

Il Cx del go-kart

A cura di **Marco Evangelos Biancolini**, Ing., Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Roma Tor Vergata (biancolini@ing.uniroma2.it)

In questo articolo si affronta il problema della determinazione rigorosa della resistenza aerodinamica agente su un go-kart da competizione. Tale studio si colloca all'interno di un più ampio progetto di Record di Velocità (<http://www.topspeedkart.com/>) ed ha lo scopo di valutare quale sia la massima velocità raggiungibile dal veicolo nella sua configurazione originale. Al fine di determinare l'influenza che ogni componente del veicolo ha sulla resistenza, sono stati condotti una serie di studi numerici facendo uso del software di analisi fluidodinamica Fluent. Per avere dei dati quantitativi sulle effettive performance in pista, sono stati condotti dei test di "coast down". Questo studio è stato presentato al Global Motorsport Congress 2007 (GMC2007 www.globalmotorsportscongress.com) e al XXXVI Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS2007 www.aiasonline.org), le presentazioni possono essere scaricate dal sito Tor Vergata Karting (www.torvergata-karting.it/article/articleview/57/1/7/).

L'analisi CFD richiede in primo luogo la realizzazione di una mesh della superficie molto fitta che rappresenti correttamente la forma dell'oggetto immerso nel fluido, che in questo caso è un go-kart completo di pilota. Si è partiti dal modello geometrico che è stato sviluppato qualche anno fa dal team Tor Vergata Karting illustrato nella figura 1.

Si passa quindi alla rappresentazione del dominio fluido che nel caso di analisi di aerodinamica esterna deve rappresentare una galleria del vento virtuale. E' a questo punto necessario introdurre le condizioni al contorno: il campo di velocità costante introdotto all'imbocco e all'uscita della galleria, la velocità del suolo imposta sulla superficie che rappresenta l'asfalto e la velocità di rotazione delle ruote.

L'analisi viene portata avanti fino a che non si trova una stabilizzazione del flusso e delle forze aerodinamiche applicate al go-kart. Alla fine del calcolo è possibile rappresentare la pressione aerodinamica agente sul veicolo e le linee di flusso attorno al veicolo. La figura seguente è un esempio di rappresentazione di queste grandezze.

La distribuzione di pressioni rappresentata nella figura 2 è relativa ad un go-kart che avanza alla velocità di 90 km/h. Si osserva che le pressioni più elevate si hanno sulle ruote anteriori, sul casco e sul petto del pilota, e quindi sulle carenature anteriori.

Integrando le pressioni sulle superfici è possibile scomporre i contributi di forza agenti sulle varie parti che sono rappresentate nel diagramma della figura 3 dove viene riportata la forza agente sulla parte bassa della carenatura anteriore (*front spoiler*), sulla parte superiore della carenatura (*front deflector*), sul pilota (*driver*), sul motore (*engine*), sul telaio (*frame*), sul radiatore (*radiator*), sul serbatoio (*tank*), sulle ruote anteriori (*front tires*), sulle ruote posteriori (*rear tires*) ed infine il totale.

E' interessante osservare che la forza depor-



Figura 1 - Il modello geometrico TVK.

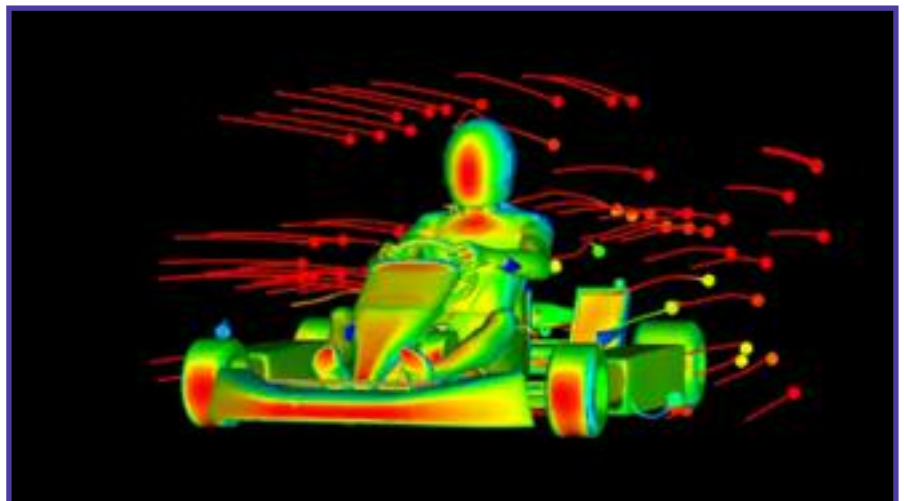


Figura 2 - Mappa della pressione e campo di velocità calcolati con il modello CFD.

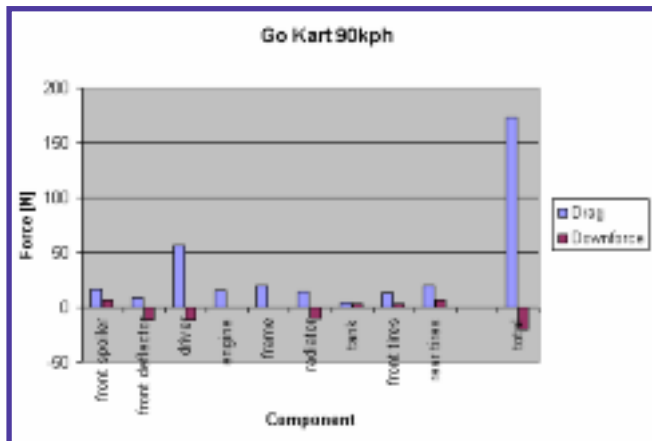


Figura 3 - Distribuzione delle forze resistenti e deportanti sui componenti del go-kart.

tante totale (*Downforce*) risulta essere negativa: ciò significa che a questa velocità la forza verticale scambiata fra go-kart e pista diminuisce di circa 30 N. Considerando poi la forza resistente totale (*Drag*), pari a circa 173 N è possibile calcolare il coefficiente di penetrazione aerodinamica utilizzando la seguente formula:

$$F_{\text{drag}}(v) = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_{\text{proje}}$$

$$A_{\text{proje}} = 0.57484 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v = 90 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$C_x = 0.78$$

Si tratta di un valore piuttosto alto. Nei libri di aerodinamica (cfr W. F. Milliken, D. L. Milliken, "Race car vehicle dynamics", SAE 1995) si riporta un valore caratteristico pari a 0.6 per una vettura a ruote scoperte priva di ali.

Per avere un'idea più chiara di come si distribuisce la forza resistente, si riporta nella figura 4 il contributo percentuale al drag di ogni componente. Si osserva che oltre il 33% della resistenza aerodinamica è dovuta al pilota. Non è una sorpresa poiché è il pilota a contribuire maggiormente sulla sezione frontale, ed è ben noto che accucciandosi si riesce a guadagnare un po' di velocità in fondo ad un rettilineo. Le ruote contribuiscono complessivamente per quasi il 20% e su questo contributo non si può far molto in gara, a meno di non usare ruote più piccole e strette ma il miglioramento aerodinamico non basterebbe certo a compensare la perdita di velocità in curva.

Il 15% è assorbito dalla carena frontale. Questo fa in un primo momento pensare che anche una ottimizzazione spinta di tale componente può portare a miglioramenti della penetrazione complessiva abbastanza modesti. Tuttavia uno studio attento della carena anteriore può essere mirato non solo a diminuire il contributo di questo stesso componente, ma a migliorare le condizioni del flusso alle sue spalle, e quindi a diminuire le resistenze di tutti i componenti montati sul

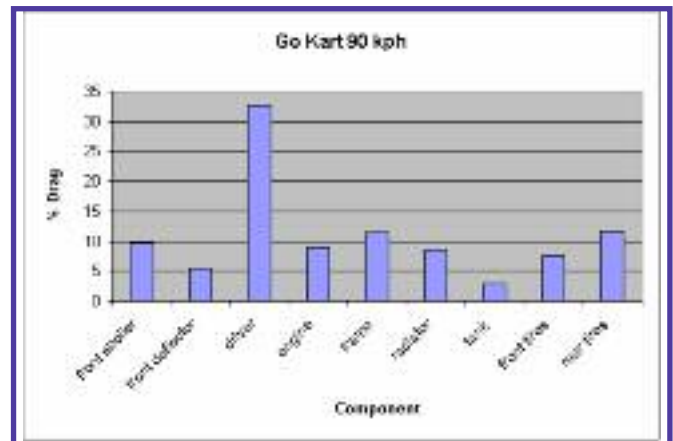


Figura 4 - Contributo dei componenti del go-kart alla generazione della forza resistente totale.

veicolo. Questo è un principio molto importante nello studio aerodinamico della parte anteriore di una vettura: è proprio questa parte che decide come il flusso indisturbato che la investe interagirà con gli altri componenti.

L'ultimo commento riguarda il radiatore. In questo caso l'interazione con il flusso è necessaria e lo studio aerodinamico può essere usato per garantire che una portata sufficiente raggiunga questo componente. Alla luce di questa analisi che dimostra che quasi il 10% della potenza resistente viene spesa sul radiatore, si può consigliare di inclinare il radiatore quando la sua azione risulta esuberante piuttosto che coprirne una parte.

Analisi sperimentale

Lo studio esposto fino a questo momento aiuta molto a capire come funziona l'aerodinamica del go-kart e su come intervenire per cercare di migliorarla. Tuttavia il valore del C_x ottenuto risulta decisamente maggiore del valore tipico atteso per questa classe di veicoli. Per far luce sull'argomento si è deci-

so di misurare il C_x effettivo del go-kart. Si possono usare due metodi: realizzare un modello in scala e fare delle misure in una galleria del vento dotata di bilance (o mettere il kart vero in una galleria del vento grande) oppure fare delle misure direttamente in pista sul go-kart vero.

Si è deciso di seguire la seconda strada che, pur richiedendo un trattamento dati piuttosto complesso, necessita solo di un go-kart e di un sistema per acquisire la velocità.

Le prove sono state eseguite sulla pista dell'ISAM di Anagni utilizzando un go-kart CRG con motore 100 Maxter guidato dal pilota Gianmaria Gabbiani avvalendosi del supporto tecnico del CIK e dell'Ing Chris Sewell della PI Research (Figura 5).

La procedura sperimentale per la misura del C_x in pista non è molto complicata: si tratta di portare il go-kart ad una velocità sufficientemente elevata e poi spegnere il motore e scollegare la trasmissione per far decelerare il veicolo frenato dalle resistenze passive. Il moto del veicolo è governato dal seguente sistema di equazioni che mostra come la forza totale applicata sia data dal contributo



Figura 5 - Il go kart su cui sono state eseguite le misure all'ISAM di Anagni.

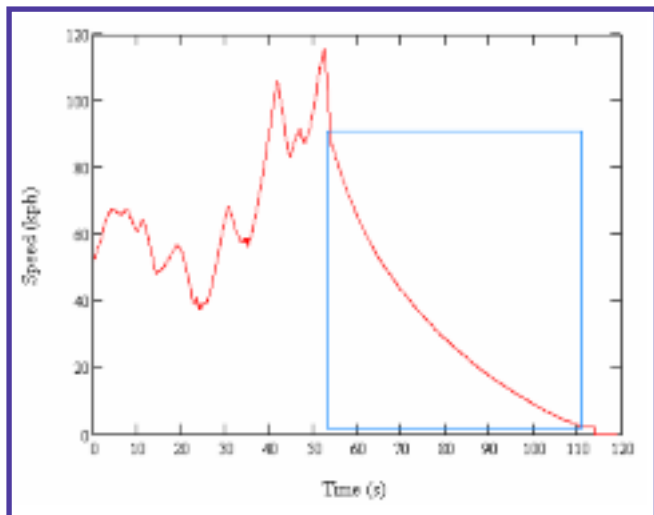


Figura 6 - Dati di velocità acquisiti durante la prova di decelerazione.

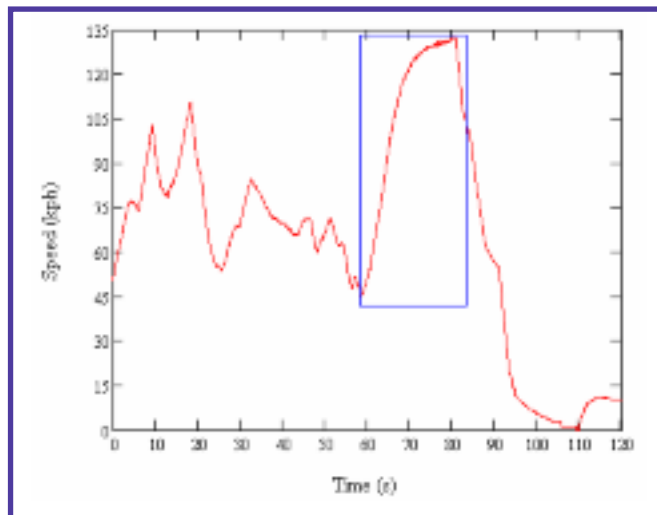


Figura 7 - Dati di velocità acquisiti durante la prova di accelerazione.

della spinta del motore, calcolata dalla curva di coppia, della resistenza a rotolamento dei pneumatici e della resistenza aerodinamica già illustrata precedentemente.

$$F_w(v) = Ma$$

$$F_w(v) = F_{mot}(v) - F_{res}(v) - F_{res}(v)$$

$$F_{res}(v) = \gamma \left(\frac{v}{2\pi R_{rot} Z_{rot}} \right) \frac{1}{R_{rot} Z_{rot}} \eta$$

$$F_{mot}(v) = Mg(f_c + f_v)$$

$$F_{res}(v) = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_{res}$$

Nel momento in cui la frizione interviene la spinta del motore si annulla e si ha un moto decelerato. Considerando l'andamento della velocità misurata durante la prova decelerazione è possibile ottenere l'andamento della decelerazione calcolando numericamente la derivata. Moltiplicando la decelerazione per la massa si ottiene una forza pari alla somma dei due contributi resistenti. Effettuando la regressione dei dati sperimentali mediante un polinomio di secondo grado è possibile stimare i coefficienti incogniti.

Una volta ottenuti i coefficienti del polino-

mio è possibile risalire ai coefficienti rappresentativi delle resistenze passive che portano a far coincidere la curva di decelerazione sperimentale con quella teorica mediante la tecnica dei minimi quadrati.

$$\begin{cases} -Ma = Mg(f_c + f_v) - \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_{res} \\ -Ma = av^2 + bv + c \\ \frac{1}{2} \rho C_x A_{res} = a \\ Mg f_c = b \\ Mg f_v = c \end{cases}$$

Si può a questo punto passare al calcolo della curva di coppia. Utilizzando i coefficienti di resistenza determinati durante la curva di rallentamento è possibile avere una buona stima delle perdite che risulterà valida anche durante l'accelerazione del veicolo. Mediante un ragionamento analogo a quello precedentemente svolto è possibile separare il termine di spinta dall'equazione del moto. Infatti è l'unico termine ancora incognito poiché anche questa volta l'accelerazione

viene calcolata per derivazione numerica e i termini resistenti sono calcolati in funzione della velocità stessa.

Dalla spinta in funzione della velocità è possibile risalire direttamente alla curva di coppia del motore una volta che sia noto il rapporto di trasmissione e il raggio di rotolamento delle ruote posteriori.

Vediamo più in dettaglio un esempio concreto.

Le curve riportate nelle figure 6 e 7 rappresentano l'andamento della velocità durante una prova di accelerazione ed una prova di decelerazione acquisite mediante il sistema di misura PI Delta Clubman Kart Kit. Nella figura 8 si può osservare come il sistema di misura sia stato montato sul go-kart.

Il go-kart è stato poi equipaggiato con una frizione centrifuga (vedi figura 9) che consente di interrompere la trasmissione quando il pilota blocca l'assale posteriore con una breve frenata a bloccaggio completo.

Il costruttore ha inoltre fornito la curva di coppia del motore misurata al banco. Nella figura 10 viene mostrato il confronto fra la legge polinomiale e i dati sperimentali per la

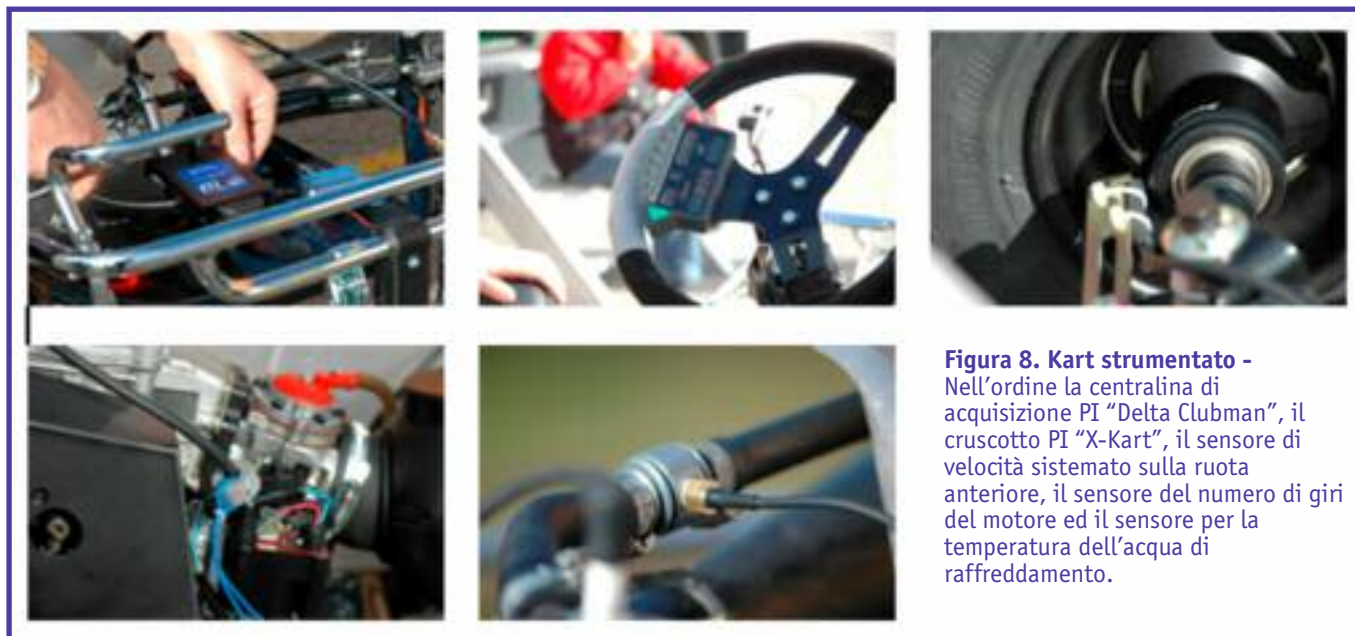
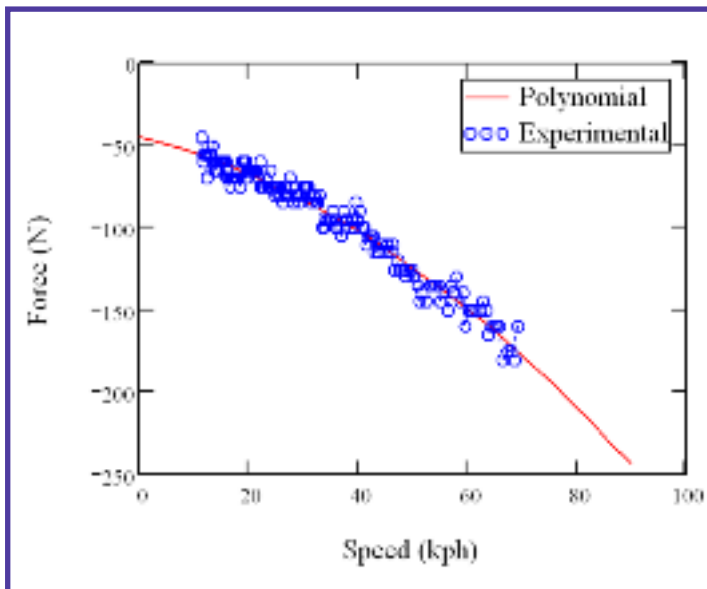


Figura 8. Kart strumentato - Nell'ordine la centralina di acquisizione PI "Delta Clubman", il cruscotto PI "X-Kart", il sensore di velocità sistemato sulla ruota anteriore, il sensore del numero di giri del motore ed il sensore per la temperatura dell'acqua di raffreddamento.



Figura 9 - Particolare frizione centrifuga.

Figura 10 - Forza resistente in funzione della velocità di avanzamento. Valori misurati e correlazione polinomiale.



curva di decelerazione.

Per il polinomio si sono usati i coefficienti che minimizzano l'errore e che consentono di ottenere la seguente stima per i coefficienti incogniti:

$$\begin{cases} C_1 = 0.899 \\ f_1 = -5.114 \cdot 10^{-4} \\ f_2 = 0.027 \end{cases}$$

Lavorando con la curva di accelerazione è possibile ottenere l'andamento della spinta in funzione della velocità illustrato nella figura 11.

Nella figura 12 viene presentato il confronto fra la curva di coppia fornita dal costruttore e la curva di coppia ricostruita mediante gli esperimenti in pista.

La velocità massima

Come già detto nell'introduzione, questo studio sperimentale si inserisce in un progetto di record di velocità per go-kart.

Conoscendo in maniera quantitativa i parametri di perdita di un go-kart è possibile studiare come delle variazioni sul progetto del veicolo possano influenzare la velocità massima.

La velocità massima del veicolo dipende dalla

potenza massima e dalle perdite già viste in questo articolo secondo la seguente formula:

$$P_{max} = \left(Mg(f_{rl} + f_r) + \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A_{front} \right) v$$

Ovvero alla massima velocità c'è equilibrio fra la potenza disponibile (prodotto fra il rendimento della trasmissione e la potenza massima del propulsore) e la potenza dissipata dalle forze resistenti schematizzate nei due contributi di perdita per rotolamento e perdita aerodinamica.

Affinché il veicolo riesca a raggiungere tale velocità il rapporto di trasmissione deve essere tale da far coincidere il regime di potenza massima con la velocità massima desiderata:

$$Z_{crit} = \frac{RPM_{max} \cdot 2\pi R_{crit}}{V_{max}}$$

Nella formula compare il raggio di rotolamento della ruota il numero di giri di massima potenza e la velocità massima.

Variando i parametri di progetto si ottengono le variazioni percentuali di velocità massima riportate nella seguente tabella I.

Come si può vedere dalla tabella, per ottenere variazioni apprezzabili della velocità massima è importante agire sulla resistenza aerodinamica riducendo il Cx o l'area trasversale, e sulla potenza massima aumentandola. Il primo effetto può essere ottenuto carenando il mezzo, al fine di ridurre il Cx, e cambiando la posizione del pilota al fine di ridurre la sezione trasversale. L'aumento di potenza può essere ottenuto penalizzando l'erogazione e accordando il sistema di scarico per ottenere una curva di coppia con un picco alto e stretto.

Modificando il kart originale in modo da

	-40%	-20%	20%	40%
Cx * Cross section	18.9	7.8	-5.9	-10.7
f0	-1.27	0.6	-0.6	-1.27
f1	-0.92	-0.46	0.46	0.93
Power	-16.3	-7.4	6.5	12.3
Weight	0.3	0.17	-0.17	-0.35

Tabella I

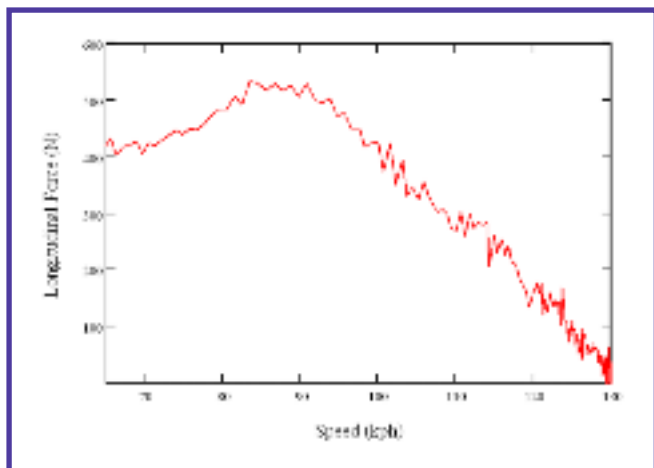


Figura 11 - Spinta in funzione della velocità ottenuti nella prova di accelerazione.

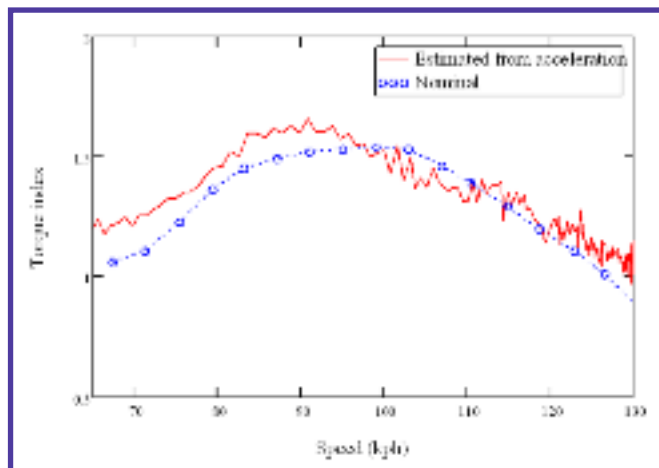


Figura 12 - Curva di coppia misurata e curva di coppia nominale fornita dal costruttore.

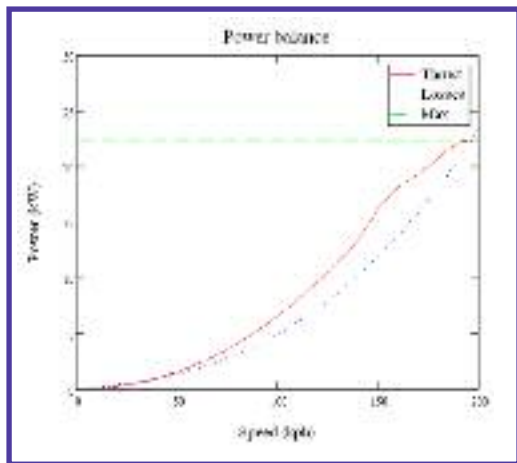


Figura 13 - Equilibrio fra potenza erogata dal motore e potenza resistente al variare della velocità del go-kart.

ridurre il Cx a 0.2 e aumentando la potenza di 4 hp si ottiene un consistente aumento della velocità massima:

$$v_{max}(0.8, 26 \text{ hp}) = 152.61 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$v_{max}(0.2, 30 \text{ hp}) = 196.61 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

Il diagramma di equilibrio delle potenze è riportato nella figura 13.

Il CX e la pista

Lo studio presentato dimostra che il Cx di un go-kart può essere stimato sperimentalmente mediante prove di decelerazione libera (Cx=0.899) e numericamente mediante analisi CFD (Cx=0.78).

Risulta a questo punto naturale chiedersi quanto un intervento atto a migliorare il Cx possa influenzare le prestazioni del go-kart in pista. Per dare una risposta di tipo quantitativo si è utilizzato il simulatore di giro di pista del software KP Studio.

Prima di tutto si è definito un set-up ottimale per il veicolo utilizzando dei valori standard per la penetrazione aerodinamica (Cx=0.8 Area=0.6 m²). Il set-up scelto risulta ottimo per minimizzare il tempo giro sul circuito di Parma. Sono state quindi definite due soluzioni estreme: un pilota alto con un coefficiente di penetrazione peggiore (Cx=0.9 Area=0.65 m²), un pilota basso con condizioni di penetrazione aerodinamica ottimizzate (Cx=0.7 Area=0.55 m²).

I tempi giro previsti dal simulatore sono: 48.2 per la soluzione base, 48.0 per la soluzione a basso Drag, 48.5 per la soluzione ad alto Drag. È interessante osservare la non linearità della variazione della resistenza sulle prestazioni globali del veicolo.

Conclusioni

In questo articolo è stato presentato uno studio sulla penetrazione aerodinamica del go-kart. L'analisi CFD ha consentito di capire come le forze resistenti si distribuiscono sui componenti del veicolo fornendo delle preziose indicazioni su come agire per migliorare le prestazioni. Dalla analisi CFD è stato inoltre possibile stimare il coefficiente di penetrazione aerodinamica per la geometria

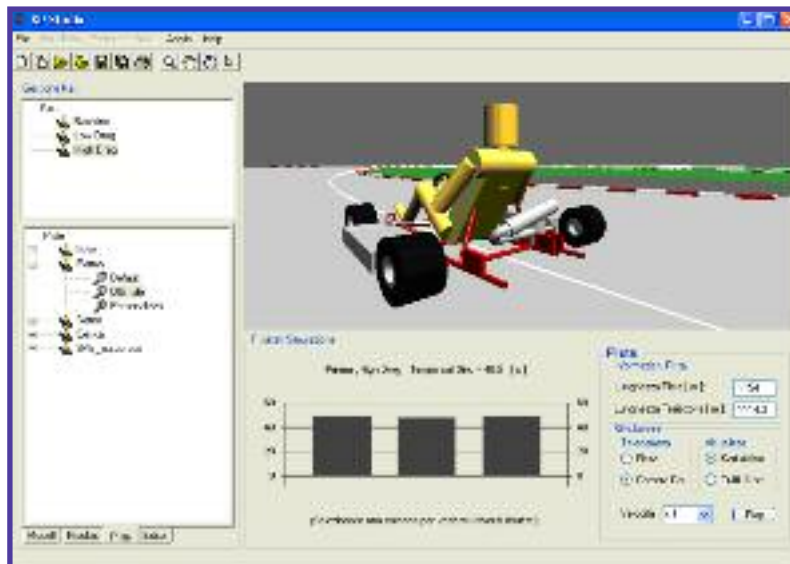


Figura 14 - Confronto delle tre soluzioni a diverso drag mediante il simulatore KP Studio.

esaminata, che è risultato pari a circa 0.8. Per avere delle informazioni quantitative è però indispensabile misurare le perdite. Ciò è stato fatto mediante prove di accelerazione e decelerazione del veicolo. Grazie ad una procedura per il trattamento dati è possibile calcolare il coefficiente di penetrazione aerodinamica, la resistenza di rotolamento prodotta dai pneumatici e la curva di coppia del motore alla ruota.

Il valore del Cx ottenuto sperimentalmente si è dimostrato più alto rispetto al valore numerico. Tale discrepanza può essere attribuita in parte al risultato CFD che per essere quantitativamente esatto necessita di una attenta calibrazione ed in parte al fatto che le geometrie esaminate sono leggermente diverse. I risultati ottenuti sono stati quindi utilizzati per due studi teorici di tipo applicativo. Prima di tutto è stata svolta un'analisi di sensibilità per definire come intervenire sul

progetto del veicolo per aumentarne la velocità massima. Questo studio è stato utilizzato per definire le specifiche di un go-kart per record di velocità. In secondo luogo si è mostrato come una variazione della forza resistente (che dipende dal prodotto dell'area frontale e del Cx) sia apprezzabile in termini di centesimi sul tempo giro mediante un simulatore di giro di pista.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Baudille per i suoi consigli ed un nostro caro amico Svedese che ci ha aiutato nella simulazione CFD.

Per la parte sperimentale si ringrazia: ISAM, CIK, PI Research, CRG, Maxter e il team land speed record di Tor Vergata Karting.

Si ringrazia infine l'ing. Marco Rossi di Ansys Italia. Ansys Italia ha finanziato il progetto TopSpeedKart e ha messo a disposizione il software CFD Fluent.

REFERENCES

- Baudille, R., Biancolini, M. E., Reccia, L. (2002), "Integrated multi-body/FEM analysis of vehicle dynamic behaviour", The 29th FISITA World Automotive Congress, Helsinki, Finland, June 2002.
- Baudille, R. (2003), "Ottimizzazione delle prestazioni aerodinamiche di kart da competizione", <http://www.torvergata-karting.it/article/articleview/22/1/7/>
- Baudille, R., Biancolini, M. E., Reccia, L. (2004), "An Integrated Tool For Competition Go-Kart Track Analysis", The 30th FISITA World Congress 2004, Barcelona, Spain, May 2004 2002-01-1121
- Baudille, R., Biancolini, M. E., Reccia, L. (2006), "Load transfers evaluation in competition go-kart", Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing, in press.
- Bertolino, M. (2003), "Realizzazione di modelli tridimensionali", <http://www.torvergata-karting.it/article/articleview/17/1/1/>
- Biancolini, M. E., Cerullo, A., Reccia, L. (2007), "Design of a tuned sandwich chassis for competition go kart", IJVD 2007 Volume 44 Nos 3/4.
- Biancolini, M. E. (2007), "Il CX del go kart", <http://www.torvergata-karting.it/article/articleview/57/1/7/>
- Hitoshi, T. (2005), Real-Life Coefficient of Drag - a Simple Extraction Method, AutoTechnology, No.:2005-04.
- Manieri, G., Urbinati, M. (2006), "Design of a land speed record go kart", 8th FISITA Student Congress, 22-27 October, Yokohama, Japan.
- Milliken, V. F., Milliken, D. L. (1995), "Race car vehicle dynamics", SAE.
- Mirone, G. (2003), "Multibody modelisation of a go-kart with flexible elements frame: simulation of the dynamic behaviour and experimental validation", SAE 2003-01-2764.
- Ponzio, C., Renzi, F. (2004), "Parametric multi-body analysis of kart dynamics", The 30th FISITA World Congress 2004, Barcelona, Spain, May 2004
- Vitale, E., Frenzo, F., Gheraldi, E., Leoncini, A. (2001), "A lumped parameters model for the analysis of kart dynamics", 7th International Conference ATA, Florence, Italy.

INTERNET SITES

- Tor Vergata Karting Research group (www.torvergata-karting.it)
- Gabbiani G.M. (www.gabbianijr.com)
- PI Research (www.piresearch.com)
- Racing Team CIK (www.centroitaliakart.it)
- ISAM proving ground and track (www.isam-spa.it)
- CRG go-kart (www.kartcrg.com)
- MAXTER engines (www.maxterengines.com)
- Software KP Studio (www.tvk-project.com)
- Team land speed record di Tor Vergata Karting (www.topspeedkart.com)