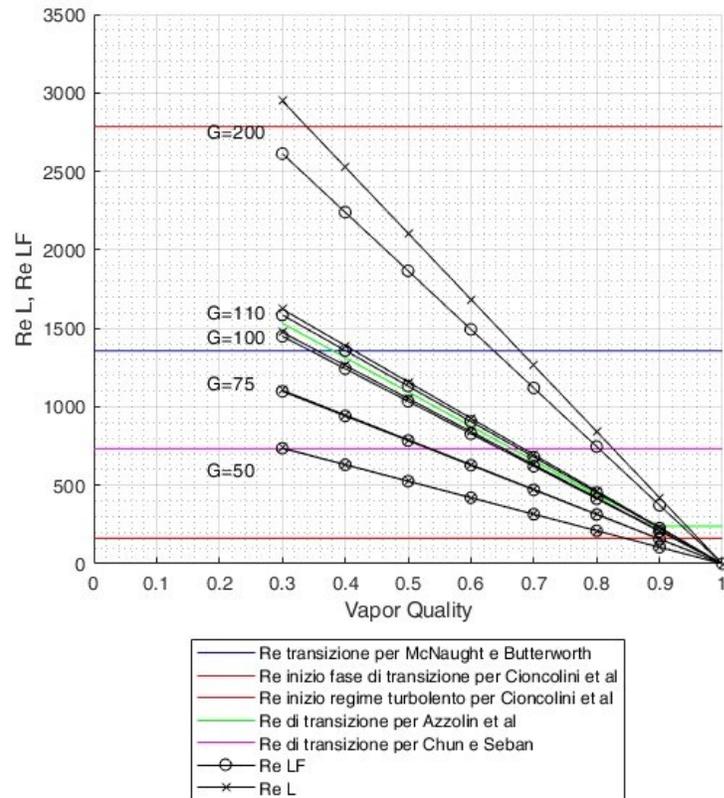
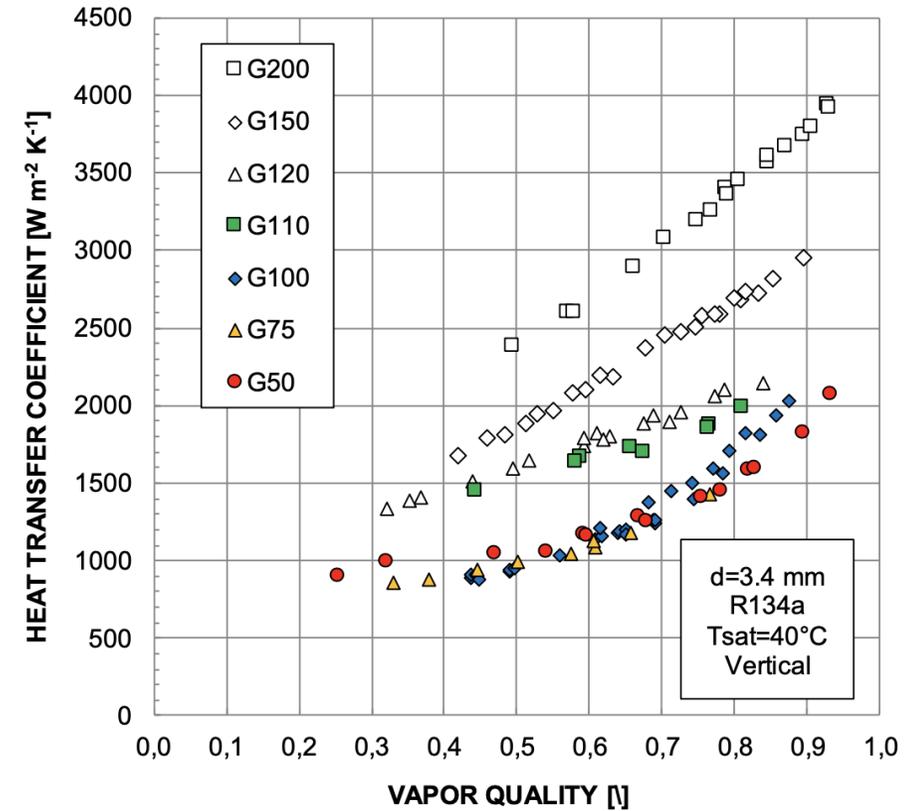


Grafico di transizione trovato per R134a con il codice Matlab sviluppato.



Valori del coefficiente di scambio termico in funzione della frazione di vapore ricavati sperimentalmente.

Grafico di transizione per R1234ze(E)

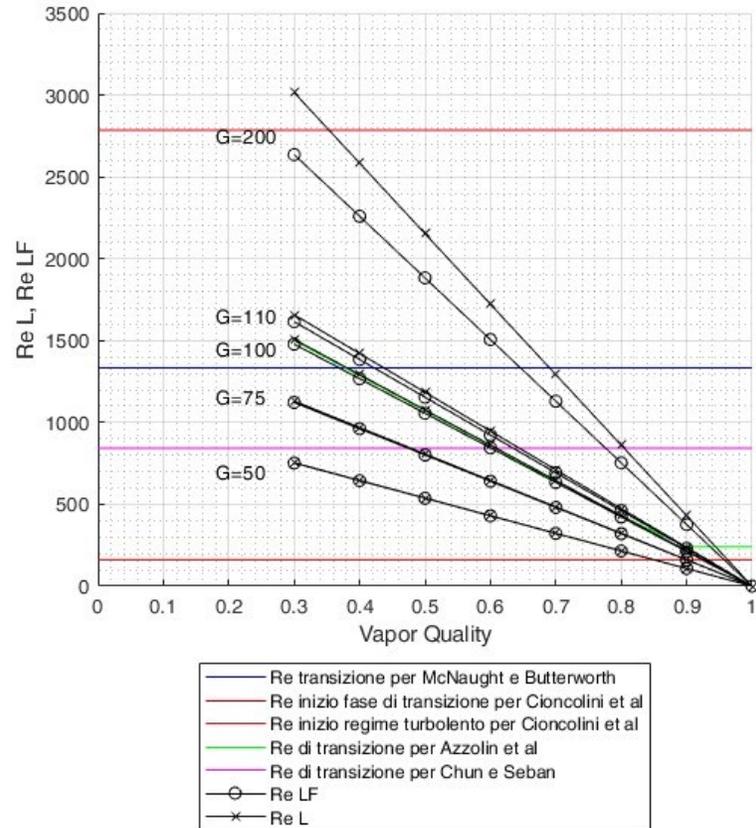


Grafico di transizione per R1234yf

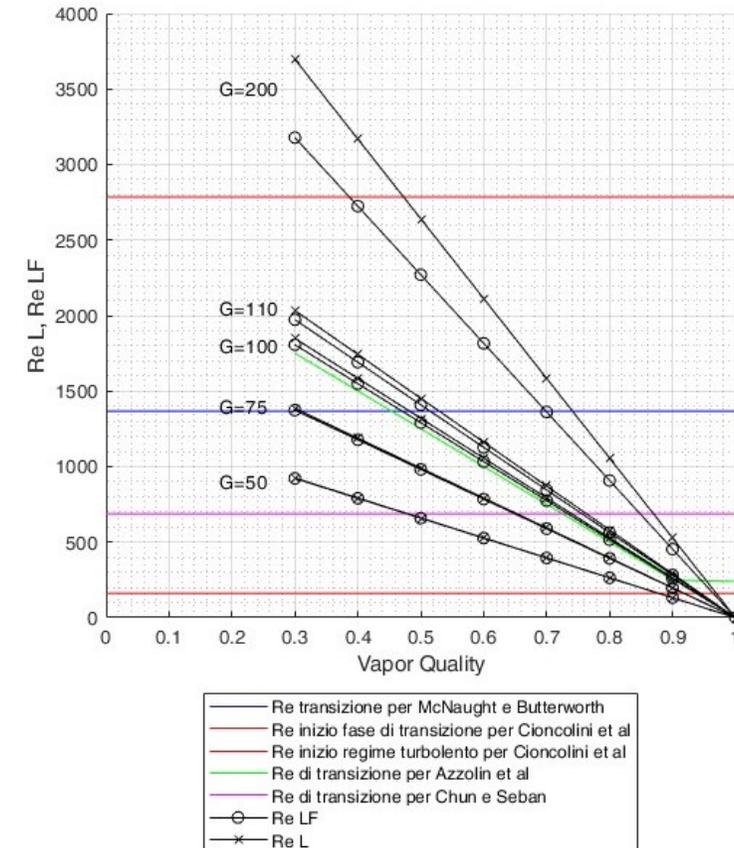


Grafico di transizione per R1233zd(E)

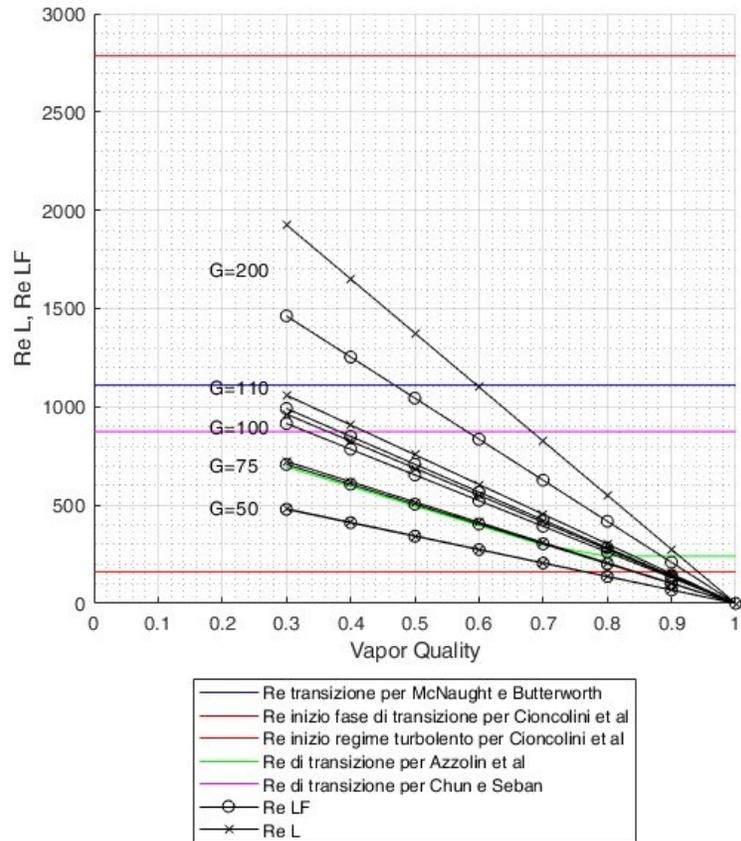
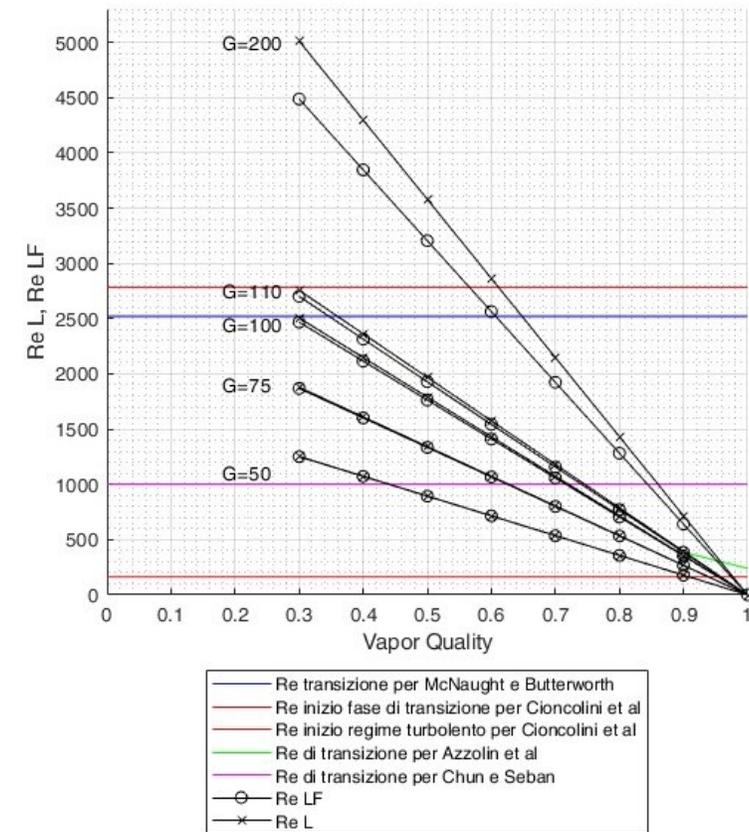
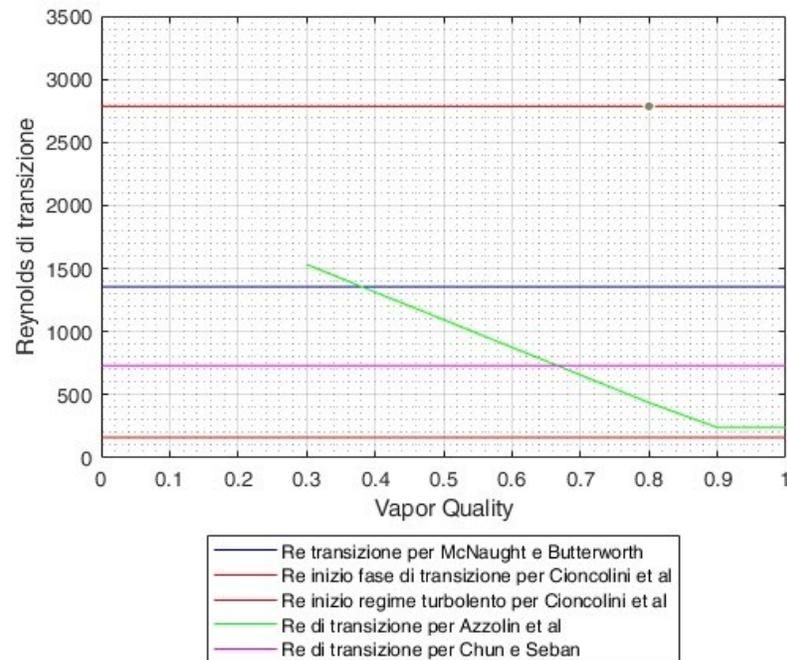


Grafico di transizione per R32





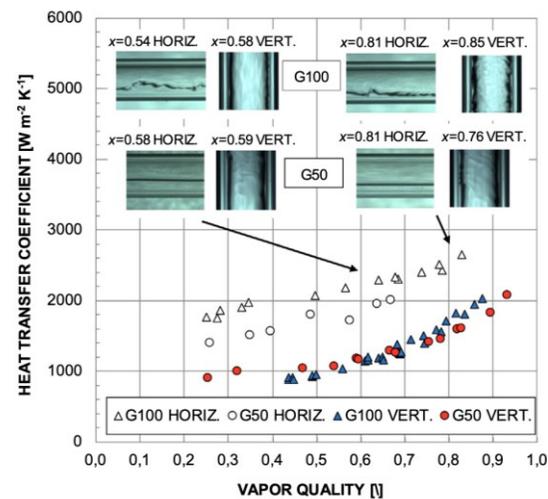
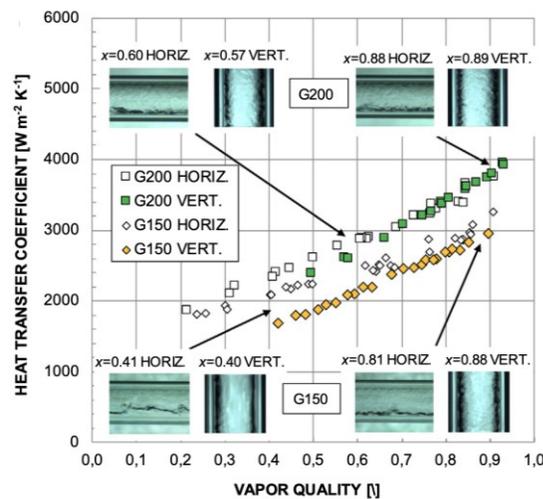
Confronto tra i metodi:

- L'unico metodo per cui il valore di transizione varia con x è quello di Azzolin et al.
- Il metodo Cioncolini prevede una fascia di transizione troppo ampia, non in accordo con i dati sperimentali
- I metodi di McNaught e Butterworth e di Chun e Seban visualizzati insieme sembrano fornire una fascia di transizione più accurata di quella di Cioncolini

I metodi servono allo sviluppo delle correlazioni per il coefficiente di scambio termico. Forniscono informazioni su quando bisogna cominciare a tener conto della turbolenza nelle equazioni.

Sviluppi futuri:

- Database di dati sperimentali per il caso di condensazione in downflow;
- Confrontare i risultati che si ottengono con canali orizzontali rispetto ai canali verticali;
- Capire quale refrigerante può sostituire R134a nelle applicazioni, in modo da avere un ridotto impatto ambientale;
- Sviluppare studi del comportamento del fluido in condizioni di micro-gravità per l'utilizzo di questa tecnologia nelle missioni spaziali.



- Azzolin Marco, Stefano Bortolin, e Davide Del Col. «Convective Condensation at Low Mass Flux: Effect of Turbulence and Tube Orientation on the Heat Transfer». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 144 (dicembre 2019): 118646. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118646>.
- Berto Arianna, Pascal Lavieille, Marco Azzolin, Stefano Bortolin, Marc Miscovic e Davide Del Col. «Liquid Film Thickness and Heat Transfer Measurements during Downflow Condensation inside a Small Diameter Tube». *International Journal of Multiphase Flow* 140 (luglio 2021): 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103649>.
- Cioncolini Andrea, Davide Del Col, e John R. Thome. «An Indirect Criterion for the Laminar to Turbulent Flow Transition in Shear-Driven Annular Liquid Films». *International Journal of Multiphase Flow* 75 (ottobre 2015): 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.05.002>.
- D’Alessandro Valerio. «MODELLAZIONE DELLA TURBOLENZA: INTRODUZIONE ALLE TECNICHE NUMERICHE “RANS” E “LES”», s.d.
- Da Riva, Enrico, Davide Del Col, Suresh V. Garimella, e Alberto Cavallini. «The Importance of Turbulence during Condensation in a Horizontal Circular Minichannel». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, fasc. 13–14 (giugno 2012): 3470–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.026>.
- Gou Junli, Baojing Wang, e Jianqiang Shan. «Development of an Analytical Model for Pure Vapor Downflow Condensation in a Vertical Tube». *Nuclear Engineering and Design* 320 (agosto 2017): 346–60. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.05.032>.
- Kanatani Kentaro. «The Characteristics of Laminar Film Condensation of Pure Vapor Flow in a Vertical Tube». *Chemical Engineering Science* 276 (luglio 2023): 118797. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118797>.
- O’Neill Lucas E., R. Balasubramaniam, Henry K. Nahra, Mohammad M. Hasan, Jeffrey R. Mackey, e Issam Mudawar. «Identification of Condensation Flow Regime at Different Orientations Using Temperature and Pressure Measurements». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 135 (giugno 2019): 569–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.133>.
- O’Neill Lucas E., e Issam Mudawar. «Review of Two-Phase Flow Instabilities in Macro- and Micro-Channel Systems». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 157 (agosto 2020): 119738. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119738>.
- Qiu Yue, Hyoungsoon Lee, e Chirag R. Kharangate. «Computational Investigation of Annular Flow Condensation in Microgravity with Two-Phase Inlet Conditions». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 118 (novembre 2020): 104877. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104877>.
- Serizawa Akimi, Ziping Feng, e Zensaku Kawara. «Two-Phase Flow in Microchannels», s.d.
- Shah, Mirza M. «Comprehensive Correlations for Heat Transfer during Condensation in Conventional and Mini/Micro Channels in All Orientations». *International Journal of Refrigeration* 67 (luglio 2016): 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.03.014>.
- Sikora Małgorzata, Stanisław Anweiler e Josua Meyer. «Comprehensive Analysis of Two-Phase Liquid-Gas Flow Structures in Varied Channel Geometries and Thermal Environments». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 228 (agosto 2024): 125665. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125665>.
- “Lezioni di Fisica Tecnica”, Pierfrancesco Brunello, Seconda Edizione, 2022
- “Aerodinamica”, Giorgio Graziani, Quarta Edizione, 2018
- <https://www.energy.kth.se/applied-thermodynamics/key-research-areas/heating-systems/low-gwp-news/kort-om-r1234ze-1.561807>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/k-epsilon-model>