

# Ebollizione in convezione forzata in condizioni di microgravità

**GIAN PIERO CELATA  
ANNUNZIATA D'ORAZIO  
MARCO GERVASI  
ALBERTO LATTANZI  
LUCA SIMONETTI  
GIUSEPPE ZUMMO**

**ENEA**  
UTS Fonti di Energia e Cicli  
Energetici Innovativi

studi & ricerche

L'ebollizione in convezione forzata, utilizzata nella produzione di energia e nell'industria di processo, viene ritenuta interessante anche per i satelliti per telecomunicazione e le piattaforme spaziali, dove occorrono sistemi di raffreddamento più sofisticati e in grado di rimuovere elevate quantità di calore

## Forced-convection boiling under microgravity conditions

### Abstract

*ENEA, together with the Energy Thermofluid Dynamics Institute of the Innovative Energy Sources and Cycles UTS, has started a research project, funded by ASI, ESA and Snecma Moteurs, on forced-convection boiling under microgravity conditions.*

*The project, funded by the Italian and European Space Agencies and Snecma Moteurs, aims to characterize the thermofluid dynamics of forced-convection boiling in pipes under microgravity conditions, in order to determine the project conditions for tow-phase-cooled space equipment.*

*As a rule, microgravity conditions produce an increase in bubble size, and this change in bubble geometry goes together with a deterioration in heat-exchange conditions. The influence of gravity on heat exchange lessens as coolant speed and the quantity of steam in the outflow channel increase. The analysis of the effect of gravity on bubble geometry square with the findings on heat exchange. The rebathing of walls at high temperature is strongly influenced by the level of gravity. Compared with gravity conditions on earth, speeds are up to four times less*

L'ebollizione in convezione forzata si incontra in molte applicazioni, quali ad esempio la produzione di energia, l'industria di processo ecc.). Recentemente la satellistica spaziale ha presentato una serie di problematiche la cui soluzione potrebbe essere rappresentata dall'utilizzo dell'ebollizione in convezione forzata. Negli anni futuri, le aspettative per i sistemi spaziali, come i satelliti per telecomunicazione e le piattaforme spaziali 'abitate' dall'uomo (Stazione Spaziale Internazionale) cresceranno rapidamente. L'aumento delle prestazioni comporterà inevitabilmente un corrispondente aumento delle potenze termiche in gioco. Conseguentemente, sarà necessario progettare sistemi di raffreddamento più sofisticati ed in grado di rimuovere elevate quantità di calore. D'altra parte, i sistemi termici basati sul raffreddamento in monofase, senza cambiamento di fase del fluido refrigerante, sono vicini alla loro massima capacità termovettrice, e non saranno più in grado di soddisfare ulteriori aumenti di potenza da asportare.

Una strada da percorrere per asportare maggiori quantità di calore, per andare incontro alle nuove sfide spaziali, è quella di progettare sistemi di raffreddamento che operano con cambiamento di fase (ebollizione di fluidi), specie in convezione forzata (ovvero con il fluido in movimento), almeno sotto certe condizioni e/o in alcuni componenti del sistema. Sistemi caratterizzati dal refrigerante in condizioni di ebollizione in convezione forzata, particolarmente efficienti perché sfruttano il trasporto del calore latente di vaporizzazione, sono perciò molto importanti per ridurre la dimensione ed il peso di piattaforme spaziali e di satelliti. Tali sistemi risultano essenziali per i reattori nucleari spaziali richiesti per le missioni spaziali di lunghissima durata, ma anche per il material processing ed i life support systems in condizioni di microgravità.

Occorre anche dire che, qualora si abbia a che fare invece con un sistema di raffreddamento in monofase liquido, un eventuale transitorio incidentale porterebbe inevi-

tabilmente all'ebollizione del liquido. È evidente come la gestione del transitorio incidentale richieda una conoscenza appropriata della fenomenologia dell'ebollizione in condizioni di microgravità.

L'ENEA, con l'Istituto di Termofluidodinamica Energetica, ha iniziato un progetto di ricerca per la completa caratterizzazione termofluidodinamica dell'ebollizione in convezione forzata all'interno di tubi in condizioni di microgravità, grazie ai finanziamenti ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e Snecma Moteurs (industria aerospaziale francese), e ad un progetto triennale ESA (Agenzia Spaziale Europea) iniziato il 1° ottobre 2004. L'impianto sperimentale denominato MICROBO (MICROgravity BOiling) è stato realizzato e caratterizzato a terra, e la prima campagna sperimentale in microgravità è stata effettuata nel mese di ottobre 2004.

### Generalità delle problematiche

Sebbene i meccanismi di ebollizione siano stati largamente e lungamente investigati in condizioni di gravità terrestre, la comprensione della termofluidodinamica dell'ebollizione, specie in convezione forzata, in condizioni di microgravità è molto scarsa. In particolare, in convezione forzata, la dimensione delle bolle in condizioni di microgravità tende ad essere più grande di quanto non siano a gravità terrestre, in quanto il distacco della bolla dalla parete scaldante è dovuto alla sola forza di trascinamento per l'ovvia assenza della spinta di galleggiamento.

È evidente che tale effetto tenderà a diminuire al crescere della velocità del fluido, in quanto ad alte velocità la forza di trascinamento può essere predominante rispetto alla forza di galleggiamento e rendere ininfluyente quest'ultima (e quindi ininfluyente l'effetto della gravità).

La conoscenza di questi limiti di velocità (velocità di soglia), che dipende anche dalla geometria delle tubazioni e dalla quantità di vapore presente, è fondamentale per l'eventuale progettazione di un sistema in con-

dizioni operative indipendenti dalla gravità, ovvero per rendersi conto che l'assenza di gravità richiede una progettazione basata sulle conoscenze della fenomenologia dell'ebollizione in microgravità.

La maggiore dimensione delle bolle, qualora il sistema operi con una velocità del fluido refrigerante inferiore a quella di soglia, può dar luogo a coalescenza di bolle che a sua volta può ritardare la ricondensazione del vapore nel fluido. Questo può avvenire nei sistemi in ebollizione sottoraffreddata (molto comuni per la loro elevata efficienza termica), ovvero caratterizzati da una temperatura media del fluido refrigerante inferiore al valore di saturazione, ma localmente – sulla parete scaldante – con una rilevante attività di ebollizione. Ciò dà spesso luogo ad una degradazione delle prestazioni termiche, fino all'insorgere della crisi termica, che rappresenta il parametro limitante di questi sistemi di raffreddamento (per ulteriori informazioni sulla crisi termica si veda il riferimento<sup>1</sup>), e la cui insorgenza interrompe l'efficacia del sistema di refrigerazione, con tutte le conseguenze relative, inclusa la possibile rottura per surriscaldamento termico dei materiali da raffreddare.

Un diverso valore della frazione di vuoto nel deflusso, ovvero dell'area di passaggio nel canale di refrigerazione occupata dalla fase vapore (dovuto alla diversa dimensione delle bolle in condizioni di microgravità), altera anche il flow pattern ovvero la distribuzione delle fasi vapore e liquido all'interno del canale. Una corretta conoscenza del flow pattern è essenziale ai fini di una corretta predizione dello scambio termico, delle perdite di carico e dell'insorgenza della crisi termica.

Allo stato attuale le conoscenze di quanto riportato sopra (velocità di soglia, flow pattern, scambio termico, crisi termica, perdite di carico ecc.) sono molto limitate per l'ebollizione in convezione forzata (il metodo più efficace di refrigerazione). I pochissimi risultati disponibili sono molto sparsi e soprattutto contraddittori. Ciò è dovuto alle ridotte opportunità disponibili per effettuare prove

di ebollizione in convezione forzata (voli parabolici, drop tower, razzi vettori, e stazione spaziale internazionale), alla difficoltà di gestire un esperimento con circolazione di fluido nelle condizioni di microgravità, alle ridotte disponibilità di potenza termica, di spazio e di peso nelle varie facilities sperimentali, al costo elevato di tali ricerche. Un'esauriente panoramica di queste problematiche può essere fornita da<sup>2-6</sup>.

Un altro aspetto di rilevante interesse per la propulsione aerospaziale riguarda il quenching di pareti a temperatura molto maggiore di quella del fluido. In particolare, riveste importanza il problema del chilling di combustibili criogenici, quali l'ossigeno liquido e l'idrogeno liquido, che vengono utilizzati a temperature di poche decine di gradi Kelvin nei razzi vettori del progetto Ariane V (realizzati dalla Snecma Moteurs). Quando vengono a contatto con pareti metalliche a poche decine di gradi centigradi l'effetto è equivalente a quello di un fluido a temperatura ambiente che impatta contro pareti surriscaldate a qualche centinaio di gradi (rewetting). Questo aspetto della ricerca è di specifico interesse della Snecma Moteurs che ha bisogno di sperimentazione ad hoc per conoscere il comportamento della fenomenologia in assenza di gravità.

### Facilities sperimentali disponibili

Condizioni di microgravità nell'ambito delle quali eseguire le prove necessarie sono ottenibili con diverse apparecchiature sperimentali: volo parabolico, sounding rockets, drop towers, capsule orbitanti, stazione spaziale internazionale (ISS).

Il volo parabolico, effettuato con aerei commerciali opportunamente modificati, consente di ottenere circa 20 secondi di gravità ridotta ( $10^2$  g), anche se con rilevanti oscillazioni del valore della gravità intorno al valore sopra riportato. Questo fenomeno, noto come g-jitter, è abbastanza deleterio quando si esegue sperimentazione in pool boiling, ma è invece ininfluenza nelle prove

di ebollizione in convezione forzata. In Europa i voli parabolici vengono effettuati utilizzando un Airbus A-300 gestito dalla Società Francese Novespace e finanziato dall'ESA, Agenzia Spaziale Europea. Questo aereo è il più grande mai usato per voli parabolici, ed è in grado di ospitare 12-14 esperimenti a bordo (in funzione delle loro dimensioni) con oltre 50 sperimentatori, giornalisti e personale di sicurezza.

La possibilità di avere ricercatori a bordo e la durata ragionevole delle condizioni di microgravità rendono il volo parabolico il primo approccio utile per la sperimentazione di ebollizione in convezione forzata. Attualmente l'aereo della Novespace esegue tre campagne sperimentali all'anno per l'ESA, aperte a progetti europei, due per il CNES, Agenzia Spaziale Francese, riservati a progetti francesi, ed una o due per l'Agenzia Spaziale Tedesca. Una campagna sperimentale consiste in tre giorni di volo parabolico con circa trenta parabole eseguite ogni giorno.

L'utilizzo di razzi, sounding rockets, consente di ottenere fino a 750 secondi di microgravità (razzo MAXUS in Europa) affetta da un bassissimo valore del g-jitter.

Ovviamente l'esperimento è unmanned e l'apparecchiatura sperimentale deve essere molto compatta e completamente automatizzata, con conseguenti limitazioni per esperimenti di ebollizione in convezione forzata. Le opportunità di sperimentazione sono molto ridotte e comunque limitate a progetti specifici.

Condizioni di microgravità possono anche essere ottenute con le drop tower dove una capsula contenente gli esperimenti viene fatta cadere in caduta libera realizzando alcuni secondi di microgravità. La drop tower di ZARM a Brema, dopo la chiusura di quella giapponese del JAMIC vicino Sapporo, attualmente consente la maggior durata delle condizioni di microgravità fino a poco meno di 10 secondi. Anche in questo caso l'esperimento è unmanned, la durata delle condizioni di microgravità è assai limitata per

esperimenti di ebollizione in convezione forzata, la cui gestibilità, senza operatore, è assai ridotta.

Capsule orbitanti, come la russa FOTON, possono ospitare piccoli laboratori per esperimenti di microgravità, quali il FluidPac (Fluid Physics Facility) che, inizialmente concepito per osservazioni di tensione superficiale e fenomeni termici lungo l'interfaccia liquido-gas, può anche essere usato per diversi esperimenti di fisica dei fluidi, inclusa l'ebollizione. La piattaforma ospita 13 diversi diagnostic tools e fino a 4 container sperimentali possono esservi alloggiati e operati contemporaneamente. La missione orbitale dura 15 giorni e i dati sperimentali possono essere memorizzati a bordo e parzialmente inviati a terra per telemetria. Nel corso del 2005 è previsto un lancio con 4 esperimenti di fisica dei fluidi, di cui uno relativo al pool boiling in presenza di campi elettrici (che sembrano poter compensare l'assenza di gravità nella dinamica delle bolle). Anche in questa facility sperimentale test di ebollizione in convezione forzata trovano spazio con grande difficoltà.

La più promettente facility europea per esperimenti in bifase (ebollizione e condensazione) è la Fluid Science Laboratory (FSL), che sarà alloggiata nel laboratorio europeo Columbus a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

La FSL è una facility multi-user per effettuare ricerca di fisica dei fluidi in condizioni di microgravità, e può operare in modo completamente automatico oppure solo parzialmente automatico, potendo essere controllata a bordo dagli astronauti dell'ISS, oppure da terra attraverso il cosiddetto telesciences mode. La FSL è equipaggiata con una ricca disponibilità di strumentazione molto avanzata (telecamere high-speed ed infrarosso, particle image velocimetry, traccianti a cristalli liquidi, interferometria ecc.). È evidente che la FSL rappresenta l'obiettivo a lungo termine per una completa e definitiva sperimentazione sull'ebollizione in convezione forzata.

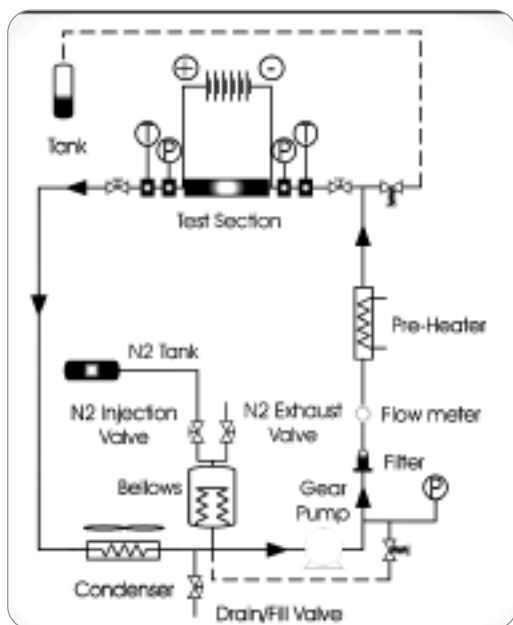
## Il Progetto ENEA e l'impianto MICROBO

L'Istituto di Termofluidodinamica dell'ENEA ha iniziato da alcuni anni una ricerca sull'ebollizione in convezione forzata in tubi di piccolo diametro (da 1 a 6 mm) con l'obiettivo di caratterizzarne il comportamento termofluidodinamico in condizioni di microgravità. Lo scopo del progetto è quello di colmare, almeno in parte, le lacune conoscitive descritte in precedenza per le applicazioni spaziali già discusse. Dopo un programma di ricerca biennale con ASI, che ha consentito di realizzare l'apparecchiatura sperimentale, l'attività di ricerca è iniziata con un finanziamento della Snecma Moteurs, e proseguirà con un Progetto triennale dell'ESA, che vede coinvolti oltre l'ENEA, l'Università della Provenza a Marsiglia, l'Ecole Centrale de Paris, l'Università Libera di Bruxelles, l'Università di Pisa, l'ETH di Zurigo, l'Università di Darmstadt e il CEA di Parigi. Al progetto collaborano anche alcune industrie europee, tra cui la Snecma Moteurs (anche finanziariamente) con specifico riferimento alle attività dell'ENEA che coordina, nel Progetto ESA, le attività sull'ebollizione in convezione forzata, cui collaborano anche l'ETH di Zurigo, l'Università Libera di Bruxelles e l'Università della Provenza a Marsiglia. Gli altri partner, oltre all'Università della Provenza, si occupano del pool boiling, attività coordinata dall'Università di Darmstadt. Tra gli obiettivi del Progetto, oltre allo svolgimento dell'attività di ricerca, c'è anche la definizione di una proposta di ricerca sull'ebollizione per la Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Come già detto, l'ENEA, grazie a un finanziamento dell'ASI, ha realizzato un impianto sperimentale per prove di ebollizione in convezione forzata in volo parabolico. L'impianto, denominato MICROBO (MICROgravity BOiling), è progettato per essere installato a bordo dell'Airbus A-300 della Novespace e rappresenta l'unico impianto oggi disponibile in Europa, e tra i pochi al mondo, per esperimenti di questo tipo. La sua progettazione

è molto spinta ed è caratterizzata da soluzioni di alto livello tecnologico. In particolare, deve resistere ad un'accelerazione massima di 9g, e deve essere caratterizzato da un livello di affidabilità altissimo.

L'affidabilità massima ha una motivazione duale. Da un lato l'affidabilità dell'impianto è richiesta per motivi di sicurezza a bordo dell'aereo. Quest'ultimo opera in condizioni estreme durante il volo parabolico e, ovviamente, non è consentita alcuna perdita di refrigerante dall'impianto né altri incidenti che possano mettere a repentaglio l'incolumità dei passeggeri e la sicurezza del volo. La parte di piping contenente il fluido sperimentale è soggetta ad un sistema di doppio contenimento che prevenga ogni possibile problema sopra descritto. L'affidabilità dell'impianto è necessaria anche dal punto di vista tecnico. Viste le limitate opportunità di volo (tre campagne sperimentali all'anno, con tre giornate di volo a campagna, ciascuna di trenta parabole) e considerate le molte richieste per accedervi e gli alti costi associati (le campagne sperimentali durano circa due settimane tra preparazione pre-volo, preparazione dell'esperimento sull'aereo e giornate di volo), la perdita di ogni parabola rappresenta una significativa perdita di denaro e di opportunità sperimentale che ritarda il raggiungimento degli obiettivi del progetto.

L'impianto deve anche essere altamente automatizzato per consentire ai ricercatori ENEA presenti sull'aereo di operare con la tempistica più breve, visti i tempi ridottissimi a disposizione durante l'esecuzione delle varie parabole. Altri vincoli di progettazione molto stringenti riguardano la compattezza ed il peso, e la disponibilità molto limitata di potenza termica a bordo dell'aereo, che hanno obbligato a soluzioni ad hoc per rientrare nei criteri progettuali dati dalla Novespace e dall'autorità di sicurezza al volo francese (le campagne sperimentali partono dall'aeroporto di Bordeaux). Tutti i componenti richiedono specifici fissaggi che consentano di sopportare i 9g richiesti dalle specifiche di progettazione.



**Figura 1**  
Schema dell'impianto  
MICROBO

Uno schema di massima dell'impianto MICROBO è riportato in figura 1, mentre la figura 2 riporta una foto dell'impianto già montato a bordo dell'Airbus A-300, con i tre ricercatori che hanno volato durante l'esecuzione della campagna sperimentale del 26-



**Figura 2**  
Foto dell'impianto  
MICROBO a bordo  
dell'Airbus A-300

28 ottobre 2004. L'impianto consiste fondamentalmente di una pompa (portata massima 500 ml/min), un filtro, due misuratori di portata, un preriscaldatore elettrico, la sezione di prova (dove avviene l'ebollizione del

fluido), il condensatore. La pressurizzazione dell'impianto è ottenuta con azoto. La pressione massima dell'impianto è 6 bar, limitata a circa 2 bar per le prove con sezioni di prova in pirex. In quest'ultimo caso (sezione di prova utilizzata nella campagna sperimentale di ottobre 2004), la temperatura massima della parete del pirex è di 230 °C, mentre quella massima del fluido usato (FC-72, avente una densità pari a circa 1,8 quella dell'acqua, ma un calore latente di circa un decimo) è di 90 °C. La potenza termica disponibile a bordo dell'aereo è di 150 W per il preriscaldatore elettrico e di 180 W per la sezione di prova. Le dimensioni dell'impianto sono 66 cm x 194 cm x 54 cm, mentre il suo peso totale è di 210 kg. La sezione di prova in pirex utilizzata nella prima campagna sperimentale è riportata in figura 3, mentre uno schema della posizione delle microtermocoppie di parete è riportato in figura 4. Il diametro interno è di 6,0 mm e la sua lunghezza riscaldata è di 165 mm. Il fluido è riscaldato tramite il riscaldatore a filo avvolto intorno al tubo, al fine di consentire la visualizzazione del processo di ebollizione all'interno della sezione di prova. Sulla superficie esterna sono applicate 15 microtermocoppie, sviluppate presso l'ENEA, per la misurazione della temperatura esterna della parete, ai fini della valutazione dei coefficienti di scambio termico. La sezione di prova consente di effettuare riprese filmate del fenomeno per la valutazione del flow pattern. Nel corso del triennio delle attività del Progetto, che prevede da quattro a sei voli parabolici con l'impianto MICROBO, verranno effettuati test con sezioni di prova da 1, 2, 4, e 6 mm di diametro interno, sia di pirex che di acciaio inossidabile (queste ultime per una più accurata valutazione del trasferimento del calore). Verrà analizzato in dettaglio lo scambio termico in ebollizione in convezione forzata sia satura che sottoraffreddata, con la valutazione della velocità di soglia in funzione della geometria della tubazione e delle condizioni termoidrauliche del fluido refrigerante. Verrà effettuata un'accurata mappatura del flow pattern

in microgravità oltre alla determinazione delle condizioni di crisi termica.

Prove specifiche saranno anche dedicate all'analisi del quenching di pareti ad alta temperatura.

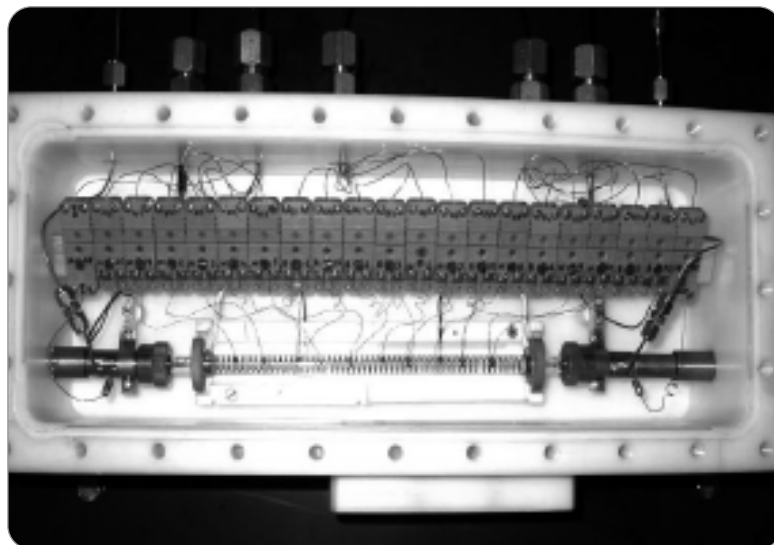
## Il volo parabolico

Come già detto, il volo parabolico viene effettuato a bordo di un Airbus A-300, riportato in figura 5, gestito dalla Novespace per conto dell'ESA e del CNES.

Una descrizione del raggiungimento dei diversi livelli di gravità ottenuti a bordo dell'aereo sono descritti in figure 6 e 7.

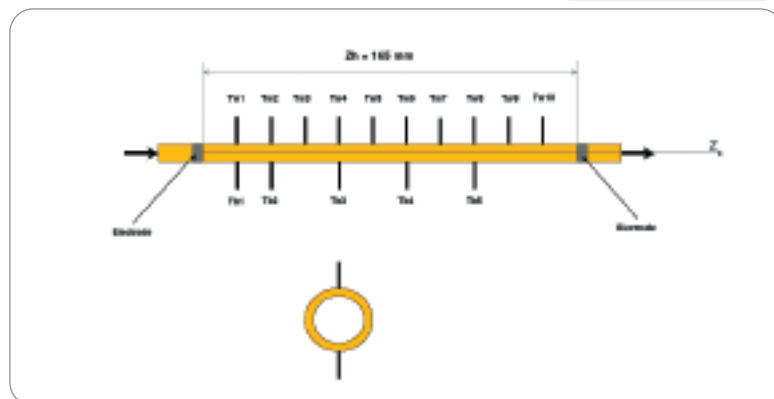
Durante la fase di salita e di discesa della parabola (figura 6), quando la concavità della curva che l'aereo percorre è rivolta verso l'alto, la forza centrifuga dovuta al moto non uniforme dell'aereo è diretta parallelamente alla componente della gravità lungo l'asse ortogonale al piano dell'aereo, cui si riferisce anche la portanza delle ali, opposta alla gravità. Pertanto, in queste due fasi della parabola la risultante lungo l'asse normale al piano dell'aereo risulta superiore addirittura alla gravità terrestre e varia da 1,5 a 1,8 g. Da notare che queste condizioni sono particolarmente critiche per l'organismo umano e possono facilmente provocare mal d'aereo se il passeggero si muove troppo rapidamente (i passeggeri sono trattati con farmaci specifici per ridurre questo problema). Durante queste fasi sia il raggio di curvatura che la velocità dell'aereo variano continuamente per mantenere condizioni di gravità il più possibile costanti. Le forze agenti sull'aereo secondo l'asse del piano di calpestio dell'aereo sono l'attrito (resistenza dell'aria) e la spinta dei motori, e non prendono parte alla definizione delle condizioni di gravità.

Nella parte alta della parabola (figura 7), quando la concavità della curva seguita dall'aereo è rivolta verso il basso, la forza centrifuga si inverte e quindi va a compensare la componente della forza di gravità ortogonale all'asse orizzontale dell'aereo realiz-



**Figura 3**  
Foto della sezione di prova in pirex usata nella campagna sperimentale di ottobre 2004

zando un livello di gravità molto basso (tipicamente di 0,01g). Anche in questo caso il raggio di curvatura e la velocità dell'aereo variano con continuità per mantenere costan-

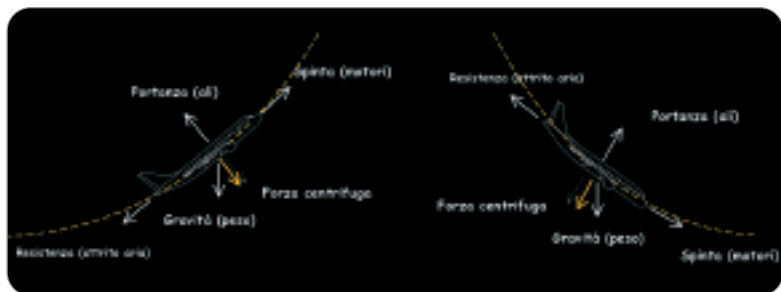


**Figura 4**  
Schema della sezione di prova in pirex usata nella campagna sperimentale di ottobre 2004: posizionamento delle microtermo coppie di parete

te il livello di microgravità. Le oscillazioni del livello di microgravità, g-jitter, dipendono molto dalle condizioni atmosferiche (turbolenza) e dall'abilità del pilota. La figura 8

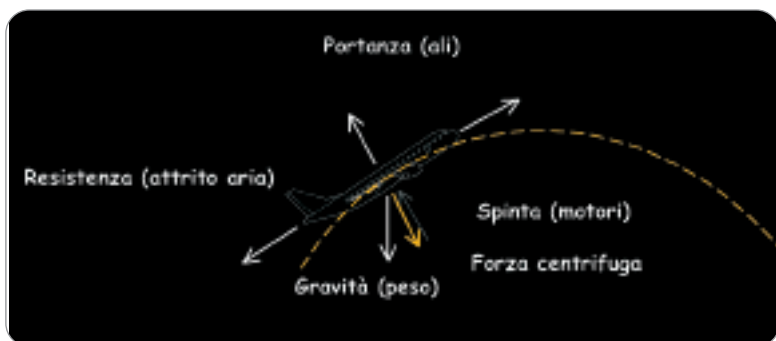


**Figura 5**  
L'Airbus A-300 Zero-g utilizzato per i voli parabolici dell'ESA



**Figura 6**  
Parte iniziale e finale della parabola: condizioni di ipergravità (1,8g)

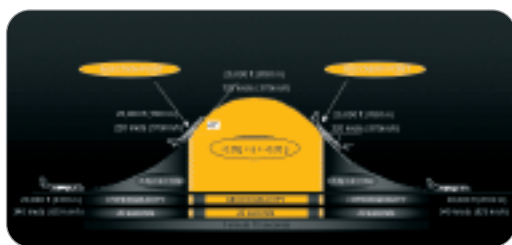
mostra tutti i dati tecnici di una singola parabola. L'aereo parte da una quota di 6100 metri con una velocità di 850 km/h ed inizia la parte ascendente della parabola fino a rag-



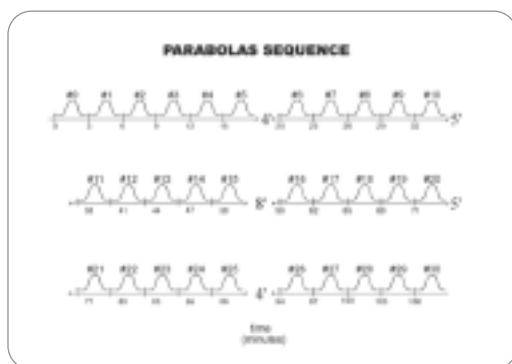
**Figura 7**  
Parte superiore della parabola: condizioni di microgravità ( $10^{-2}g$ )

giungere ad una quota di 7600 metri un angolo di  $47^\circ$  (in decollo un normale aereo di linea si inclina di soli  $18^\circ$ !!!) riducendo la sua velocità fino a 570 km/h. In questa fase, come detto, la gravità è maggiore di quella terrestre, fino a 1,8 g, e la fase dura per 20 secondi.

**Figura 8**  
Parametri di volo durante la parabola



**Figura 9**  
Sequenza delle parabole in una giornata di campagna di volo parabolico a bordo dell'Airbus A-300



Raggiunta questa inclinazione massima (injection point) l'aereo comincia a coprire la parte superiore della parabola dove si realizza per circa 22 secondi le condizioni di assenza di gravità.

La velocità raggiunge il minimo di 370 km/h nel vertice della parabola, ad una quota di 8500 metri, poi ricomincia ad aumentare nella prima fase di discesa della parabola (sempre in condizioni di microgravità).

Al termine della fase di microgravità (recovery point), ai 7600 metri, la velocità torna a 570 km/h con un angolo massimo di  $42^\circ$ .

Dopo questa condizione l'aereo torna alle condizioni di volo livellato scendendo ai 6100 metri e raggiungendo la velocità di 825 km/h. Anche in questa fase (prima di raggiungere la quota di volo livellato) il livello di gravità è maggiore di quello terrestre, fino a 1,8g, per una durata di circa 20 secondi.

Le parabole si susseguono con una frequenza molto serrata, come mostrato nella figura 9.

Mediamente tra due parabole contigue il tempo è inferiore ai due minuti. In questo intervallo dei tempo bisogna portare l'impianto nelle nuove condizioni di prova. Ogni blocco di cinque parabole offre intervalli di tempo più lunghi per consentire variazioni delle condizioni sperimentali che richiedono tempi maggiori.

La durata totale delle parabole in una giornata di volo è di circa due ore.

La sequenza delle parabole mostra chiaramente come le prove sperimentali devono susseguirsi con una rapidità frenetica e stressante (tra l'altro i ricercatori sull'aereo sono fisicamente molto provati dal susseguirsi di condizioni di micro e macrogravità).

Ciò richiede una programmazione molto accurata e spinta delle prove da eseguire che devono essere provate e riprovate a terra al fine di consentire il massimo utilizzo delle parabole disponibili.

Le figure 10 e 11 mostrano i ricercatori ENEA impegnati nella campagna sperimentale in condizioni di macrogravità e microgravità, rispettivamente.



## Risultati sperimentali del primo volo parabolico

La prima campagna sperimentale in volo parabolico (ESA PF38) effettuata dal 18 al 29 ottobre 2004 è stata sponsorizzata dall'ESA (per quanto riguarda il volo parabolico) e dalla Snecma Moteurs per quanto riguarda i costi della missione.

In condizioni di ebollizione, a parte la coalescenza, la dimensione di una bolla di vapore dipende fondamentalmente dal suo valore al distacco dalla parete scaldante. Il diametro di una bolla al distacco, in ebollizione in convezione forzata, dipende dal bilancio di tre forze: la forza di tensione superficiale, che tende a far rimanere la bolla attaccata alla parete, la forza di galleggiamento (legata alla gravità) che tende a staccarla, e la forza di trascinamento (forza di inerzia legata alla velocità del fluido refrigerante) che tende a staccarla. È evidente che in condizioni di microgravità, venendo a mancare la forza di galleggiamento, rispetto ad un'identica situazione con gravità terrestre, il diametro della bolla al distacco è generalmente maggiore. A meno che, già in condizioni di gravità terrestre la velocità del fluido refrigerante sia tale che la forza di trascinamento sia preponderante rispetto al galleggiamento da rendere influente l'eventuale drastica riduzione della gravità. È evidente che questo dipenderà anche dalla pressione di esercizio del sistema (la dimensione di una bolla tende a diminuire al crescere della pressione), dal flusso termico in gioco (effetti di coalescenza e di regimi di deflusso, del tipo a bolle o anulare) e dalla geometria del canale di passaggio (che incide sul regime di deflusso). La dimensione delle bolle influenza la termoidraulica del deflusso sia in termini di perdite di carico che in termini di scambio termico. La conoscenza dei limiti di influenza della gravità su tale fenomenologia risulta determinante per stabilire i criteri di progettazione di sistemi in bifase per applicazioni spaziali. Per condizioni termoidrauliche non influenzate dal livello di gravità la progettazione potrà



Figura 10  
I ricercatori ENEA durante una fase di macrogravità

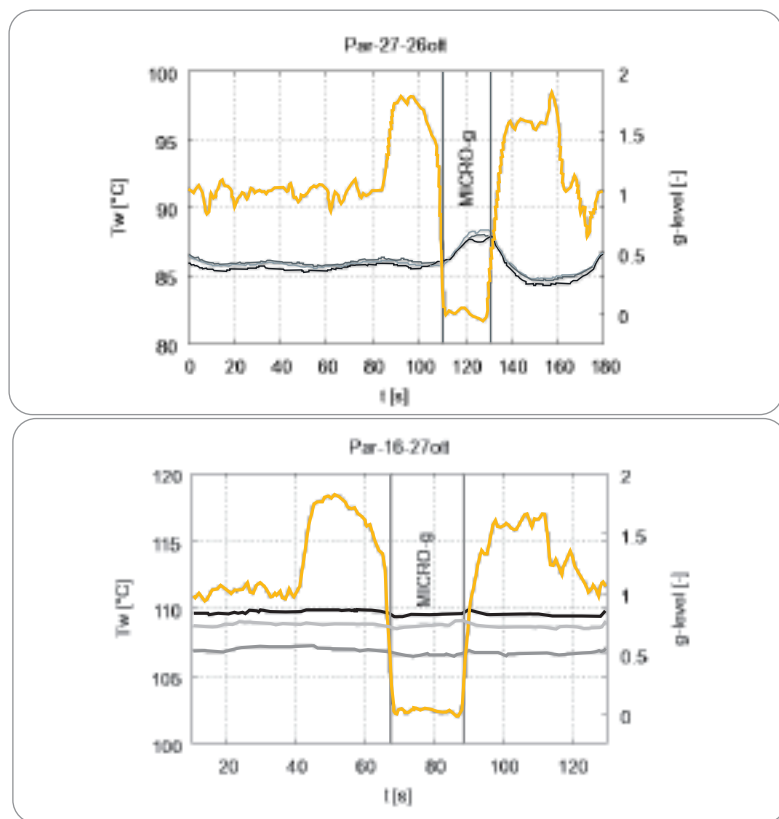
essere eseguita sulla base delle conoscenze a gravità terrestre, mentre per condizioni sensibili al livello di gravità i risultati della ricerca consentiranno di definire dei nuovi criteri per la progettazione di tali sistemi.



Figura 11  
I ricercatori ENEA durante una fase di microgravità

Gli obiettivi della prima campagna sperimentale, dove è stata utilizzata la sezione di prova da 6 mm di diametro interno per 165 mm di lunghezza riscaldata, erano i seguenti:

- verificare la funzionalità dell'impianto MICROBO in condizioni di microgravità;
- eseguire la campagna sperimentale di ebollizione in convezione forzata con tubo da 6 mm;
- visualizzare la dinamica delle bolle;
- determinare le soglie di transizione, in termini di velocità del fluido e quantità di vapo-

**Figura 12**

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per bassi valori della velocità del fluido refrigerante (portata specifica 47,5 kg/m<sup>2</sup>s, equivalenti a circa 6 cm/s; flusso termico,  $q'' = 10200 \text{ W/m}^2$ , titolo di vapore,  $x = -0,05$ , pressione di uscita,  $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$ , sottoraffreddamento in ingresso  $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$ )

**Figura 13**

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per alti valori della velocità del fluido refrigerante (portata specifica 439 kg/n<sup>2</sup>s, equivalenti a circa 55 cm/s; flusso termico,  $q'' = 37400 \text{ W/m}^2$ , titolo di vapore,  $x = -0,08$ , pressione di uscita,  $p_{\text{out}} = 016 \text{ MPa}$ , sottoraffreddamento in ingresso  $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$ )

re presente, oltre le quali l'assenza di gravità non influenza l'ebollizione;

- quenching di pareti ad alta temperatura. Le prove di quenching (ribagnamento di pareti ad alta temperatura) sono prove specifiche per Snecma Moteurs, di loro interesse per le problematiche di chilling del combustibile (idrogeno ed ossigeno liquidi) utilizzato nel motore VINCI (progetto Ariane V), dovendo verificare l'influenza della gravità sulla velocità di ribagnamento.

L'impianto sperimentale MICROBO ha avuto una funzionalità perfetta in tutte le condizioni di volo ed ha consentito l'esecuzione di 93 prove sperimentali su 93 parabole effettuate nei tre giorni di volo parabolico, di cui 15 di quenching ed il resto di ebollizione.

Di seguito viene riportata una breve descrizione dei principali risultati sperimentali ottenuti nella prima campagna sperimentale.

**Influenza della velocità del refrigerante sull'effetto della gravità nello scambio termico**

I grafici di figura 12 e 13 mostrano l'andamento di alcune termocoppie di parete del-

la sezione di prova (in totale sono 15) al variare del livello di gravità e per due valori della velocità del fluido refrigerante, rispettivamente 6 cm/s per la figura 12 (portata specifica,  $G = 47,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , flusso termico,  $q'' = 10.200 \text{ W/m}^2$ , titolo di vapore,  $x = -0,05$ , pressione di uscita,  $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$ , sottoraffreddamento in ingresso  $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$ ), e 55 cm/s per la figura 13 (portata specifica,  $G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , flusso termico,  $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$ , titolo di vapore,  $x = -0,08$ , pressione di uscita,  $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$ , sottoraffreddamento in ingresso  $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$ ). La traccia del valore del livello di gravità si legge sull'asse 'y' alla destra del grafico. Sono evidenti le due zone di macrogravità (circa 1,8g) prima e dopo la regione di circa 20 s di microgravità. Con riferimento alla figura 12 (bassa velocità, 6 cm/s) le tre termocoppie di parete tracciate mostrano un andamento abbastanza regolare e costante durante il volo livellato (precedente la prima zona di macrogravità) ed anche durante la prima zona di macrogravità. Durante l'intervallo di microgravità le temperature di parete tendono a crescere significativamente indicando (la temperatura del fluido resta costante durante questa fase) che lo scambio termico si riduce con la microgravità. Infatti, se analizziamo l'equazione di bilancio termico  $q'' = h (T_w - T_f)$  dove  $q''$  è il flusso termico ( $\text{W/m}^2$ ),  $h$  il coefficiente di scambio termico ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $T_w$  è la temperatura di parete ( $^{\circ}\text{C}$ ), e  $T_f$  è la temperatura del fluido ( $^{\circ}\text{C}$ ), poiché  $q''$  e  $T_f$  restano costanti durante il periodo di microgravità, l'aumento di  $T_w$  è dovuto ad una riduzione di  $h$ , ovvero ad una degradazione del trasferimento del calore. Nella fase di macrogravità successiva alla microgravità le temperature scendono addirittura al di sotto dei valori precedenti i transitori gravitazionali (effetto dovuto al collasso delle bolle durante la seconda fase di macrogravità), ma l'effetto è transitorio e i valori di temperatura tendono poi a quelli che avevano prima delle variazioni gravitazionali.

Se analizziamo invece la figura 13, dove la velocità del fluido refrigerante è di 55 cm/s (ovvero nove volte maggiore), si può osser-

vare come durante la fase di microgravità le temperature di parete rimangono praticamente costanti durante tutte le fasi del volo. I due casi esaminati si riferiscono a situazioni di scambio termico con titolo di vapore (quantità di vapore presente) praticamente costante e non elevatissimo (condizioni di quasi-saturazione all'uscita della sezione di prova). In queste condizioni e con l'attuale sezione di prova l'influenza della gravità sullo scambio termico scompare quando la velocità del fluido refrigerante supera i 48-50 cm/s.

### Influenza del titolo di vapore sull'effetto della gravità nello scambio termico

Poiché, come detto, l'influenza eventuale della gravità sullo scambio termico dipende anche dalla quantità di vapore presente, alcune prove sono state eseguite in condizioni molto diverse di titolo di vapore (a parità di velocità del fluido refrigerante) per verificare quest'ulteriore dipendenza. Se osserviamo la figura 14, abbiamo le stesse condizioni della prova riportata in figura 12 con l'eccezione del flusso termico, che è  $23.000 \text{ W/m}^2$  invece di  $10.200 \text{ W/m}^2$ , con conseguente incremento del titolo di vapore da  $-0,05$  a  $0,3$ . In queste condizioni di alto titolo anche per velocità del refrigerante molto basse l'influenza della gravità sullo scambio termico risulta trascurabile. Si può ragionevolmente asserire che al di sopra di un titolo di vapore pari a  $0,3$ , l'effetto della gravità è trascurabile indipendentemente dalla velocità del fluido refrigerante.

### Inter-relazione della velocità del fluido e del titolo di vapore sull'effetto della gravità nello scambio termico

Poiché l'effetto della gravità sullo scambio termico abbiamo visto essere dipendente dal valore della velocità e dal titolo di vapore, è importante avere una rappresentazione globale dell'influenza della gravità al variare dei due parametri. La matrice sperimentale eseguita nel corso della campagna sperimentale è stata ideata per ottenere quest'informazione e la relativa rappresentazione globale che lega velocità e titolo di vapore è riportata in figura 15. La linea tratteggiata rap-

presenta la linea di transizione circa l'influenza o meno della gravità sullo scambio termico in funzione di questi due parametri termofluidodinamici.

### Influenza del livello di gravità sulla geometria delle bolle

Si è già detto circa l'influenza della dimensione delle bolle e della loro distribuzione sul trasferimento del calore. È pertanto intuitivo aspettarsi che la dimensione delle bolle in microgravità sia maggiore laddove esiste una differenza marcata in termini di scambio termico, mentre dove lo scambio termico non è influenzato dalla gravità ci si può aspettare un'equivalenza nella geometria delle bolle e nella loro distribuzione.

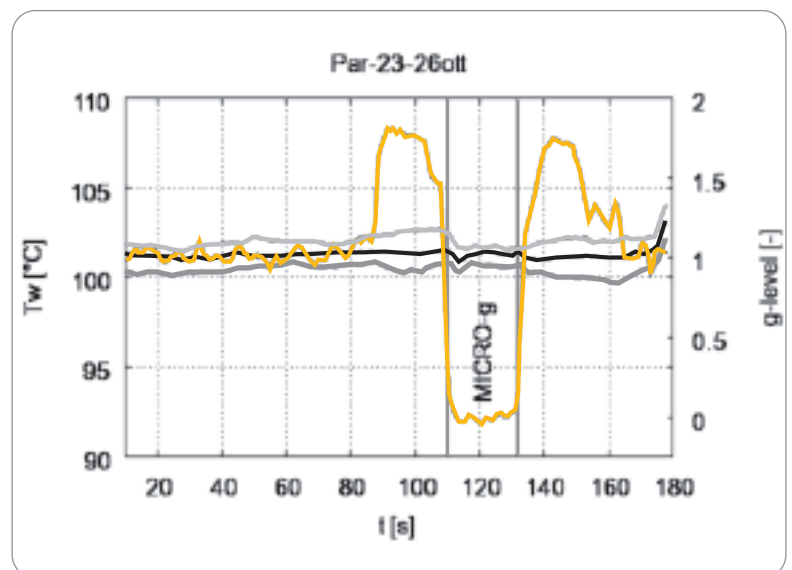
La figura 16 mostra due foto tratte dai filmati ad alta velocità registrati durante l'esecuzione delle prove. La foto in alto si riferisce a condizioni di gravità terrestre (foto presa durante il volo livellato precedente la macrogravità), mentre la foto in basso è relativa a condizioni di microgravità. Le condizioni termofluidodinamiche sono di bassa velocità e basso titolo di vapore ( $G = 96 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , equivalenti a circa  $12 \text{ cm/s}$ ,  $q' = 22.660 \text{ W/m}^2$ ,  $x = -0,06$ ,  $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{\text{in}} = 27,5 \text{ K}$ ).

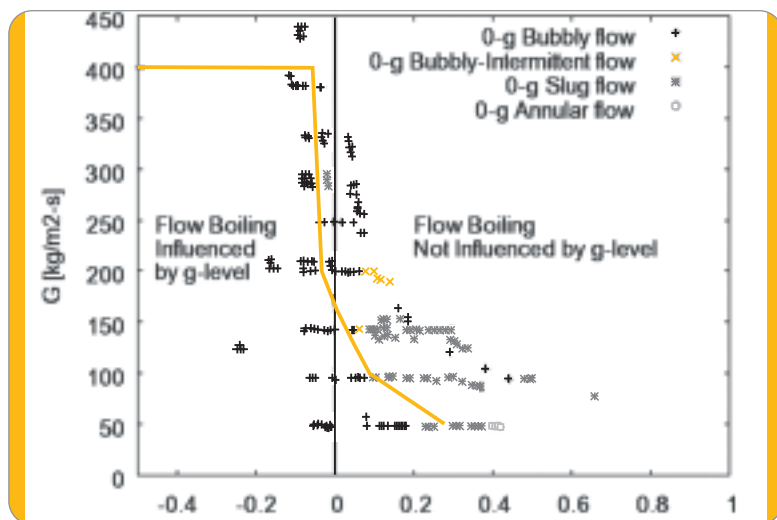
In queste condizioni lo scambio termico è influenzato dal livello di gravità (si riduce al ridursi della gravità).

Si può notare come la dimensione delle bol-

**Figura 14**

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per bassi valori della velocità del fluido refrigerante e titoli di vapore elevato (portata specifica  $47,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , equivalenti a circa  $6 \text{ cm/s}$ ; flusso termico,  $q'' = 23.000 \text{ W/m}^2$ , titolo di vapore,  $x = 0,3$ , pressione di uscita,  $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$ , sottoraffreddamento in ingresso  $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$ )





**Figura 15**  
Mappa 0-g dell'inter-relazione della velocità del fluido refrigerante e del titolo di vapore in merito all'influenza del livello di gravità sullo scambio termico

le in microgravità sia decisamente maggiore di quanto si abbia a gravità terrestre.

Aumentando la velocità del fluido refrigerante (a parità di altre condizioni) fino ai valori per cui la gravità risulta trascurabile per lo scambio termico, la dimensione delle bolle risulta pressoché identica sia per gravità terrestre che in microgravità. Un tipico esempio è riportato in figura 17, dove, analogamente alla figura 16, la foto in alto si riferisce a condizioni di gravità terrestre, mentre la foto in basso è relativa a condizioni di microgravità ( $G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , equivalenti a circa  $55 \text{ cm/s}$ ,  $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$ ,  $x = -0,08$ ,  $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$ ).

In entrambe le condizioni la geometria delle bolle è decisamente simile, confermando i risultati descritti per quanto riguarda lo scambio termico.

#### Influenza del livello di gravità sul quenching

Le prove di quenching sono state effettuate provocando l'asciugamento della parete scaldante mediante deviazione della portata di refrigerante con valvola a tre vie durante la fase di volo livellato e di macrogravità, e riattivando la portata (con circolazione dall'alto verso il basso) nella sezione di prova 'asciugata' e con pareti ad alta temperatura all'inizio dell'intervallo di microgravità. La temperatura di parete è stata portata nelle varie prove a 160, 190, e  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , con varie condizioni termofluidodinamiche, secondo le specifiche Snecma Moteurs.

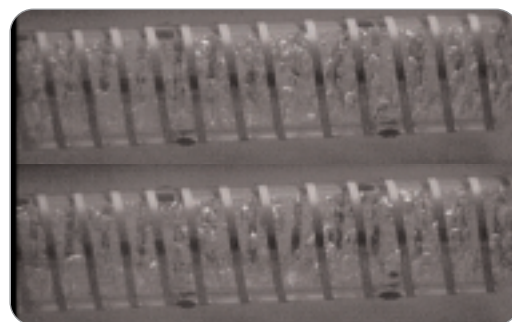
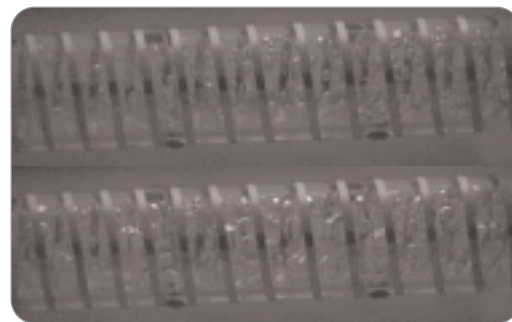
**Figura 17**  
Foto del flow pattern a 1-g (sopra) e 0-g (sotto) per alte velocità e bassi titoli di vapore ( $G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , equivalenti a circa  $55 \text{ cm/s}$ ,  $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$ ,  $x = -0,08$ ,  $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$ )

La figura 18 riporta un tipico andamento per  $T_w = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura di parete, misurata con due termocoppie (tipici andamenti delle 15 termocoppie installate) viene riportata in funzione del tempo. I dati riportati nella figura si riferiscono alla prova effettuata in condizioni di microgravità ed alla prova di riferimento effettuata a terra in condizioni termoidrauliche identiche.

Dalla figura risulta evidente come il ribagnamento della parete asciutta (abbattimento della temperatura di parete seguente la reintroduzione del fluido refrigerante all'interno della sezione di prova) sia notevolmente rallentato in microgravità rispetto ad analoghe condizioni in gravità terrestre. Il ritardo raggiunge nel caso mostrato nella figura i 10 secondi di tempo.

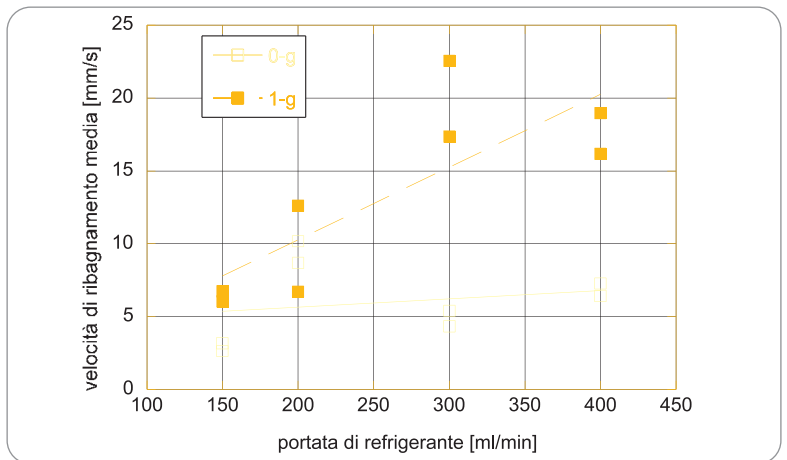
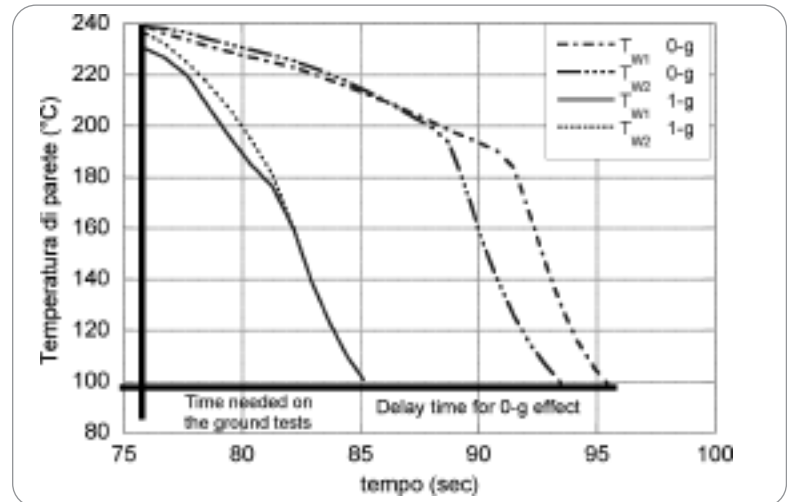
La figura 19 mostra invece l'andamento della velocità di ribagnamento in funzione della velocità del fluido refrigerante in condizioni di microgravità e di gravità terrestre.

Come si può vedere la riduzione della velocità di ribagnamento è davvero drastica passando, alla massima velocità del refrigerante, da un valore di circa  $20 \text{ mm/s}$  a  $5 \text{ mm/s}$ .



## Conclusioni

L'ENEA, con l'Istituto di Termofluidodinamica Energetica dell'UTS Fonti di Energia e Cicli Energetici Innovativi ha iniziato un progetto di ricerca sull'ebollizione in convezione forzata in microgravità, finanziato da ASI, ESA e Snecma Moteurs. L'obiettivo è quello di caratterizzare la termofluidodinamica dell'ebollizione in convezione forzata all'interno di tubi in condizioni di microgravità al fine di determinare le condizioni di progetto per apparecchiature spaziali raffreddate in bifase. Generalmente, le condizioni di microgravità producono un aumento delle dimensioni delle bolle dovuto alla mancanza della forza di gravità nel bilancio di forze per il diametro di distacco della bolla dalla parete (restano la tensione superficiale, adesiva, e la forza di trascinamento, che tende a staccare la bolla). A questa variazione della geometria delle bolle corrisponde un deterioramento delle condizioni di scambio termico. L'influenza della gravità sullo scambio termico tende a diminuire al crescere della velocità del fluido refrigerante ed alla quantità di vapore presente all'interno del canale di deflusso. Per bassi titoli (fino alle condizioni di saturazione all'uscita dalla sezione di prova) l'influenza della gravità può considerarsi trascurabile per velocità del fluido superiore ai 48-50 cm/s. Per titoli elevati, superiori al 30%, l'influenza della gravità sullo scambio termico è di fatto trascurabile indipendentemente dalla velocità del fluido refrigerante. L'inter-relazione velocità del fluido – titolo di vapore ed il relativo effetto sull'influenza della gravità sullo scambio termico è stata quantificata. L'analisi della geometria delle bolle in funzione della gravità si è mostrata in ottimo accordo con i risultati relativi allo scambio termico. Ad alte velocità e bassi titoli di vapore, ad esempio, la geometria delle bolle è di fatto indipendente dalla gravità, mentre per velocità inferiori la microgravità è caratterizzata da bolle di dimensioni maggiori. Il ribagnamento di pareti ad alta temperatura è fortemente influenzato dal livello di gravità. Rispetto alle condizioni di gravità



terrestre si raggiungono velocità fino a quattro volte inferiori.

## Bibliografia

1. G.P. CELATA and A. MARIANI, *Critical Heat Flux, Post-dryout and Their Augmentation*, ENEA, RT/ERG/98/10.
2. H. OHTA, A. BABA and K. GABRIEL, "Review of Existing Research on Microgravity Boiling and Two-Phase Flow. Future Experiments on the International Space Station", *Ann. N.Y. Academy of Sciences*, 974, pp. 410-427, 2002.
3. H. OHTA, *Heat Transfer Mechanisms in Microgravity Flow Boiling*, 974, pp. 463-480, 2002.
4. P. DI MARCO, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: European Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 252-263, 2003.
5. J. KIM, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: US Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 264-271, 2003.
6. H. OHTA, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: Japanese Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 272-285, 2003.

**Figura 18**  
Tipico andamento della temperatura di parete dopo la riattivazione della portata; confronto delle prove in microgravità con prove a terra

**Figura 19**  
Andamento della velocità di ribagnamento media in funzione della portata del fluido refrigerante in condizioni di microgravità e di gravità terrestre