

Horizonte ISDEFE: Espacio. Plataformas suborbitales para despliegues logísticos o acción del Estado

Sánchez Mayorga, Jaime ^{1,*}, Díez Brezmes, Ricardo ^{??}, Sanjurjo-Rivo, Manuel ^{2,*}, Fajardo, Pablo ^{2,*}, Pulido Puerto, Rosa ³, y Mosquera Benitez, Daniel ³

¹ Unidad de Espacio de la Jefatura de C4ISR y Espacio, Subdirección General de Planificación y Programas, Dirección General de Armamento y Material

² Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial

³ ISDEFE

* Autor responsable del trabajo; jsanmay@ea.mde.es manuel.sanjurjo@uc3m.es
pablo.fajardo@uc3m.es

Abstract: En la última década, se han iniciado múltiples proyectos de desarrollo de vehículos suborbitales, fundamentalmente con fines comerciales. La aplicación fundamental de estos vehículos sería la del turismo espacial. En un reciente informe de 2015 de la FAA (Federal Aviation Authority) se analiza el renacimiento comercial de los vehículos suborbitales, de los proyectos existentes y futuros, y de las instalaciones necesarias para su operación. La disponibilidad y proliferación de estos vehículos comerciales abre la posibilidad de su utilización para otros fines diferentes de los meramente comerciales. En particular, se ha planteado en diversas ocasiones la posibilidad de su uso militar. Existen trabajos de la Fuerza Aérea Americana, por ejemplo, en los que se lleva a cabo un análisis pormenorizado de la capacidad de ataque de estos vehículos y su buen comportamiento frente a baterías antiaéreas. Si bien los detalles de estos trabajos son información clasificada, los análisis públicos presentados muestran la posibilidad de transportar alrededor de una 1Tn a una distancia de 10000 km. La posible aplicación no se reduce únicamente a operaciones ofensivas, sino también se ha considerado para el despliegue rápido de tropas. Para hacer viable esta opción sería necesario sacrificar alcance para aumentar la masa transportada. Existen estudios pormenorizados de las actuaciones en misiones similares de carácter comercial. En este trabajo, se exploran las actuaciones de vehículos suborbitales y se analiza, en un primer estudio, el potencial existente en un concepto de empleo como plataforma de transporte logístico, de largo alcance, en tiempos muy inferiores a los de las actuales plataformas de transporte de tropas o material, a zonas de operaciones o la proyección de la acción de Estado, con envíos urgentes, a escenarios de crisis humanitarias o emergencias ante catástrofes naturales. Asociado a este concepto de empleo, se identifican las tecnologías

necesarias para hacer viable el uso de estos vehículos, mejorar sus actuaciones, incorporar mecanismos de toma de tierra o amerizaje en escenarios hostiles o muy restrictivos. Finalmente, se revisarán someramente las posibles implicaciones desde el punto de vista de la legislación aplicable a este tipo de transporte, a sus posibles modos de operación, su relación con su inserción en el espacio aéreo, y por último, una ciertas consideraciones médicas relevantes, respecto de aquellas misiones suborbitales que sean tripuladas.

Keywords:

1. Introducción

Desde el primer vuelo del "Flyer" de los hermanos Wright en 1903, hasta el vuelo del primer avión comercial supersónico, el Concorde.^{en} 1969, se ha apreciado un gran y muy rápido avance, del sector aeroespacial, potenciado en gran medida por los conflictos armados y la necesidad de aplicar nuevas tecnologías. Tal ha sido la transformación, que muchas veces nos preguntamos cómo se volará en el futuro, qué nos quedará todavía por ver.

El objetivo de éste estudio es únicamente el de dar a conocer el desarrollo de un fenómeno emergente, en el sector aeroespacial denominado transporte suborbital.

Consiste en la creación de vehículos suborbitales reutilizables (VSRs, o SRVs en inglés) con aplicaciones en los ámbitos del turismo espacial, la investigación, la tele-observación, el lanzamiento de satélites, entre otras.

El presente artículo pretende plantear el empleo de los SRV,s como plataforma logística de largo alcance que, con una duración aproximada de vuelo de dos horas, sin llegar a ocupar una órbita, alcanzan los 100Km, proporcionan entre uno y cinco minutos de ingravidez en el apogeo del vuelo, y pueden recorrer alrededor de los 20.000 kilómetros.

En EEUU, compañías como Xcor Aerospace?, preparando un avión-cohete llamado Lynx, Blue Origin? (creada por el fundador de Amazon.com?), desarrollando un vehículo llamado New Shepard, Armadillo? (con sede en Texas), con un vehículo denominado Suborbital Space Transport?, SOST y por último Masten Space Systems?, que espera desarrollar un cohete de una sola etapa, llamado XA-0.1, son algunos ejemplos de la capacidad industrial y tecnológica del fenómeno sub-orbital.

En Europa, los proyectos más destacados por el momento eran los cuatro aviones suborbitales de EADS-Astrium, Dassault, Booster, S3, KLM y REL-Skylon, ninguno de los cuales ha pasado todavía de la fase de diseño, y todos los cuales precisan de fuentes de financiación.

Varias empresas privadas norteamericanas, pretenden establecer un puerto espacial en España (Teruel), para soportar operaciones de transporte comercial suborbital, un interés dirigido por los planes de negocio de las compañías americanas, que en Europa, se concentran en Reino Unido, Alemania, y Suecia, además de España.

La situación geográfica de España (su lejanía cercana? al centro de Europa), convierte a nuestro país en un lugar idóneo para servir dichas operaciones de transporte comercial al mercado europeo,

aprovechando nuestras infraestructuras aeroportuarias y haciendo compatible su uso dual: aeropuerto y puerto espacial.

El desarrollo de este tipo de vehículo ha sido motivado por la viabilidad del negocio del turismo espacial. En términos de viabilidad económica, un estudio reciente realizado en julio de 2012 por la consultora ?Tauri Group? por encargo de la FAA, analizaba las perspectivas de mercado a escala mundial en 10 años. Fue presentado al Congreso de los Estados Unidos y se llegó a la conclusión de que los vuelos espaciales podrían convertirse en una industria valorada en 1600 millones de dólares.

La utilización de vehículos suborbitales para operaciones militares se ha propuesto con anterioridad para misiones de combate [REF]. La propuesta de uso para fines logísticos apareció en la década anterior [REF Dinerman]. En el siguiente apartado se detalla el estudio

Existen algunos aspectos relacionados con este tipo de vuelos que no van a ser tratados en este trabajo, tales como la fiabilidad de los vuelos o las consideraciones médicas para misiones tripuladas.

2. Estudios previos

3. Concepto de empleo operativo

Los medios de transporte, como parte esencial del poder aéreo, son clave a la hora de llevar a cabo el despliegue, sostenimiento y repliegue en apoyo de las operaciones militares, en cualquier punto del planeta y con reducidos tiempos de reacción.

Asimismo, los medios militares de transporte aéreo son, en muchas ocasiones, los únicos preparados y equipados para proporcionar capacidad de transporte aéreo intra-teatro, del mismo modo que se articulan cómo los únicos medios que nos permiten proyectar la acción del Estado, a zonas del Planeta a las que resulta imposible acceder de otro modo, o dónde las infraestructuras no permiten despliegues de otro tipo de plataformas.

Los VSO proporcionan una capacidad de transporte, de reciente concepción, permitiendo el transporte logístico, en unos parámetros temporales y de distancia, hasta ahora inusuales, dentro del concepto de empleo del transporte aéreo.

Estos medios pueden operar en escenarios con amenaza variable y poseen capacidad autónoma para aportar un apoyo logístico de extrema rapidez, cubriendo distancias hasta ahora no contempladas en los CONOPS relativos a transporte aéreo, permitiendo actuar en lugares sin pistas preparadas, circunstancias operacionales de toda índole, sin poner en riesgo ningún recurso humano.

3.1. Entorno operacional

La proyección y el sostenimiento de fuerzas militares en zonas de operaciones alejadas del territorio nacional hace necesario establecer un flujo continuo de transporte logístico mediante medios que sean capaces de operar a grandes distancias y con rapidez. Los VSO aportan un valor añadido, al suponer un vector de proyección que baraja tiempos inferiores a dos horas para cubrir más de 5.500 NM, debido a sus especiales circunstancias, en un amplio abanico de misiones, especialmente en las que requieren

un primer aprovisionamiento rápido (catástrofes, crisis sobrevenidas, suministros sin pistas preparadas, etc?).

El uso de los VSO no está previsto en ningún escenario actual, supone una ventaja competitiva considerable, no supone ningún riesgo de interoperabilidad con el resto de usuarios del concepto de empleo del resto de medios de transporte aéreo, por lo que se trata de un medio complementario de proyección, que facilita el desarrollo de tácticas, técnicas y procedimientos comunes de las tripulaciones aéreas y personal de mantenimiento.

3.2. Relación con otros conceptos, capacidades y funciones militares

Este Concepto de Empleo Operativo tiene una estrecha relación con los siguientes conceptos:

- Empleo operativo de las capacidades ?Aircraft Battle Damage Repair? (ABDR).
- Empleo operativo de los ?Tactical Data Link? (TDL).
- Empleo operativo de la Base Aérea de Despliegue (DOB).
- Concepto de Apoyo Logístico del T.23.
- EATC A400M ?ATLAS? Common Concept.

3.3. Capacidades militares

Los VSO se basarán en plataformas de transporte suborbital, con alta capacidad de operación autónoma, aunque dependiente de coordinación para la recuperación de material en zona, concebido para escenarios con todo tipo de amenaza y capacidad de preparación de cargas para todo ambiente. Este sistema de proyección logístico, constituye un complemento de gran valor político y/o estratégico, respecto de la capacidad de movilidad aérea convencional y contribuye a:

- Aerotransporte. - Transporte aéreo logístico (inter e intra teatro) - Operaciones con Fuerzas Navales, de proyección logística. - Operaciones con Fuerzas Terrestres de despliegue logístico. - Operaciones de Cooperación militar ¹. - Otras capacidades (Acción del Estado)

3.4. Proyección suborbital logística

En la categoría de transporte inter-teatro, los VSO facilitarán el despliegue, en ocasiones en las que podría no bastar con el empleo de medios aéreos convencionales operativos, para condiciones más restrictivas de plazos, tiempos y nivel de riesgo, y puede ser recomendable inyectar material en zona, mediante este tipo de vuelos.

Para el sostenimiento de las operaciones se empleará principalmente bajo el concepto de ?Hub and Spoke?, que consiste en establecer un puente logístico desde territorio nacional a una zona de recuperación de carga, con las infraestructuras y servicios adecuados, desde el que se distribuirá todo

¹En ocasiones, las situaciones de catástrofes y/o crisis internacionales surgen con una alta inmediatez, lo que podría requerir del envío de una primera ayuda significativa, de 2 Tn, a las zonas afectadas.

el material y personal a las distintas bases de despliegue (DOB). También se podrá realizar el transporte directamente a/desde una base avanzada determinada sin demasiados apoyos, como pudiera ser el caso de misiones de ayuda humanitaria o envío inicial a personal de inyección inmediata en nuevos escenarios de crisis, como preparación al despliegue posterior.

Dentro de la categoría de transporte intrateatro, el empleo de VSO está encaminado a la ejecución de misiones de transporte suborbital táctico caracterizadas por: reducidos apoyos operacionales, logísticos y de protección de la fuerza, inyección en zonas con amenaza, en zonas incluso sin campos, métodos de entrega especiales (lanzamientos/ apoyo a tomas de asalto), etc. Estas misiones, por sus características, son propias de ser realizadas por medios militares.

Además, su capacidad de realizar aproximaciones autónomas desde el espacio, hacen que la los VSO puedan operar, si la misión lo requiere, en zonas avanzadas, sin necesidad de disponer de ayudas a la navegación o sistemas de comunicación adecuados, excepto los medios de recuperación de carga que este tipo de inyección precise. El método de entrega de la carga dependerá de las condiciones del terreno, infraestructuras, apoyo logístico, así como del entorno operacional y exigencias de la misión.

Finalmente, en empleos propios de cooperación militar y/o acción del Estado, el suministro de ayuda humanitaria desde el espacio, y su posterior inyección en el aire, a zonas rurales de difícil acceso y con núcleos urbanos con poca población, puede hacer recomendable el lanzamiento de cargas por sistema de gravedad con paracaídas y contenedores *low cost* o sin paracaídas, para la fase final del VSO, en las proximidades de la zona de recuperación de carga.

En este escenario, el método de entrega también dependerá de las condiciones del área que requiere este aprovisionamiento de emergencia, así como de los medios terrestres o navales de apoyo al VSO, para la recogida del envío.

4. Marco regulatorio

Con relación al marco regulatorio, las *actividades espaciales* se rigen por el Derecho del Espacio (Tratado General del Espacio Exterior, de la Comisión para Usos Pacíficos del Espacio Ultraterrestre, COPUOS), siendo muy importante señalar que en la operaciones suborbitales, no les es aplicable el Convenio Internacional de Aviación Civil (Convenio de Chicago) que regulan las actividades aéreas, ni siquiera cuando dichos vehículos atraviesan el tramo de espacio aéreo convencional aeronáutico.

La Federal Aviation Administration (FAA) dispone de una unidad administrativa *Office of Commercial Space Transportation*.^{en}cargada de la regulación y la promoción del transporte comercial espacial en USA.

Sería necesario establecer un sistema de licencias que permitiera las actividades espaciales de entes no gubernamentales y la inspección por las autoridades gubernamentales de esas actividades y el cumplimiento de los requisitos técnicos y económicos (financiación y seguros) que se establezcan, sin olvidar la posibilidad de que el Estado fuera reembolsado en caso de haber tenido que indemnizar a terceros.

En nuestro País, a través de la Ley de Actividades Espaciales, sería necesario desarrollar una normativa a nivel nacional, creando un marco regulatorio que garantice la suficiente seguridad jurídica

para el desarrollo de estas actividades espaciales, tal y como ya lo han hecho muchos Países de nuestro entorno, y el establecimiento de un número determinado de licencias, con operadoras nacionales.

No obstante, el empleo como plataforma logística de aplicación para la Acción del Estado, permitiría un marco normativo y regulatorio inicial, sobre el que poder apoyar las operaciones de los vuelos sub-orbitales, para los escenarios descritos en el concepto operativo que se describe a continuación.

Las estaciones/puertos espaciales destinados a soportar estas operaciones, estarían basadas en infraestructuras aeroportuarias adaptadas para una función dual (aeropuerto, puerto espacial) y donde las pistas deberían tener un mínimo de 2500 m, lo que facilitaría un tipo despliegue logístico intermodal, combinando misiones de alto valor político-estratégico, con operaciones de transporte logístico convencional.

5. Desarrollos actuales de sistemas suborbitales

Actualmente existen varios desarrollos de sistemas suborbitales en el mundo, que responden a diferentes diseños. Estos diseños se pueden categorizar en función del tipo de despegue y aterrizaje (vertical u horizontal) y del número de etapas (una o dos). En las siguientes líneas enumeramos algunos de los desarrollos actuales, resumidos en la tabla [TABLA].

En los EEUU, un documento actual de la FAA [REF FAA] enumera las seis compañías que están desarrollando vehículos suborbitales lanzadores reutilizables (SRLVs, en sus siglas en inglés) en la actualidad y puertos espaciales que pueden utilizar en su territorio. Las compañías son Virgin galactic, XCOR Aerospace, Blue Origin, Masten Space Systems.

Existen otros desarrollos, no centrados en la comercialización del servicio, que encajan en la categoría de vehículos lanzadores reutilizables que permitirían tanto la inserción en órbita como el vuelo suborbital. En Europa, la Agencia Espacial Europea (ESA) dispone de un vehículo suborbital de prueba, el Intermediate eXperimental Vehicle (IXV) [1]. Con anterioridad, existió el programa FAST20XX [2], financiado conjuntamente por la ESA y la Comisión Europea (EC). En India, se ha probado con éxito recientemente un vehículo suborbital RLV-TD [3,4] que ha sido concebida como una plataforma de demostración de tecnologías espaciales. En el Reino Unido, la agencia espacial británica, junto con la ESA, han propuesto el desarrollo de Skylon [5,6], un vehículo de una sola etapa, basado en la utilización de motores SABRE [7].

Existen actualmente otros desarrollos dirigidos a obtener lanzadores reutilizables para la inyección en órbita de satélites. Si bien su propósito no es el del vuelo suborbital, variantes de estos sistemas podrían ser adaptados para ello. En este campo, SpaceX [REF] en EEUU, Larga Marcha en China [8] y Ariane [9] en Europa están trabajando en sistemas de recuperación de las primeras etapas de los lanzadores .

Finalmente, en los últimos años, ha habido un interés por el desarrollo de lanzadores de satélites pequeños (cubesats, nanosats, etc) que podrían ser utilizados para vuelos suborbitales de cargas de pago mayores. En este ámbito, citamos las compañías españolas PLD [10] y Zero2infinity [11].

6. Retos tecnológicos

Como se ha visto en el apartado anterior, los sistemas suborbitales son variados, con diseños que difieren de manera significativa entre sí. De la misma manera, existen diferentes tecnologías que

Tabla 1. Compañías proveedoras de servicios de vuelo suborbital y sus SRLV (*) Algunas compañías disponen de varios vehículos o versiones del mismo. En ese caso, la tabla hace referencia al principal

Compañía	Vehículo*	Tipo	Año Vuelo Prueba
Armadillo Aerospace	Hyperion	Despegue Vertical-Aterrizaje Vertical 1 Etapa	2014
Blue Origin	New Shepard	Despegue Vertical-Aterrizaje Vertical 2 Etapas	—
Masten Space Systems	Xaero	Despegue Vertical-Aterrizaje Vertical 1 Etapa	2011
UP Aerospace	SpaceLoft	Despegue Vertical - Aterrizaje Paracaídas 1 Etapa	2006
Virgin Galactic	SpaceShip Two	Despegue Horizontal - Aterrizaje Horizontal 2 Etapas	2010
XCOR Aerospace	Lynx	Despegue Horizontal - Aterrizaje Horizontal 1 Etapa	2012

posibilitan la variedad de sistemas suborbitales. Muchas de ellas son tecnologías maduras implementadas en prototipos de vehículos suborbitales. Para su análisis, estas tecnologías se presentan en cuatro categorías: propulsión, protección térmica, estructura, y GNC (guiado, navegación y control). En este apartado se ha seguido el estudio recogido en [12].

6.1. Propulsión

Los sistemas suborbitales utilizan sistemas de propulsión basados en motores cohete, o motores de alimentación atmosférica. El nivel de madurez de los motores cohete es alta, mientras que el de los sistemas de alimentación atmosférica es más limitada. Los motores cohete utilizados son de propulsión química y pueden clasificarse en líquido, sólido, o híbrido, en función del estado en el que se encuentran el oxidante y el combustible. Una descripción detallada se puede encontrar en los siguientes libros [13, 14]. Por motivos de impacto ambiental, así como de coste, algunos de estos vehículos como el SpaceShip One y el FAST200XX usan propulsante híbrido [2].

Los motores de alimentación atmosférica utiliza el aire de la atmósfera como oxidante del combustible a bordo del vehículo. Entre estos motores se puede encontrar turbo jets, ram jets, scram jets and pulse jets, basados en el principio del motor a reacción. Para una descripción más detallada de estos sistemas para velocidades supersónicas e hipersónicas puede encontrarse, por ejemplo, en [15,16]. Sin embargo, la madurez tecnológica de estos sistemas de propulsión no es tan alta como en el de motores cohete. La visión de la necesaria evolución de estas tecnologías en la década anterior puede consultarse en [17,18]. En la presente década, existen desarrollos relevantes [19] como el relacionado con el motor SABRE mencionado anteriormente [7].

6.2. Protección térmica

La protección térmica es una tecnología crítica para la supervivencia del vehículo suborbital durante la reentrada. Esta afirmación se encuentra trágicamente contrastada con el accidente del Columbia ocurrido en 2003 [20]. Es necesario que el sistema de protección sea mantenible y resista los ciclos de esfuerzo a los que se ve sometido un vehículo reutilizable. Existen distintos mecanismos de protección térmica, entre ellos: heat-sink, refrigeración por radiación, aislamiento, ablación, y refrigeración activa [21,22]. Existe interés en mejorar el conocimiento de la compleja interacción existente entre el vehículo y la atmósfera, para estudiar el posible control de temperatura y trayectoria [23]. Actualmente, los materiales utilizados en el sistema de protección térmica del Shuttle, baldosas cerámicas, son los que ostentan un TRL (Technological Readiness Level, indicador de madurez tecnológica) más elevado (el máximo, 9). No obstante, existen otros materiales, como materiales compuestos carbono-carbono, próximos a ese nivel de TRL [24].

6.3. Estructura

Dentro de este apartado se incluyen los sistemas de soporte a vida

6.4. GNC

7. Conclusiones

Referencias

1. E Zaccagnino, G Malucchi, V Marco, A Drocco, S Dussy, and JP Préaud. Intermediate experimental vehicle (ixv), the esa re-entry demonstrator. In *AIAA guidance, navigation and control conference, Portland, Oregon, 2011*.
2. A. Mack, J. Steelant, H. Adirim, A. Lentsch, M. Marini, and N. Pilz. FAST20XX: Achievements On European Suborbital Space Flight. In *7th European Symposium on Aerothermodynamics*, volume 692 of *ESA Special Publication*, page 36, May 2011.
3. ISRO. India's reusable launch vehicle-technology demonstrator (rlv-td), successfully flight tested. <http://www.isro.gov.in/update/23-may-2016/india%E2%80%99s-reusable-launch-vehicle-technology-demonstrator-rlv-td-successfully>, 2016. Accessed: 2016-05-23.
4. B.N. Suresh. Roadmap of indian space transportation. *Acta Astronautica*, 64(4):395 – 402, 2009.
5. R. Varvill and A. Bond. The SKYLON Spaceplane. *Journal of the British Interplanetary Society*, 57:22–32, 2004.
6. Mark Hemsell, Julio Aprea, Ben Gallagher, and Greg Sadlier. A business analysis of a skylon-based european launch service operator. *Acta Astronautica*, 121:1–12, 2016.
7. Richard Varvill and Alan Bond. A comparison of propulsion concepts for ssto reusable launchers. *Journal of the British Interplanetary Society*, 56:108–117, 2003.

8. Doug Messier. China looks to recover booster stages. <http://www.parabolicarc.com/2014/06/18/china-recover-booster-stages/>, 2014. Accessed: 2014-06-18.
9. Rob Copping. Airbus' adeline project aims to build reusable rockets and space tugs. <https://www.space.com/29620-airbus-adeline-reusable-rocket-space-tug.html?adbid=10152877135861466&adbpl=fb&adbpr=17610706465>, 2015. Accessed: 2015-06-10.
10. PLD. Arion. <http://www.pldspace.com>, 2017. Accessed: 2017-08-01.
11. Zero2Infinity. Boostar. <http://www.zero2infinity.space/boostar/>, 2017. Accessed: 2017-08-01.
12. Simon Adebola, J Antifaev, C Curran, C Desportes, OG Rovira, C Kelly, et al. Great expectations: An assessment of the potential for suborbital transportation. *Masters, International Space University (ISU), Illkirch-Graffenstaden, France*, 2008.
13. G.P. Sutton and O. Biblarz. *Rocket Propulsion Elements*. Wiley, 2016.
14. M. Tajmar. *Advanced Space Propulsion Systems*. Springer Vienna, 2012.
15. William H Heiser and David T Pratt. *Hypersonic airbreathing propulsion*. Aiaa, 1994.
16. Ahmed F El-Sayed. Pulsejet, ramjet, and scramjet engines. In *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion*, pages 315–401. Springer, 2016.
17. Charles R McClinton. High speed/hypersonic aircraft propulsion technology development. *Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft*, pages 1–32, 2007.
18. DM Van Wie, DG Drewry, DE King, and CM Hudson. The hypersonic environment: required operating conditions and design challenges. *Journal of Materials Science*, 39(19):5915–5924, 2004.
19. KM Pandey and T Sivasakthivel. Recent advances in scramjet fuel injection-a review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 1(4):294, 2010.
20. Robert Godwin. *Columbia accident investigation report*, volume 39. Burlington, Ont.: Apogee Books, 2003.
21. Sylvia M Johnson. Thermal protection materials and systems: Past, present, and future. 2013.
22. YY Zheng and NA Ahmed. Thermal protection systems in spacecraft re-entry-a brief overview. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(1):99, 2013.
23. Zhen-guo Wang, Xi-wan Sun, Wei Huang, Shi-bin Li, and Li Yan. Experimental investigation on drag and heat flux reduction in supersonic/hypersonic flows: A survey. *Acta Astronautica*, 129:95–110, 2016.
24. Daniel B Leiser, David A Stewart, and Ethiras Venkatapathy. Reusable surface insulation tile thermal protection materials: Past, present and the future. 2002.