

# Un approccio innovativo di progettazione mediante il Design For Six Sigma

Gabriele ARCIDIACONO, Paolo CITTI, Claudio PANICHI

*Con il presente lavoro si è progettata la nuova sospensione anteriore della vettura Formula SAE 2006 del Firenze Race Team V2 mediante la metodologia Design for Six Sigma.*

*Il DFSS ha permesso di individuare le caratteristiche critiche della sospensione e di concentrare l'azione progettuale su di esse, evitando di sprecare tempo e risorse su attività che non avrebbero incrementato il valore aggiunto del prodotto. Lo sviluppo del progetto ha seguito l'approccio IDOV e ha comportato l'integrazione di diverse metodologie di sviluppo prodotto come il QFD, la Value Analysis e il Design FMEA. L'iter progettuale proposto in questo lavoro si è prefisso di ridurre al minimo la necessità di apportare modifiche e correzioni nelle fasi avanzate di sviluppo, in quanto fin dall'inizio si è tenuto conto dei fattori che possono influenzare l'evoluzione del progetto.*

*Nella prima fase del lavoro sono stati individuati i clienti della vettura e sono stati raccolti i loro bisogni, che successivamente sono stati trasformati in caratteristiche critiche per la qualità, quantificabili e misurabili. Nella seconda fase è emerso dalla Value Analysis che il Triangolo della sospensione è l'assemblato più rilevante ai fini della soddisfazione del cliente e si è quindi avviato un nuovo progetto DFSS. I Rod End ed i Rod End Plate sono risultati i DE critici e sono stati quindi riprogettati. In considerazione della criticità della sospensione ai fini della sicurezza della vettura si è effettuata una Design FMEA sul Triangolo della sospensione. Per ogni requisito funzionale del Triangolo sono stati individuati i possibili modi, effetti e cause di guasto. La riprogettazione dei Rod End e dei Rod End Plate ha permesso di migliorare 7 delle 10 CTQ più importanti.*

**Parole chiave:** DFSS, Sei Sigma, QFD, Formula SAE, Sospensione, Value Analysis, DFMEA

## INTRODUZIONE

In questi ultimi anni la crescente competitività delle aziende all'interno del mercato ha portato una richiesta di prodotti con un numero di funzionalità e qualità sempre crescenti e con costi ridotti. Si rende quindi necessario disporre di metodologie e strumenti di progettazione che consentano di studiare l'impatto delle innovazioni di prodotto e di processo sul costo finale e sulla soddisfazione del cliente.

Questo progetto si inserisce all'interno dell'attività del Firenze Race Team V2 dell'Università degli Studi di Firenze, che progetta e realizza una monoposto a ruote scoperte che partecipa alle competizioni Formula SAE® organizzate dalla Society of Automotive Engineers (in Figura 1 il Team con la vettura F 2005-V2 giunta 2<sup>a</sup> alla Formula ATA 2005 tenutasi alla Pista Prove FIAT Auto a Balocco). Il regolamento SAE impone agli studenti di progettare e produrre un prototipo che possa essere utilizzato da un gruppo di potenziali finanziatori per una valutazione nell'ottica di una produzione annua di mille unità. Ogni anno deve essere presentata una nuova vettura, pertanto è



Figura 1 - Il Firenze Race Team V2 e la F2005 -V2 con i premi vinti alla Formula ATA 2005.

necessario pianificare adeguatamente la tempistica progettuale e produttiva. Un eventuale ritardo nella realizzazione incide sulle prestazioni della vettura perché sottrae tempo alle prove in pista, indispensabili per la definizione dell'assetto ottimale e per la verifica dell'affidabilità dei componenti. Il numero crescente di competizioni internazionali a cui il Firenze Race Team V2 vorrebbe prendere parte nel 2006 richiederà una riduzione dei tempi di sviluppo e realizzazione del veicolo, perciò sarà ancora più importante l'esigenza di *"do things right at the first time"* durante la fase progettuale. La sospensione è uno dei sistemi critici per le prestazioni e la sicurezza del veicolo, e ne rappresenta circa il 5% del costo complessivo.

Scopo del lavoro è la progettazione mediante la metodologia Design for Six Sigma (DFSS) della sospensione anteriore della vettura destinata alle competizioni 2006. Il DFSS permette di integrare in maniera organica e strutturata diverse metodologie di progettazione, e consente di misurare il grado di conformità delle Caratteristiche Critiche della Qualità del prodotto.

Nella prima parte del lavoro sarà utilizzato il Quality Function Deployment (QFD) per individuare le caratteristiche ed i componenti del prodotto che hanno un maggior impatto sulla soddisfazione dei clienti, e sui quali sarà necessario concentrare gli sforzi progettuali.

Nella seconda parte del lavoro saranno riprogettati i componenti critici utilizzando le metodologie previste all'interno del DFSS.

Il progetto sarà sviluppato mediante il software *Qualica QFD®*, che dispone di appositi tool per la gestione e l'integrazione delle metodologie previste dal DFSS.

Il modello creato sarà utilizzato per studiare l'impatto delle innovazioni sui costi e sulla soddisfazione del cliente, e per la progettazione della sospensione posteriore, che possiede caratteristiche geometriche e funzionali analoghe a quella anteriore.

## DESIGN FOR SIX SIGMA

Inizialmente il parlare di qualità era equivalente ad individuare ed eliminare i difetti che si presentavano sui prodotti finiti, successivamente si è passati all'accezione di qualità come attenzione verso il cliente e come eccellenza dei processi. La foca-

lizzazione sulle necessità dei clienti è diventato un elemento fondamentale per *"fare"* qualità. Adesso, infatti, fin dalla fase di progettazione di un prodotto si è molto attenti alle esigenze del processo produttivo che lo dovrà costruire, in modo da avere chiarezza su come realizzare il prodotto conformemente alle specifiche e al costo più basso possibile. Il DFSS trae origine nell'ingegneria dei sistemi, che si è evoluta grazie all'impulso del Dipartimento della Difesa USA e della NASA. Questi enti svilupparono un approccio di gestione dei requisiti di prodotto che permettesse di guidare l'intero processo di progettazione. Infatti l'utilizzo di metodi statistici o quantitativi per stabilire i legami tra le performance di un sistema e gli input consente di passare da una progettazione reattiva, in cui prima si costruisce il prodotto e poi lo si prova, ad una proattiva, dove fin dall'inizio si cerca di realizzare un prodotto conforme a specifica. Oggi le aziende dispongono di specialisti che possiedono una approfondita conoscenza tecnica, che ha portato vantaggi sostanziali agli utenti sotto forma di prodotti migliori e più economici, anche se tutto questo ha creato considerevoli problemi nei processi di sviluppo e di produzione. Individualmente essi dispongono di una quantità notevole di conoscenze tecniche, ma ci sono delle notevoli difficoltà a integrarle in modo da rispondere alle richieste dei clienti. È quindi necessario sviluppare tecniche di integrazione multifunzionale in modo da aiutare questi due soggetti (progettista e cliente) a confrontarsi. Il DFSS è una metodologia di Progettazione e Sviluppo Prodotto che permette di realizzare prodotti e processi che soddisfino pienamente le richieste dei clienti e allo stesso tempo raggiungano livelli di qualità sei sigma.

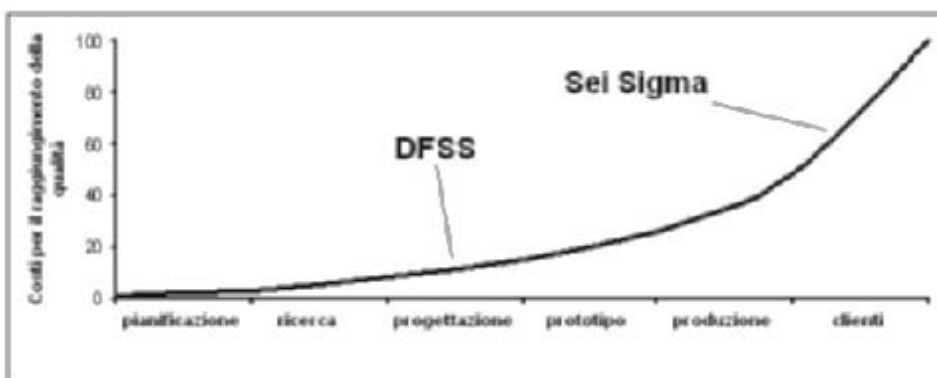
Il team DFSS è costituito da esperti di varie discipline (metodi di progettazione, strumenti statistici, affidabilità, produzione, marketing, etc) che interagiscono tra loro diminuendo drasticamente i tempi di attraversamento dello sviluppo prodotto tra i vari reparti dell'azienda. Il DFSS consente di studiare l'impatto sulla soddisfazione del cliente dell'introduzione di nuove funzionalità di prodotto.

Il grafico di Figura 2 mostra il posizionamento temporale del DFSS all'interno del ciclo di sviluppo del prodotto. La possibilità di intervenire sul prodotto prima del suo lancio commerciale permette un sensibile vantaggio in termini di tempi e costi. La conoscenza approfondita delle metodologie di progettazione utilizzabili all'interno dell'approccio DFSS consente di capire quali debbano essere utilizzate per incrementare il valore aggiunto del prodotto in esame.

L'approccio DFSS richiede, per una progettazione rigorosa e scientifica, lo sviluppo delle seguenti quattro fasi IDOV:

- 1. Identify:** Identificazione dello scopo del progetto, analisi delle VOC, delle richieste e delle CTQ di progetto.
- 2. Design:** Analisi delle varie opzioni di progetto/prodotto e progettazione dettagliata del prodotto in modo da soddisfare le esigenze del cliente.
- 3. Optimize:** Ottimizzazione delle variabili critiche del progetto e della sensibilità alle variabili ambientali.

Figura 2 - Posizionamento temporale del DFSS nel ciclo di sviluppo prodotto



**4. Verify:** Verifica e validazione delle prestazioni del prodotto e dell'abilità di soddisfare le richieste del cliente.

Il DFSS integra il QFD, che rappresenta l'ossatura del progetto, con strumenti come la Voice of Customer Analysis, il Benchmarking, la Functional Analysis e la Value Engineering (vedere Figura 3) che consentono di individuare gli aspetti critici di un determinato prodotto, e con metodologie come il TRIZ, l'Axiomatic Design, il Robust Design, il Design of Experiments e la FMEA, che permettono di determinare le soluzioni progettuali più convenienti.

**PROGETTAZIONE**

Lo schema sospensivo presenta sia all'anteriore che al posteriore la classica configurazione a triangoli sovrapposti di lunghezza diversa (mostrata in Figura 4), con due ammortizzatori di derivazione ciclistica attuati da puntoni (schema *push rod*) e barra antirollio a "U". Tale configurazione rappresenta il miglior compromesso tra l'esigenze di rigidità, leggerezza e costi.

La presenza di alcune criticità nella sospensione 2005 (Figura 5) avrebbe richiesto per l'edizione 2006 una progettazione multi-obiettivo che senza un'adeguata guida procedurale avrebbe ulteriormente allungato i tempi di realizzazione. Si è quindi deciso di utilizzare il DFSS, per la prima volta in ambito delle competizioni *Formula SAE*. Lo scopo del lavoro è di ottenere una sospensione con elevate prestazioni dinamiche, affidabilità, regolabilità, manutenzione limitata, bassi costi di costruzione e gestione, limitato impatto ambientale.

Il progetto DFSS segue il classico approccio IDOV e per il suo sviluppo viene utilizzato il programma *Qualica QFD*<sup>®</sup>, che consente di gestire tutte le fasi del DFSS e gran parte delle metodologie utilizzabili (QFD, TRIZ, FMEA, Value Analysis, etc).

**IDENTIFY**

La fase di *Identify* è stata divisa in 4 parti:

1. Sono stati individuati i clienti esterni ed interni della sospensione e ne è stato attribuito un peso d'importanza. Ogni cliente è stato invitato ad indicare i propri bisogni o *Voce del Cliente* (VOC) e a definire un grado d'importanza per ciascuno di essi. I valori raccolti sono stati ponderati ed utilizzati per calcolare l'importanza di ciascuna VOC mediante la *VOC Table* (vedere Tabella 1).

2. Per ciascuna VOC si è definito un livello di soddisfazione del cliente per il prodotto attuale e si è stimato quello del miglior concorrente (*VOC Benchmarking*). In seguito si è stabilito un livello di soddisfazione obiettivo per il nuovo prodotto tenendo conto della prevedibile evoluzione delle prestazioni, delle richieste del mercato e delle possibilità tecniche. Dopo aver individuato gli *Unique Selling Point* è stato possibile calcolare l'importanza relativa di ciascuna VOC. In Figura 6 si può notare che le VOC più importanti ai fini del-

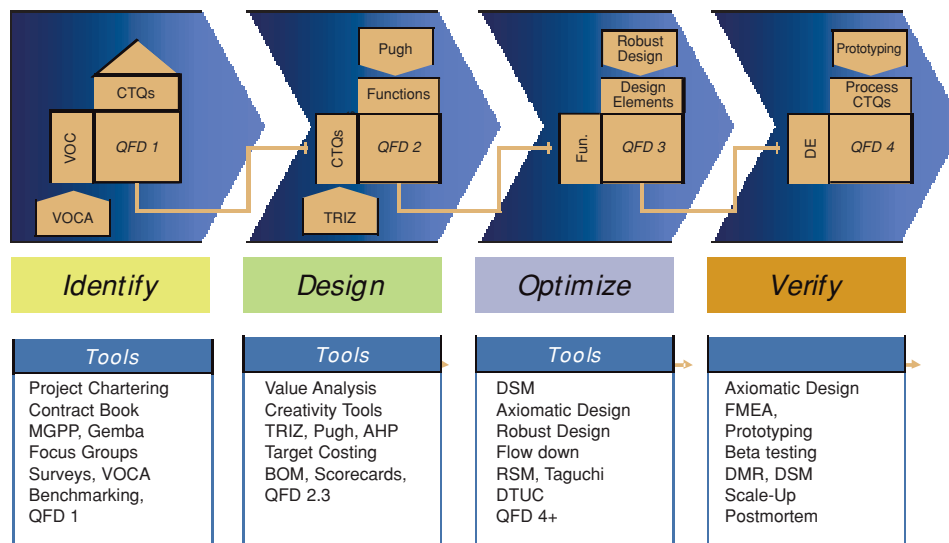


Figura 3 - Metodologie e strumenti utilizzabili nelle varie fasi del DFSS

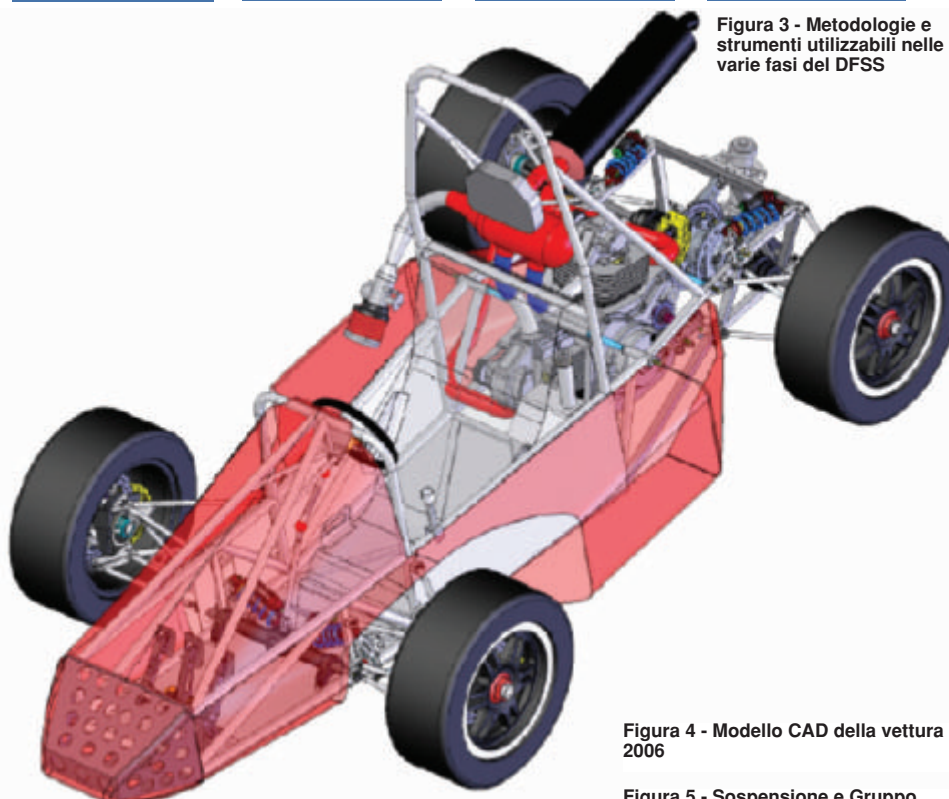


Figura 4 - Modello CAD della vettura 2006

Figura 5 - Sospensione e Gruppo Ruota Anteriore 2005



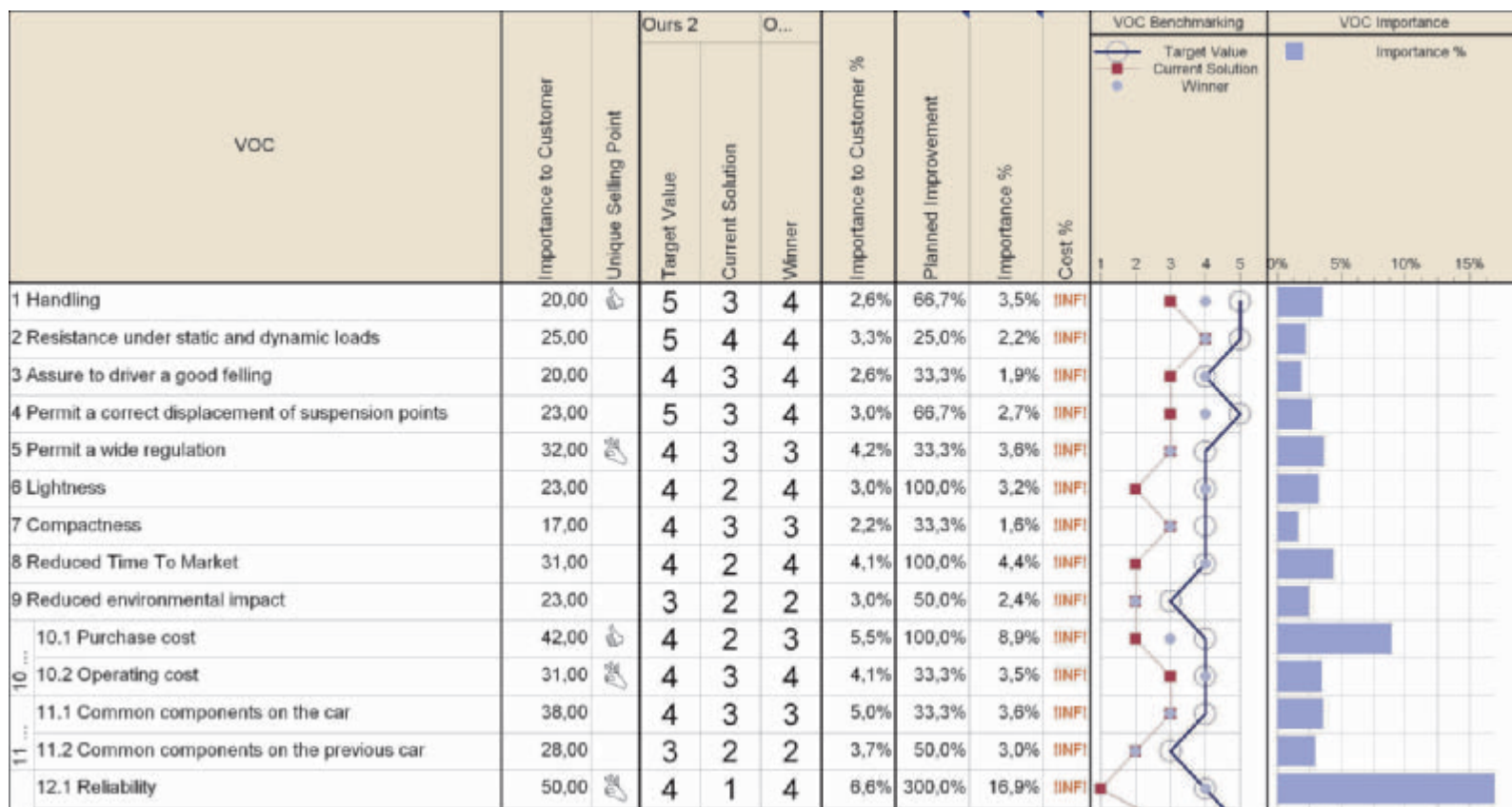


Figura 6 - VOC Benchmarking

Tabella 1 - VOC Table

Tipologia Clienti	Esterni			Interni					Importanza media per il cliente
	Peso	30	10	24	10	3	10	3	
VOC	Pilota/Proprietario	Meccanico	Giudice della competizione	Team di progettazione	Team di analisi dei costi	Team di analisi dell'impatto ambientale	Team di produzione ed assemblaggio	Fornitore/sponsor	
Costo di acquisto	5	0	4	4	5	0	0	0	42%
Affidabilità	5	2	4	5	3	3	2	2	60%
Leggerezza	0	0	4	4	3	3	0	3	23%
Regolabilità	1	4	5	5	1	1	0	0	32%
Handling	0	0	4	5	0	0	0	0	20%

la soddisfazione del cliente sono: *Reliability, Purchase Cost e Manutention Wide Interval.*

3. I bisogni del cliente sono stati trasformati in *Caratteristiche Critiche per la Qualità (CTQ)*, tutte misurabili e quantificabili. Sono stati raccolti i valori della sospensione 2005 e sono stati stabiliti i valori obiettivo per il 2006. Per ciascuna CTQ è stata individuata una direzione di ottimizzazione, un valore ideale ed uno marginale. Successivamente si sono specificati i valori riferiti al prodotto attuale e definiti quelli del nuovo prodotto (*CTQ Benchmarking*). Completata la raccolta dei dati è stato possibile calcolare l'importanza relativa di ciascuna CTQ. In Figura 7 (a pagina seguente) si può notare che le CTQ più importanti ai fini della soddisfazione del cliente sono quelle relative al tempo impiegato per la progettazione, l'affidabilità e i costi operativi di funzionamento.

4. È stata compilata la 1<sup>a</sup> *Casa della Qualità (HoQ)*, dove si è specificato un grado di correla-

zione tra i bisogni del cliente e le caratteristiche critiche della qualità.

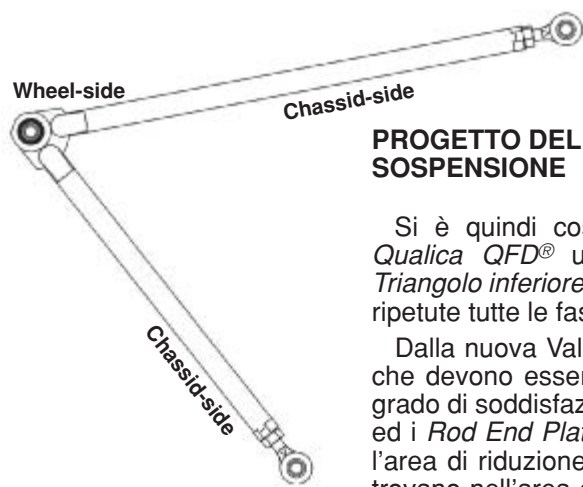
## DESIGN

Nella fase di *Design* sono stati individuati i *Requisiti Funzionali (FR)* della sospensione mediante la metodologia *Function Surfaces* che permette di identificare le funzioni dei componenti di un prodotto attraverso un esame visivo della loro geometria e dei loro accoppiamenti.

In seguito i FR sono stati correlati con le CTQ mediante il QFD 2 e con le VOC mediante il QFD 1\* e ne è stata calcolata l'importanza. L'approccio tradizionale del DFSS prevede che al termine del QFD 2 siano individuati i FR da migliorare in base alla loro importanza. L'analisi del QFD 1 ha evidenziato che il costo della sospensione è una delle CTQ più importanti, pertanto si è ritenuto opportuno scegliere i FR da migliorare solo dopo aver effettuato una *Value Analysis*. Questa metodologia definisce il valore di un FR o DE come il rapporto tra la loro importanza ed il loro costo. Si è quindi passati direttamente al QFD 3 ed in particolare alla definizione dei Design Elements (DE) della sospensione e alla loro correlazione con i FR nella 3<sup>a</sup> HoQ. Una volta definiti i DE è possibile dare una stima approssimata dei costi di realizzazione finale dei componenti mediante un Bill of Material (BOM). Attraverso le correlazioni definite nel QFD 3 e QFD 2 è stato possibile ripartire il costo della sospensione sui FR e sulle CTQ. Dalla *Value Analysis* è emerso che i FR e DE che devono essere migliorati in modo prioritario per accrescere il grado di soddisfazione del cliente sono quelli riferiti ai due triangoli delle sospensioni.

Figura 7 - CTQ Benchmarking

CTQs	Optimization	Specification Data			Specification R...		Ours 2			Oth...			Our...			CTQs Benchmarking					CTQs Importance
		Measurement Stand...	Metric Unit	Data Type	1 Ideal value	2 Marginal value	Target Value	Current Solution	Winner	Target Value	Current Solution	Winner	1	2	3	4	5	Importance			
1 Structural Parameters	1.1 Mass	1.1.1 Upper SLA	kg	cont	0,3	0,5	0,32	0,32		5	5	5									
		1.1.2 Lower SLA	kg	cont	0,3	0,5	0,38	0,38		4	4	5									
		1.1.3 Pull	kg	cont	0,2	0,3	0,2	0,226		4	3	5									
		1.1.4 Trackrod	kg	cont	8,0e-2	0,1	0,1	0,112		4	3	5									
		1.1.5 Tie Rod	kg	cont	8,0e-2	0,1	0,1	0,118		4	3	5									
		1.1.6 ARB	kg	cont	0,3	0,7	0,5	0,543		4	3	5									
		1.1.7 Rocker	kg	cont	0,3	0,5	0,3	0,3		4	4	5									
	1.2 Resistance	1.2.1 Upper SLA	MPa	cont	400,0	300,0	327	315		3	2	2									
		1.2.2 Lower SLA	MPa	cont	400,0	300,0	343	324		3	3	2									
		1.2.3 Pull	mm2	cont	300,0	270,0	285	285		3	3	2									
		1.2.4 Trackrod	mm2	cont	300,0	270,0	285	285		3	3	2									
		1.2.5 Tie Rod	MPa	cont	310,0	250,0	290	275		4	3	2									
		1.2.6 ARB	MPa	cont	300,0	275,0	293	287		4	3	2									
		1.2.7 Rocker	MPa	cont	400,0	200,0	345	215		4	2	2									
2 TTM	2.1 Design Time	2.1.1 Upper SLA	hour	cont	7,0	10,0	8	10		4	2	5									
		2.1.2 Lower SLA	hour	cont	6,5	9,0	7,5	9		4	2	5									
		2.1.3 Pull	hour	cont	0,5	1,0	0,5	0,5		5	2	5									
		2.1.4 Trackrod	hour	cont	0,5	1,0	0,5	0,5		5	2	5									
		2.1.5 Tie Rod	hour	cont	2,0	4,0	2	2,5		5	4	5									
		2.1.6 ARB	hour	cont	3,0	5,0	3	4		5	3	5									
		2.1.7 Rocker	hour	cont	2,0	4,0	2,5	3		4	3	5									
	2.2 Production Time	2.2.1.1 Upper SLA	min	cont	17,0	21,0	16	20		5	3	5									
		2.2.1.2 Lower SLA	min	cont	16,0	20,0	16,5	19		5	3	5									
		2.2.1.3 Pull	min	cont	5,0	6,0	5	5,5		5	3	5									
		2.2.1.4 Trackrod	min	cont	5,0	6,0	5	5,5		5	3	5									
		2.2.1.5 Tie Rod	min	cont	6,0	12,0	6,5	8		5	4	5									
		2.2.1.6 ARB	min	cont	9,0	12,0	10	11,5		4	2	5									
		2.2.1.7 Rocker	min	cont	13,0	17,0	14	16,5		4	2	5									
2.2.2 Assembly	hour	cont	0,2	0,6	0,3	0,4		4	3	5											
3.1 Reliability	3.1.1 Upper SLA	MTTF	cont	150,0	30,0	120	13		4	2	2										
	3.1.2 Lower SLA	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
	3.1.3 Pull	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
	3.1.4 Trackrod	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
	3.1.5 Tie Rod	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
	3.1.6 ARB	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
	3.1.7 Rocker	MTTF	cont	150,0	30,0	120	30		4	2	2										
3.2 Safety	3.2 Pointed surfaces	Visual Inspection	num	disc	0,0	0,0	0	2		5	4	4									
	3.3 Impact resistance	Procedure n° 1	N	cont	1.000,0	400,0	1000		5	2	2										
4 Environment	4.1 Envir. impact during DESIGN	Ecopoint	Pt	cont	2,0	4,0	2,5	3,25		4	3	5									
	4.2 Envir. impact during PRODU...	Ecopoint	Pt	cont	15,0	25,0	17,5	21		4	3	5									
	4.3 Envir. impact during USE	Ecopoint	Pt	cont	3,5	6,0	4	5,5		4	3	5									
	4.4 Envir. impact DISMISSION	Ecopoint	Pt	cont	5,0	8,0	6	7		4	3	5									
5.1 Production	5.1.1 Assembly	FSAE Rules	S	cont	10,0	14,0	11	14		4	2	5									
	5.1.2 Finiture	FSAE Rules	S	cont	4,0	8,0	5,5	7,5		4	2	5									
	5.1.3 Upper SLA	FSAE Rules	S	cont	50,0	90,0	75	86,5		3	2	5									
	5.1.4 Lower SLA	FSAE Rules	S	cont	50,0	90,0	75	85,4		3	2	5									
	5.1.5 Pull	FSAE Rules	S	cont	35,0	55,0	40	45,5		4	3	5									
	5.1.6 Trackrod	FSAE Rules	S	cont	35,0	55,0	40	45,2		4	3	5									
	5.1.7 Tie Rod	FSAE Rules	S	cont	8,0	13,0	10	11,1		4	3	5									
	5.1.8 ARB	FSAE Rules	S	cont	60,0	75,0	65	71,4		4	3	5									
	5.1.9 Rocker	FSAE Rules	S	cont	70,0	90,0	75	64,62		4	5	5									
	5.2 Operating	Procedure n° 2	S	cont	8,0	12,0	9	10		4	3	5									



### PROGETTO DEL TRIANGOLO DELLA SOSPENSIONE

Si è quindi costruito all'interno del software *Qualica QFD®* un sottoprogetto DFSS per il *Triangolo inferiore* della sospensione e sono state ripetute tutte le fasi viste in precedenza.

Dalla nuova Value Analysis è emerso che i DE che devono essere riprogettati per accrescere il grado di soddisfazione del cliente sono i *Rod End* ed i *Rod End Plate*. In particolare si trovano nell'area di riduzione di costo i *Rod End*, mentre si trovano nell'area di aumento di valore i *Rod End Plate*. L'aumento di valore del componente può

Figura 8 - Triangolo della sospensione 2005

Figura 9 - Sospensione Anteriore e Gruppo Ruota 2005



essere ottenuto aumentandone la funzionalità in misura maggiore rispetto ai costi, o diminuendo i costi a parità di funzionalità.

La configurazione 2005 (mostrata in figura 8-9) prevedeva, sul lato telaio, degli snodi sferici M8 (*In-side Rod End*) Aurora MM-M8T, avvitati a boccole saldate ai *Trackrod* del triangolo. Sul lato ruota invece era costituita da uno snodo M8 Aurora AWC-8TG (*Ex-side Rod End*) cianfrinato all'interno di una piastra di acciaio (*Rod End Plate*).

Il primo passo è stata la verifica dell'entità dei carichi agenti su di essi, che ha mostrato come gli snodi utilizzati nel 2005 fossero sovradimensionati. Durante la progettazione della vettura 2005 era stata proposta la sostituzione degli snodi sferici M8 con quelli M6, ma tale soluzione era stata accantonata a causa della difficoltà di valutare l'affidabilità fino alla realizzazione fisica del prototipo. La scelta di adottare tale tipo di snodi sarebbe quindi in contrasto con le esigenze di incrementare la soddisfazione del cliente. Si è quindi deciso di studiare l'applicazione degli snodi cianfrinati M6 sia sul lato ruota che su quello telaio. Tale soluzione è tipica delle vetture Sport Prototipo e presenta i seguenti vantaggi:

- Diminuzione dei costi operativi: le procedure di controllo e manutenzione sono comuni a tutti i 24 snodi delle sospensioni della vettura.
- Aumento dell'affidabilità: è possibile mettere a punto prove affidabilistiche e procedure di controllo comuni per tutti gli snodi della vettura.

- Aumento della resistenza: l'anello di alloggiamento dello snodo cianfrinato ha sezione resistente maggiore rispetto al gambo filettato dello snodo sferico.

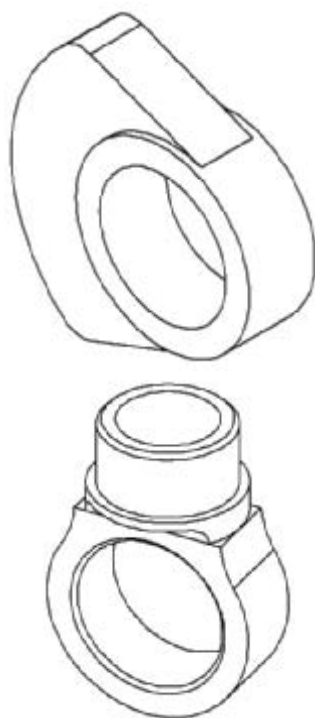
- Diminuzione della massa

- Diminuzione dell'impatto ambientale: è dovuto alla standardizzazione delle progettazioni, dell'assemblaggio e della manutenzione degli snodi della vettura.

In Figura 10 dx è mostrato il nuovo *Rod End Plate* lato telaio, composto da un anello di alloggiamento dello snodo realizzato in acciaio UNI C40 (AISI 1040). Ad un'estremità del componente viene realizzata una parte cilindrica per tornitura che viene inserita all'interno del tubo del *Trackrod* del Triangolo ed in seguito i due pezzi vengono fissati mediante una saldatura a cordone circolare. La massa del *Rod End Plate* 2006 è di 29g, quella del 2005 di 33g, pertanto si è ottenuta una diminuzione del 10%. Per lo snodo lato ruota si è mantenuta la configurazione presente sulle vetture 2004 e 2005 mostrata in Figura 10 sx, ma se ne sono ridotte le dimensioni grazie al minor diametro dello snodo.

Il nuovo *Rod End Plate* presenta una minore dimensione del grezzo di lavorazione che comporta un minor costo di acquisto del materiale e un minor impatto ambientale. La massa del componente lavorato passa da 54 a 29g con una diminuzione del 46%. Poiché si è posto in precedenza che i carichi agenti sullo snodo siano gli stessi della vettura 2005, la saldatura del *Rod End Plate* è sollecitata a taglio, sforzo normale e momento flettente; il momento dipende solamente dalla distanza del centro dello snodo dalla superficie di saldatura dei due *Trackrod*. Nella piastra 2006 tale valore è stato portato a 21mm rispetto ai 27 del 2005, ottenendo una diminuzione del momento flettente del 22%.

Figura 10 - Rod End Plate 2006 - Lato ruota (sx) - Lato telaio (dx)



### OPTIMIZE

Si è visto nella fase di *Design* che uno degli obiettivi principali dell'azione progettuale è quello di garantire una maggiore affidabilità alla sospensione. Attraverso una Design FMEA sarà dunque possibile identificare i modi di guasto per ciascun FR del *Triangolo*.

### DESIGN FMEA

Viene studiata l'applicazione della DFMEA ai componenti del *Triangolo inferiore* della sospensione. Lo scopo è quello di individuare tutti i potenziali guasti più rischiosi e programmare con precisione l'ordine degli interventi correttivi al fine di garantire un Mean Time To Failure (MTTF) di 120 ore. Per la realizzazione della DFMEA si è utilizzato il modello proposto dalla norma SAE J-1739

In Tabella 2 (a pagina seguente) è riportata la DFMEA Form Sheet in cui sono raccolte tutte le informazioni.

Uno degli aspetti più importanti dell'integrazione della FMEA nel DFSS è la disponibilità della

Function	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	Severity	Potential Causes / Mechanisms of Failure	Occurrence	Current Design Controls	Detection	RPN	RPN Threshold	Recommended Actions	Responsibility
Define the suspension point position	Rod End breaking	Loss of wheel steer capability	10	Wheel overload	4	-	8	320	150	Avoid Rod End Clearance	-
	Rod End clearance	Toe	7	Teflon wear	8	-	5	280	150	Wheel functional control + SLA disassembly/ Avoid Rod End Clearance	Production Team
	Rod End / Rod End Plate clearance	Loss of correct suspension point cinematics	7	Light caulking	9	-	6	378	150	New caulking check procedure	Production Team
Permit the wheel vertical movement / Hold and block the rod end	Rod End housing exit	Loss of correct suspension point cinematics	7	Light caulking	9	-	3	189	150	Avoid Rod End / Rod End Plate clearance	Design Team / Production Team
Permit the wheel vertical movement / Permit the wheel rotation around the steering axle	Rod End crushing	High steering torque	6	Heavy caulking	9	-	5	270	150	New caulking check procedure	Design Team / Production Team
Trasmit forces from rod end to trackrod	Rod End Plate breaking	Wheel loss	10	Wheel overload	3	Kinematics Analysis	9	270	150	-	-
Trasmit forces from rod end to trackrod / Permit the link with trackrods in different angular positions	Rod End Plate Weld breaking	Wheel loss	10	Wheel overload	4	Kinematics Analysis	9	360	150	-	-
Define push mount position	SLA Plate bending	Partially loss of suspension bump and rebound capability	7	Wheel overload	5	FEA Simulation	7	245	150	FEA Simulation / Visible Inspection	Mechanics
Define push mount position / Link the trackrods	SLA Plate breaking	Loss of suspension bump and rebound capability	8	Wheel overload	4	FEA Simulation	9	288	150	FEA Simulation	-
Link the trackrods / Trasmit forces from trackrods to the push mount	SLA Plate Weld breaking	Loss of suspension bump and rebound capability	8	Wheel overload	4	-	9	288	150	-	-
Define push position	Push Mount bending	Partially loss of suspension bump and rebound capability	7	Wheel overload	5	-	7	245	150	Visible Inspection	Mechanics
Define push position / Trasmit forces from the SLA plate to the push	Push Mount breaking	Loss of suspension bump and rebound capability	8	Wheel overload	4	-	9	288	150	-	-
Define push position / Trasmit forces from the SLA plate to the push	Push Mount Weld breaking	Loss of suspension bump and rebound capability	8	Wheel overload	4	-	9	288	150	-	-
Trasmit forces between rod end plate	Tube breaking	Wheel loss	10	Cone crush	3	-	9	270	150	Crush FEA Simulation	-
Trasmit forces between rod end plate	Tube Weld breaking	Wheel loss	10	Cone crush	3	-	9	270	150	Crush FEA Simulation	-

Tabella 2 - FMEA Form Sheet

matrice di correlazione tra i FR e i DE. In tal modo è possibile risalire da un malfunzionamento di un FR ai possibili guasti dei DE che lo causano. La possibilità di passare dal dominio funzionale a quello fisico con semplicità consente di ridurre i tempi di analisi del sistema.

In questa fase sono state messe a punto due prove sperimentali al fine di ridurre l'Occurrence:

1. Misura della forza di cianfrinatura.
2. Misura della forza resistente del Rod End.

La prima consente un progettazione più accurata del processo produttivo, mentre la seconda permette di verificare che la lavorazione sia stata eseguita secondo specifica. Per migliorare la Detection è stata definita una semplice procedura di misura dei giochi di funzionamento da eseguirsi durante la manutenzione programmata. Al termine della DFMEA, l'analisi dei nuovi Risk Priority Number (RPN) ha mostrato un sensibile incremento dell'affidabilità del Triangolo.

**VERIFY**

Nella fase di Verify si dovranno eseguire le prove sperimentali mirate a determinare la forza di cianfrinatura ottimale. Solo con la realizzazione del primo prototipo di vettura sarà possibile validare le procedure di ispezione definite in seguito alla FMEA.

**CONCLUSIONI**

Con il presente lavoro si è progettata la nuova sospensione anteriore della vettura Formula SAE 2006 del Firenze Race Team V2 mediante la metodologia Design for Six Sigma.

Il DFSS ha permesso di individuare le caratteristiche critiche della sospensione e di concentrare l'azione progettuale su di esse, evitando di sprecare tempo e risorse su attività che non avrebbero incrementato il valore aggiunto del prodotto. Lo sviluppo del progetto ha seguito l'approccio IDOV e ha comportato l'integrazione di diverse metodologie di sviluppo prodotto come il QFD, la Value Analysis e il Design FMEA.

L'iter progettuale proposto in questo lavoro si è prefisso di ridurre al minimo la necessità di apportare modifiche e correzioni nelle fasi avanzate di sviluppo, in quanto fin dall'inizio si è tenuto conto dei fattori che possono influenzare l'evoluzione del progetto. Per lo sviluppo del progetto si è utilizzato il software Qualica QFD® che ha permesso di gestire ogni fase del lavoro in modo organico e strutturato.

Nella prima fase del lavoro sono stati individuati i clienti della vettura e sono stati raccolti i loro bisogni, che successivamente sono stati trasformati in caratteristiche critiche per la qualità, quantificabili e misurabili. Nella seconda fase è emerso dalla Value Analysis che il Triangolo della so-

sospensione è l'assemblato più rilevante ai fini della soddisfazione del cliente e si è quindi avviato un nuovo progetto DFSS. I *Rod End* ed i *Rod End Plate* sono risultati i DE critici e sono stati quindi riprogettati. L'analisi dei carichi agenti sugli snodi ha mostrato come gli snodi M8 utilizzati sulla vettura 2005 risultassero sovradimensionati, pertanto si è deciso di sostituirli con snodi M6. Un Bill of Material ha permesso di stimare i costi di produzione fin dalla fase di Design. L'utilizzo di snodi a perno filettato avrebbe comportato dei problemi affidabilistici, pertanto si è deciso di sostituirli con degli snodi cianfrinati. Tale soluzione ha reso necessaria la progettazione di un nuovo *Rod End Plate*. In considerazione della criticità della sospensione ai fini della sicurezza della vettura si è

effettuata una Design FMEA sul Triangolo della sospensione. Per ogni requisito funzionale del Triangolo sono stati individuati i possibili modi, effetti e cause di guasto. Sono state in seguito determinate delle prove sperimentali che consentissero di caratterizzare l'operazione di cianfrinatura e si è definita una semplice procedura di misura del gioco di funzionamento dello snodo.

La riprogettazione dei *Rod End* e dei *Rod End Plate* ha permesso di migliorare 7 delle 10 CTQ più importanti. Il modello creato sarà utilizzato per studiare l'impatto delle innovazioni sui costi e sulla soddisfazione del cliente, e per la progettazione della sospensione posteriore, che possiede caratteristiche geometriche e funzionali analoghe a quella anteriore.

---

*Gabriele ARCIDIACONO, nato nel 1967 a Firenze, si è laureato in Ingegneria Meccanica e Dottore di Ricerca e Vice Presidente dell'Accademia Italiana del Sei Sigma; è autore di numerose memorie scientifiche e si occupa di metodi innovativi di progettazione, analisi numerica e sperimentale; bioingegneria, affidabilità qualità e sicurezza nella progettazione meccanica.*

---

*Paolo CITTI, nato nel '43 a Lucca, laureatosi in Ingegneria Nucleare è attualmente Professore di ruolo in «Costruzione di Macchine» particolarmente indirizzato al progetto e costruzione, alla qualità, affidabilità e sicurezza delle costruzioni meccaniche; è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Firenze e del Consiglio direttivo dell'AICQ tosco-ligure, è au-*

---

*tore di numerose pubblicazioni e annovera oltre cento memorie pubblicate su riviste nazionali ed internazionali.*

---

*Claudio PANICHI, nato nel 1979 a Firenze, ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Meccanica, si occupa di progettazione Sei Sigma, sviluppo prodotto e Project Management.*