



Test di implementazioni di dimensionamento geometrico e Tolleranza nel software CAD

Robert R. Lipman ¹



e James J. Filliben ²



¹ Istituto nazionale di standard e tecnologia (NIST), robert.lipman@nist.gov

² Istituto nazionale di standard e tecnologia (NIST), james.filliben@nist.gov

Autore corrispondente: Robert R. Lipman, robert.lipman@nist.gov

Astratto. L'applicazione di tolleranze geometriche e dimensionali (GD&T) alle caratteristiche della parte nel software CAD (Computer Aided Design) è essenziale affinché la parte funzioni correttamente e per guidare i processi di produzione e ispezione a valle. Tuttavia, non è ben definito il modo in cui il software CAD implementa le capacità per un progettista di applicare GD&T a una parte. Naturalmente, i fornitori di software CAD eseguono i propri test interni di tali capacità e gli utenti valutano il software CAD in modo che soddisfi i loro requisiti di modellazione CAD. Tuttavia, non sono mai stati effettuati rigorosi test di pubblico dominio delle implementazioni GD&T del software CAD. Per migliorare questa situazione, il National Institute of Standards and Technology (NIST) ha sviluppato un sistema per testare le implementazioni di GD&T nel software CAD. Geometria della parte rappresentativa con GD &

Errori con rappresentazione semantica e grafica

sono state raccolte e analizzate le presentazioni del GD&T. La metodologia di test, i risultati dei test e l'analisi dei dati dimostrano le prestazioni delle implementazioni GD&T del sistema CAD. I risultati del progetto di test possono essere utilizzati come base per test, metodi e standard futuri per valutare i difetti in GD&T applicati alle caratteristiche delle parti.

Parole chiave: Software CAD, test, tolleranza, GD&T, produzione

DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2020.1241-1265>

1 INTRODUZIONE

La geometria e la topologia delle parti modellate nel software CAD possono essere verificate per eventuali difetti. Il rilevamento dei difetti potrebbe avvenire durante la modellazione della parte o dopo che una parte è stata tradotta in un altro sistema CAD. Sebbene l'aspetto visivo di una parte possa essere accettabile; la rappresentazione geometrica sottostante potrebbe essere fonte di problemi con la successiva analisi degli elementi finiti a valle e con i processi di produzione e ispezione. Ciò è particolarmente vero in un ambiente basato su modelli in cui la rappresentazione geometrica viene utilizzata automaticamente in quei processi a valle [1, 2]. La prassi standard del Dipartimento della difesa degli Stati Uniti per i pacchetti di dati tecnici (MIL-STD-31000A)

[3], nella sezione C.7.1 dell'Appendice C, definisce 66 criteri per la valutazione dei seguenti tipi di geometria CAD: curve, superfici, bordi, loop di bordi, facce, shell e solidi. Ciascun criterio definisce gli "effetti delle condizioni sulla qualità dei dati CAD" su progettazione o disegno, scambio di dati, analisi agli elementi finiti e produzione a controllo numerico. Una condizione è un tipo specifico di difetto per un tipo di geometria. Ad esempio, nella geometria CAD, curve adiacenti, segmenti di linea o superfici potrebbero essere separati da uno spazio o sovrapporsi quando ci si aspetta che siano perfettamente adiacenti. Questo tipo di difetto potrebbe causare il fallimento degli algoritmi di meshing agli elementi finiti, il fallimento dei percorsi utensile a controllo numerico computerizzato (CNC) o creare un aspetto visivo indesiderato.

Tuttavia, alcuni dei problemi di qualità dei dati CAD potrebbero non risultare in un problema evidente con l'aspetto visivo della geometria. È stato sviluppato un intero mercato di software per convalidare la geometria CAD per verificare che la rappresentazione geometrica sottostante sia priva di difetti che potrebbero influire sul suo utilizzo a valle da parte dei processi di analisi, produzione e ispezione [4]. Questa funzione viene comunemente chiamata "correzione" della geometria CAD. Il software di convalida CAD è importante per convalidare le traduzioni di modelli CAD da un sistema software o formato a un altro. La rappresentazione geometrica è la rappresentazione matematica interna di punti, curve, superfici e solidi. In alcuni software CAD, un kernel di geometria come ACIS [5] o Parasolid [6] viene utilizzato per la rappresentazione matematica sottostante. Un utente di software CAD visualizza l'aspetto visivo delle rappresentazioni geometriche matematiche. L'aspetto visivo è noto come "presentazione" e verrà utilizzato per il resto di questo articolo.

Un'altra caratteristica importante di una parte modellata nel software CAD sono le informazioni sul prodotto e sulla produzione (PMI). Un aspetto importante del PMI sono le annotazioni, applicate ai bordi e alle facce di una parte, per specificare la quotatura e la tolleranza geometrica (GD&T) [7]. Il PMI include anche altre caratteristiche non geometriche come texture superficiali, note di processo, specifiche dei materiali e simboli di saldatura, tuttavia, il fulcro di questa ricerca è GD&T. GD&T viene utilizzato per specificare i limiti di imperfezione delle caratteristiche di una parte in modo che funzioni correttamente in un assieme e guidi i processi di produzione e ispezione. Diversi standard di settore specificano il linguaggio simbolico per GD&T applicato ai disegni bidimensionali (2D) e ai modelli tridimensionali (3D): ASME Y14.5 [8], ASME Y14.41 [9], ISO 1101 [10], e ISO 16792 [11]. Le caratteristiche comuni di GD&T includono tolleranze geometriche per posizione, planarità, profilo della superficie e perpendicolarità; tolleranze dimensionali su diametro e lunghezza; e target di riferimento e caratteristiche di riferimento. Un simbolo GD&T ha due caratteristiche: (1) la sua sintassi su un disegno e (2) la semantica di come si applica alle superfici e ai bordi di una parte. La Figura 1 mostra la sintassi e la struttura di una tolleranza di planarità come definita nello standard ASME Y14.5 per il dimensionamento e la tolleranza [8]. Le parti superiore e inferiore del disegno mostrano due viste laterali di una parte semplice. La parte superiore mostra la sintassi di una tolleranza di planarità come sarebbe visualizzata su un disegno 2D o in un modello 3D. Il simbolo di tolleranza per la planarità è un parallelogramma e il numero è la larghezza della zona di tolleranza. La cornice rettangolare ha una freccia che punta alla superficie superiore della parte a cui viene applicata la tolleranza di planarità. La semantica della tolleranza di planarità è descritta nella parte inferiore dove la superficie superiore del pezzo deve trovarsi tra due piani paralleli distanti 0,15 unità. Le zone di tolleranza possono avere altre forme come il tubo che racchiude le superfici di un foro o un cilindro che circonda la linea mediana di un cilindro. La tolleranza di planarità definita su un disegno può essere utilizzata come: (1) vincoli su un macchinista che programma una fresatrice con gli strumenti e i percorsi utensile corretti per ottenere la definizione della caratteristica desiderata e (2) per sviluppare un piano di ispezione per convalidarlo la superficie è accettabile entro la tolleranza di planarità specificata. La semantica della tolleranza di planarità è descritta nella parte inferiore dove la superficie superiore del pezzo deve trovarsi tra due piani paralleli distanti 0,15 unità. Le zone di tolleranza possono avere altre forme come il tubo che racchiude le superfici di un foro o un cilindro che circonda la linea mediana di un cilindro. La tolleranza di planarità definita su un disegno può essere utilizzata come: (1) vincoli su un macchinista che programma una fresatrice con gli strumenti e i percorsi utensile corretti per ottenere la definizione della caratteristica desiderata e (2) per sviluppare un piano di ispezione per convalidarlo la superficie è accettabile entro la tolleranza di planarità specificata. La semantica della tolleranza di planarità è descritta nella parte inferiore dove la superficie superiore del pezzo deve trovarsi tra due piani paralleli distanti 0,15 unità. Le zone di tolleranza possono avere altre forme come il tubo che racchiude le superfici di un foro o un cilindro che circonda la linea mediana di un cilindro. La tolleranza di planarità definita su un disegno può essere utilizzata come: (1) vincoli su un macchinista che programma una fresatrice con gli strumenti e i percorsi utensile corretti per ottenere la definizione della caratteristica desiderata e (2) per sviluppare un piano di ispezione per convalidarlo la superficie è accettabile entro la tolleranza di planarità specificata. Le zone di tolleranza possono avere altre forme come il tubo che racchiude le superfici di un foro o un cilindro che circonda la linea mediana di un cilindro. La tolleranza di planarità definita su un disegno può essere utilizzata come: (1) vincoli su un macchinista che programma una fresatrice con gli strumenti e i percorsi utensile corretti per ottenere la definizione della caratteristica desiderata e (2) per sviluppare un piano di ispezione per convalidarlo la superficie è accettabile entro la tolleranza di planarità specificata. Le zone di tolleranza possono avere altre forme come il tubo che racchiude le superfici di un foro o un cilindro che circonda la linea mediana di un cilindro. La tolleranza di planarità definita su un disegno può essere utilizzata come: (1) vincoli su un macchinista che programma una fresatrice con gli strumenti e i percorsi utensile corretti per ottenere la definizione della caratteristica desiderata e (2) per sviluppare un piano di ispezione per convalidarlo la superficie è accettabile entro la tolleranza di planarità specificata.

1.1 Rappresentazione semantica vs. presentazione grafica

Le tolleranze possono essere applicate alle parti nell'ambiente di progettazione 3D di un sistema CAD. In questo modo, esiste un'associazione interna al sistema CAD tra le tolleranze e le caratteristiche geometriche che vincolano. La rappresentazione interna al sistema CAD viene definita rappresentazione semantica di una tolleranza.

Le rappresentazioni semantiche di tolleranze e dimensioni sono un caratteristica importante della definizione di parti in un progetto basato su modello 3D (MBD). Un MBD di una parte, sotto forma di un modello CAD o di un file neutro equivalente, può quindi essere consumato a valle

software di pianificazione delle lavorazioni e delle ispezioni. Idealmente, questo può eliminare il rientro soggetto a errori, e talvolta l'interpretazione, delle informazioni in un ambiente basato sul disegno [1].

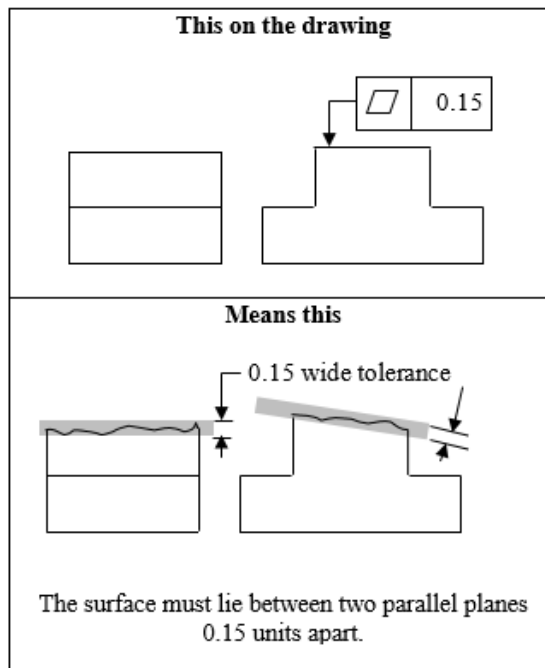


figura 1: sintassi e semantica della tolleranza di planarità come definito in ASME Y14.5 [8].

La Figura 2 mostra una parte con una varietà di caratteristiche GD&T, tra cui: posizione, profilo della superficie e tolleranze di planarità; tolleranze dimensionali per fori, lamature, profondità e raggi [12]. Le caratteristiche specifiche di GD&T mostrate nelle definizioni dei casi di test sono indicate come "annotazioni" nel report. La presentazione grafica delle caratteristiche GD&T nella figura può essere associata alla loro rappresentazione semantica in un modello CAD o in file neutri come STEP, noto come ISO 10303 Standard for the Exchange of Product model data [13, 14].

L'ambito della definizione e dell'uso delle caratteristiche GD&T ricade in tre categorie: (1) gli standard ASME e ISO per la definizione delle caratteristiche GD&T, di cui vi è una certa sovrapposizione tra i due, (2) l'ambito delle caratteristiche GD&T che possono essere modellati nel sistema CAD e (3) i requisiti di progettazione per una parte, ovvero quali caratteristiche un utente desidera applicare a una parte in un sistema CAD. A seconda del sistema CAD, le caratteristiche di GD&T possono non avere o possono avere una rappresentazione semantica interna. Nel primo caso, le caratteristiche GD&T vengono applicate come testo a un modello e sono solo una presentazione grafica interpretabile dall'uomo. Nel secondo caso, le caratteristiche GD&T sono definite, nel caso di tolleranze geometriche, dal loro tipo di tolleranza, ampiezza della zona di tolleranza e modificatori, sistema di riferimento, e un'associazione a una caratteristica geometrica nel modello. In questo caso viene generata automaticamente la presentazione grafica della caratteristica GD&T.

Pertanto, la grafica

la presentazione è collegata alla sua rappresentazione semantica interna. Questo documento si concentrerà sul secondo caso e affronterà la questione del test delle implementazioni delle caratteristiche GD&T nei sistemi CAD.

Come i criteri per valutare la qualità della geometria, MIL-STD-31000A, nell'Appendice C, sezione C.7.9, definisce dieci categorie di criteri di qualità dell'annotazione. Tali categorie sono: annotazione non grafica, annotazione non visualizzata, applicazione errata di caratteristiche geometriche alle feature del modello, uso non corretto delle quote di base, quote imprecise o quote non in scala, simboli delle feature di Riferimento

mancante o applicato in modo errato, utilizzo mancante o errato di simboli nei blocchi di tolleranza e nelle quote, errori di visualizzazione, uso improprio di tipi di linea e punte di freccia in direttrici e quote ed errori nei valori di tolleranza. Alcuni dei criteri sono relativi solo alla presentazione di GD&T su disegni 2D o modelli 3D.

Altri criteri potrebbero applicarsi alla presentazione di GD&T e / o dei suoi rappresentazione in un sistema CAD.

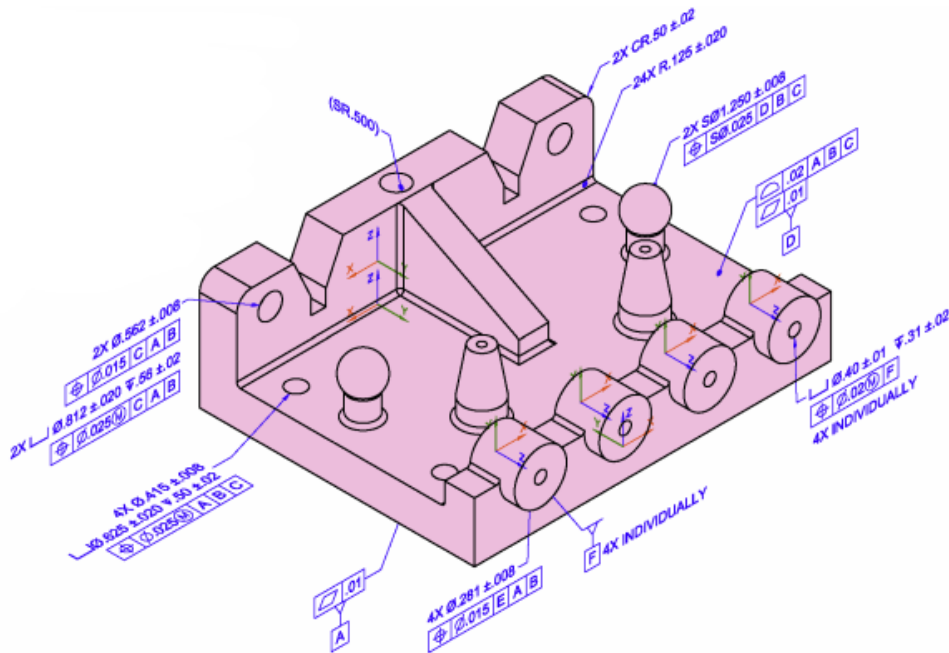


Figura 2: Parte di esempio con GD&T [12].

La Figura 3 è un esempio di disegno 2D, dalla sezione MIL-STD-31000A C.7.9.7, per "l'uso mancante o errato dei simboli nei blocchi di tolleranza e nelle dimensioni". Tuttavia, non si può presumere che i simboli e le tolleranze di quota mancanti (indicati dalle frecce etichettate b, c e d) siano mancanti anche dal modello CAD nativo. Potrebbero mancare solo da un disegno. Questo tipo di criterio è specificato nella sezione C.7.9.1 per Annotazioni non grafiche e influenzerebbe il consumo visivo a valle delle informazioni di annotazione. Al contrario, la corretta presentazione di un'annotazione su un disegno non implica che tutta la sua rappresentazione semantica associata sia nel modello CAD nativo. MIL-STD31000A non specifica alcun criterio di qualità dell'annotazione per questo caso.

Un altro potenziale problema con le caratteristiche GD&T nella Figura 3 è il modo in cui sono associate alla geometria della parte 3D. Nella maggior parte dei casi, il diametro del foro dovrebbe essere associato alle superfici del cilindro del foro, piuttosto che associato in modo errato ai bordi circolari del foro. Ciò influirebbe sul modo in cui vengono ispezionate le tolleranze per un foro (cilindro o bordo), se il piano di ispezione è derivato direttamente da un modello 3D.

L'applicazione delle caratteristiche GD&T alla geometria 3D può essere ispezionata da un software che cerca le caratteristiche della geometria della parte e controlla che vengano applicati i tipi ei valori corretti. Ciò presuppone che l'utente possa applicare tutte le caratteristiche GD&T richieste a una parte. Tuttavia, una domanda più fondamentale da porsi è quanto bene i sistemi CAD possono modellare l'ampia varietà di caratteristiche GD&T. Questa domanda verrà esaminata nelle sezioni seguenti.

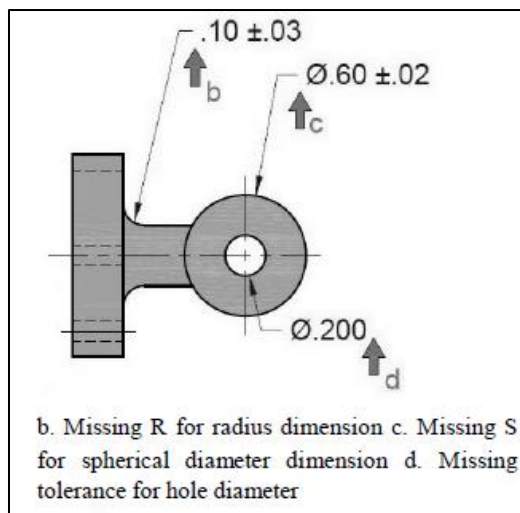


Figura 3: Esempio di disegno 2D dei criteri di qualità dell'annotazione da MIL-STD-31000A [3].

2 TEST DI GD&T IN SISTEMI CAD

2.1 Metodologie di test

Frechette e Fischer [15] propongono diversi scenari per testare il software CAD secondo gli standard GD&T. Tutti gli scenari di test iniziano con le definizioni dei casi di test come la Figura 2. Un caso di test include la definizione della geometria della parte, le caratteristiche GD&T (definite dagli standard ASME o ISO) e le superfici geometriche o bordi a cui vengono applicati. Il primo e il più semplice scenario verifica la capacità del software CAD di modellare il GD&T in un caso di test. Il secondo scenario esegue un round trip test in cui il modello CAD nativo viene riaperto nello stesso software CAD per verificare se la presentazione delle caratteristiche GD&T è cambiata. Il terzo scenario verifica i file derivati neutri generati dal software CAD. Un file neutro comunemente usato è STEP [13, 14]. Questo scenario richiede la creazione di un file STEP di riferimento dal test case oltre a un file STEP esportato dal sistema CAD. Il file STEP di riferimento viene generato indipendentemente dal sistema CAD e si presume che sia una rappresentazione esatta del caso di test. I file STEP generati dal sistema CAD e di riferimento vengono quindi confrontati tra loro. Il quarto scenario propone metodi per automatizzare il processo. In termini pratici, alcuni degli scenari sono difficili da eseguire. La generazione di file neutri di riferimento per qualsiasi cosa tranne i modelli più semplici potrebbe essere un processo molto difficile che richiede una propria metodologia per dichiarare che il file neutro è effettivamente un file neutro di riferimento. Il file STEP di riferimento viene generato indipendentemente dal sistema CAD e si presume che sia una rappresentazione esatta del caso di test. I file STEP generati dal sistema CAD e di riferimento vengono quindi confrontati tra loro. Il quarto scenario propone metodi per automatizzare il processo. In termini pratici, alcuni degli scenari sono difficili da eseguire. La generazione di file neutri di riferimento per qualsiasi cosa tranne i modelli più semplici potrebbe essere un processo molto difficile che richiede una propria metodologia per dichiarare che il file neutro è effettivamente un file neutro di riferimento. Il file STEP di riferimento viene generato indipendentemente dal sistema CAD e si presume che sia una rappresentazione esatta del caso di test. I file STEP generati dal sistema CAD e di riferimento vengono quindi confrontati tra loro. Il quarto scenario propone metodi per automatizzare il processo. In termini pratici, alcuni degli scenari sono difficili da eseguire. La generazione di file neutri di riferimento per qualsiasi cosa tranne i modelli più semplici potrebbe essere un processo molto difficile che richiede una propria metodologia per dichiarare che il file neutro è effettivamente un file neutro di riferimento.

Kindrick et al. [16] descrivono una procedura di verifica della conformità e dell'interoperabilità per i file neutri STEP. Il test di conformità è definito come "la valutazione di un prodotto per determinare se si comporta come previsto durante l'interoperabilità con un sistema di riferimento". La Figura 4 è un diagramma della procedura di test di conformità e interoperabilità. Le specifiche di test vengono utilizzate per generare casi di test modellati in un sistema CAD da cui viene esportato un file STEP. L'analisi di copertura misura le definizioni dei casi di test e il file STEP per cui sono coperte le caratteristiche di GD&T. A causa delle limitazioni del sistema CAD per esportare tutte le informazioni PMI in un file STEP, potrebbe esserci una discrepanza tra quanto riportato dall'analisi di copertura per il file STEP e la specifica dello scenario di test. Il controllo della conformità del file STEP controlla la sintassi e la struttura. Questo può essere considerato come il controllo dell'ortografia (sintassi) e della grammatica (struttura) di un file STEP. L'analisi verifica che tutti gli attributi siano del tipo corretto e che esistano le relazioni corrette tra le informazioni. L'analisi può essere automatizzata con un software di controllo della conformità [7]. Sulla base dell'analisi della copertura, è possibile sviluppare criteri di test per misurare il successo dell'importazione

un file STEP in un altro sistema CAD ed eseguire un'analisi semantica del modello CAD risultante. L'analisi semantica verifica che la geometria e le caratteristiche GD&T siano corrette e che esistano le relazioni corrette tra gli elementi di dati nel modello CAD. I criteri di qualità della geometria e dell'annotazione di MIL-STD-31000A possono essere utilizzati come punto di partenza per i criteri di prova. L'analisi semantica è una misura del successo dell'interoperabilità tra i due sistemi CAD. Il test di interoperabilità senza controllo di conformità garantisce solo l'interoperabilità punto a punto tra due sistemi.

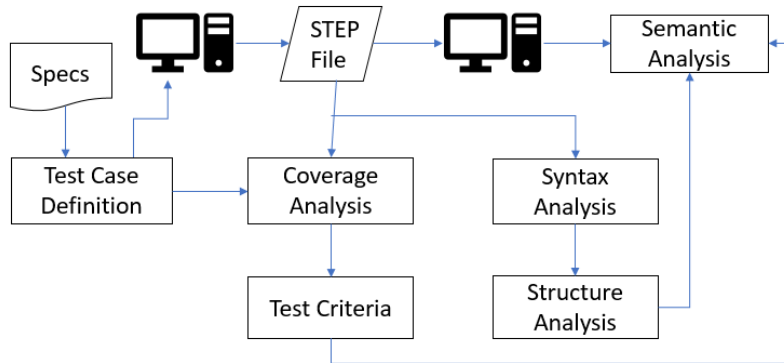


Figura 4: Test di conformità e interoperabilità per i file STEP [16].

Sulla base della figura precedente, la figura mostra un sistema per testare le implementazioni GD&T del sistema CAD

5. Le specifiche vengono utilizzate per generare casi di test modellati in un sistema CAD. Sulla base di un'analisi di copertura delle caratteristiche GD&T nei casi di test, vengono sviluppati criteri di test per eseguire un'analisi della presentazione grafica e della rappresentazione semantica di tali caratteristiche nel modello CAD risultante.

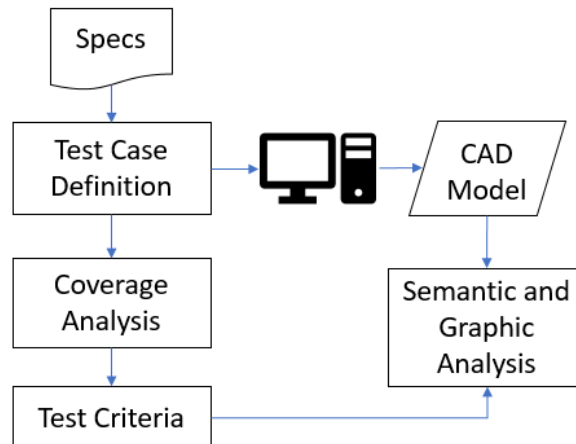


Figura 5: Test delle implementazioni GD&T del sistema CAD.

2.2 Progetto di test NIST

Tra il 2012 e il 2015, la Systems Integration Division del National Institute of Standards and Technology (NIST) ha sviluppato un sistema per testare le implementazioni di GD&T nei sistemi CAD [12, 17,

18]. Sulla base delle metodologie di test sopra descritte, è stata utilizzata la seguente procedura di test, mostrata nella Figura 6. Gli standard ASME Y14.5-1994 [8] e Y14.41-2003 [9] per il dimensionamento e la tolleranza sono stati utilizzati come base per le definizioni dei casi di test. Sono state create definizioni di casi di test di geometrie di parti rappresentative a cui è stata applicata un'ampia varietà di caratteristiche GD&T per tolleranze dimensionali, tolleranze geometriche, target di Riferimento e feature di Riferimento. Undici definizioni di casi di test sono state sviluppate e riviste da un team di esperti di GD&T. Ogni caratteristica GD&T fa riferimento alle clausole pertinenti degli standard ASME Y14 che regolano l'uso di quella caratteristica. Analisi di copertura delle definizioni dei casi di test quantificate il numero di tipi GD &

Le definizioni dei casi di test sono state modellate in quattro sistemi CAD: Dassault Systems CATIA [19], SolidWorks [20], PTC Creo [21] e Siemens NX [22]. È stata data la preferenza a modellare ogni caratteristica GD&T nel miglior modo possibile come rappresentazione semantica con un fallback alla presentazione grafica, se necessario. Il software di convalida CAD CADIQ [23] è stato utilizzato per verificare la rappresentazione semantica e la presentazione grafica delle caratteristiche GD&T nei modelli CAD rispetto alle definizioni dei casi di test. File derivati neutri, anche con rappresentazione semantica e presentazione grafica delle caratteristiche GD&T, nei formati STEP AP242, JT [24] e 3D PDF [25] sono stati generati dai modelli CAD e convalidati rispetto ai modelli CAD con CADIQ. Sia per il processo di verifica che per quello di convalida, sono stati sviluppati criteri di prova,

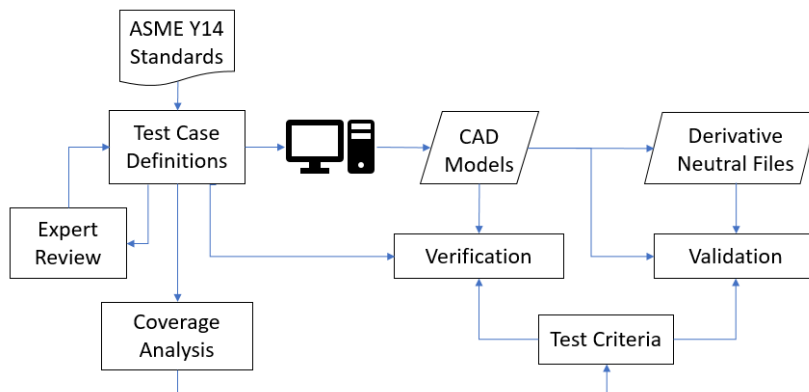


Figura 6 Progetto di test NIST.

Sono state sviluppate due serie di definizioni di casi di test. La Figura 7 mostra due delle cinque definizioni di casi di test combinati (CTC). Questi casi di test sono "combinati" in quanto ogni CTC ha circa dieci diverse annotazioni individuali, composte da caratteristiche GD&T, applicate a ciascuna delle cinque geometrie delle parti del caso di test. Lo schema di annotazione non è necessariamente realistico e ha il solo scopo di testare ogni singola annotazione. La selezione delle caratteristiche GD&T ha lo scopo di esercitare le caratteristiche degli standard di tolleranza ASME Y14. I CTC sono stati modellati nelle versioni dei quattro sistemi CAD disponibili nel 2012.

Due delle sei definizioni di casi di test completamente tollerati (FTC) sono mostrate nella Figura 8. Anche la Figura 2 è un FTC. Ciascun caso di test potrebbe avere più viste per descrivere tutte le annotazioni. Questi casi di test sono "completamente tollerati" in quanto per ogni FTC tutte le caratteristiche geometriche sono tollerate e sono adeguatamente controllate e vincolate secondo gli standard ASME Y14. Tre dei sei FTC sono stati modellati nelle versioni dei quattro sistemi CAD disponibili nel 2015.

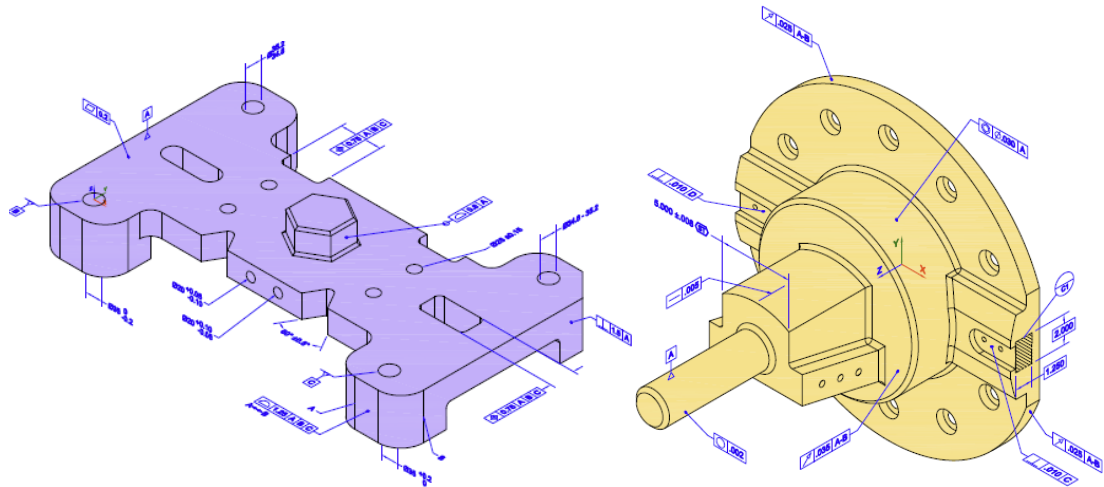


Figura 7: Definizioni di casi di test combinati (CTC).

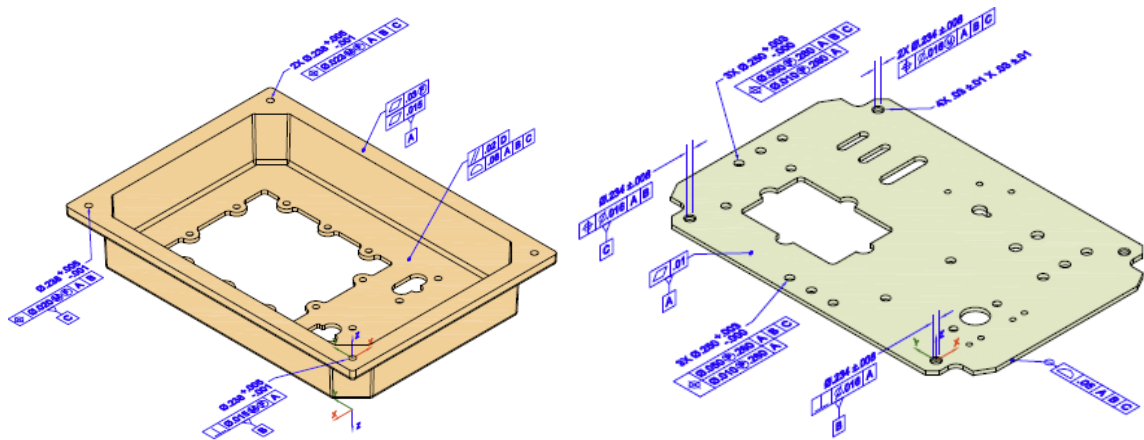


Figura 8: Definizioni di casi di test completamente tollerati (FTC).

2.3 Analisi della copertura

L'analisi della copertura nella Figura 6 viene utilizzata per enumerare le caratteristiche delle caratteristiche GD&T nelle definizioni dei casi di test. L'analisi è importante per capire quali caratteristiche GD&T sono incluse in ogni caso di test e per aiutare a sviluppare criteri di test per le attività di verifica e validazione in Figura

6.

La tabella 1 mostra il numero di volte in cui un tipo di tolleranza appare nei casi di test. Potrebbe non essere ovvio dal disegno del test case che l'unica tolleranza di angolarità è in CTC 3 o che le tolleranze di runout sono in CTC 5. Sebbene le tolleranze di posizione siano comuni a molte parti prodotte, CTC 5 e FTC 11 non hanno tolleranze di posizione.

Tolleranza	CTC 1	CTC 2	CTC 3	CTC 4	CTC 5	FTC 6	FTC 7	FTC 8	FTC 9	FTC 10	FTC 11
Caratteristica											
angolarità			1								

eccentricità circolare					3						1
coassialità					1						
concentricità											
cilindricità										2	
planarità	1	1	1			3	1	3	1	1	1
profilo di linea		1									
parallelismo							1	5			
perpendicolarità	1	3	2		2	2	1	1	4	6	
posizione	2	4	6	4		11	10	13	23	19	
rotondità					1						1
rettitudine					1					1	
profilo di superficie	2	13	3	3		11	11	11	3	9	1
simmetria										1	
runout totale					2						
tutto intorno	1							6	3	2	
composito				2		4	6	6	2	3	

Tabella 1: Tipi di tolleranza dello scenario di test.

È stata sviluppata una visualizzazione dei dati basata sul web per esplorare la distribuzione di tutti gli aspetti delle caratteristiche del test case GD&T (<https://pages.nist.gov/CAD-PMI-Testing/models.html>). La visualizzazione dei dati è stata sviluppata con la versione open source del software di analisi dei dati Keshif [26, 27]. Un Feature Control Frame (FCF) è classificato in singole caratteristiche GD&T per tolleranze, dimensioni, target di Riferimento e feature di Riferimento. La Figura 9 è uno screenshot della visualizzazione dei dati che mostra i grafici a barre per la distribuzione di tutte le 421 caratteristiche GD&T nei casi di test e la loro distribuzione per tipi di annotazione per tolleranze, dimensioni, target di riferimento e funzioni di riferimento. I numeri a sinistra di ogni barra sono il numero totale di caratteristiche GD&T per quel test case o tipo di annotazione. Le dimensioni sono suddivise in tre categorie per differenziare le dimensioni relative ai fori e altri tipi di dimensioni come le pendenze. La differenziazione aiuta anche a misurare e riportare i risultati della verifica. La figura mostra che le tolleranze per angolarità, eccentricità circolare, coassialità, cilindricità, profilo della linea, parallelismo, rotondità, rettilineità, simmetria e eccentricità totale non sono ben rappresentate nei casi di test, rendendo questi casi di test una scelta sbagliata per testare quei tipi di tolleranze. Tuttavia, le tolleranze più comunemente utilizzate come la posizione e il profilo della superficie sono ben rappresentate.

Le caratteristiche GD&T possono essere filtrate per test case, tipo di annotazione e modificatori di annotazione. La Figura 10 mostra tutte le FCF per le tolleranze di perpendicolarità e la loro distribuzione nei casi di test. Gli FCF vengono visualizzati nel miglior modo possibile con un set di caratteri limitato. Il numero a destra dell'FCF è il numero di occorrenze nelle definizioni dello scenario di test. Le prime due tolleranze di perpendicolarità compaiono tre volte nei casi di test mentre tutte le altre compaiono solo una volta. Un ulteriore filtraggio può mostrare che l'unica tolleranza di perpendicolarità con una zona di tolleranza proiettata (settima dal basso) è in FTC 7. Questa analisi dettagliata della copertura può aiutare a trovare le definizioni dei casi di test che hanno una particolare caratteristica GD&T.

2.4 Criteri di prova

Per questo progetto di test, vengono utilizzati criteri di test per misurare il successo delle implementazioni GD&T nei sistemi CAD. Il successo è definito dalla capacità di un sistema CAD di modellare con precisione tutta la GD&T semantica e grafica in una definizione di test case. Errori nella modellazione di uno qualsiasi dei GD&T potrebbero influenzare l'interpretazione umana di un disegno o il consumo automatizzato in un ambiente basato su modelli per i processi di analisi, produzione e ispezione a valle. Quattro tipi di modello CAD

le caratteristiche sono state misurate nel progetto di test: caratteristiche GD&T, sistemi di coordinate, geometria supplementare e viste salvate. Tuttavia, il focus di questo documento sarà solo il test delle caratteristiche GD&T.

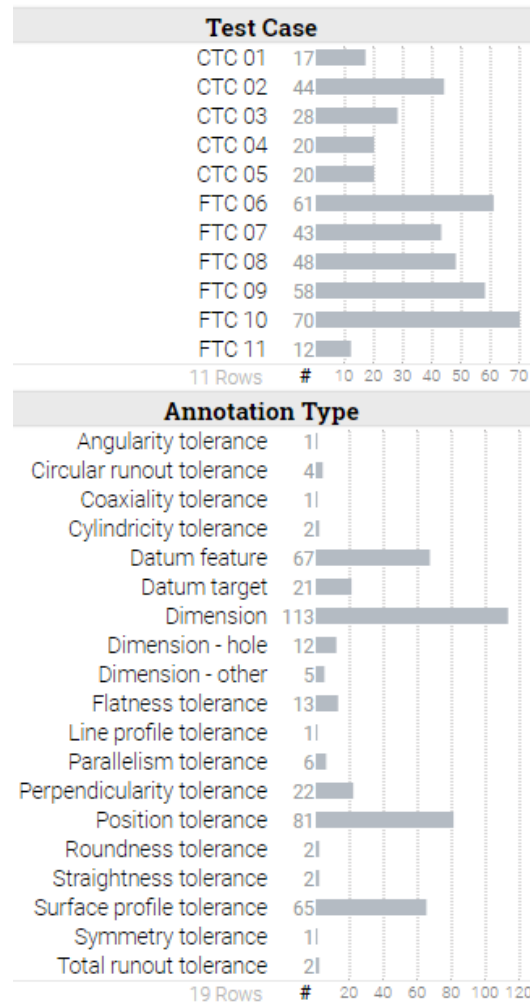


Figura 9: Distribuzione delle caratteristiche GD&T nei casi di test e nei tipi di annotazione.

Le caratteristiche di GD&T sono state misurate in base alla correttezza della loro rappresentazione semantica e presentazione grafica. La sezione 1.1 definisce la rappresentazione semantica e la presentazione grafica. Sono stati identificati tre tipi di limitazioni semantiche di annotazione: geometria, parametri e struttura. Sono stati identificati sei tipi di limitazioni grafiche di annotazione: visibilità, layout, posizione, orientamento, linee e testo.

La tabella 2 descrive, in termini generali, i criteri di prova per i limiti semantici e grafici. Prima di testare le implementazioni del sistema CAD delle caratteristiche GD&T, c'era un'idea generale basata sull'esperienza con il software di convalida CADIQ, sui tipi di errori che potevano essere riscontrati. Durante il progetto di test, le categorie dei criteri del test di annotazione sono state perfezionate in base agli errori effettivi riscontrati con le caratteristiche GD&T.

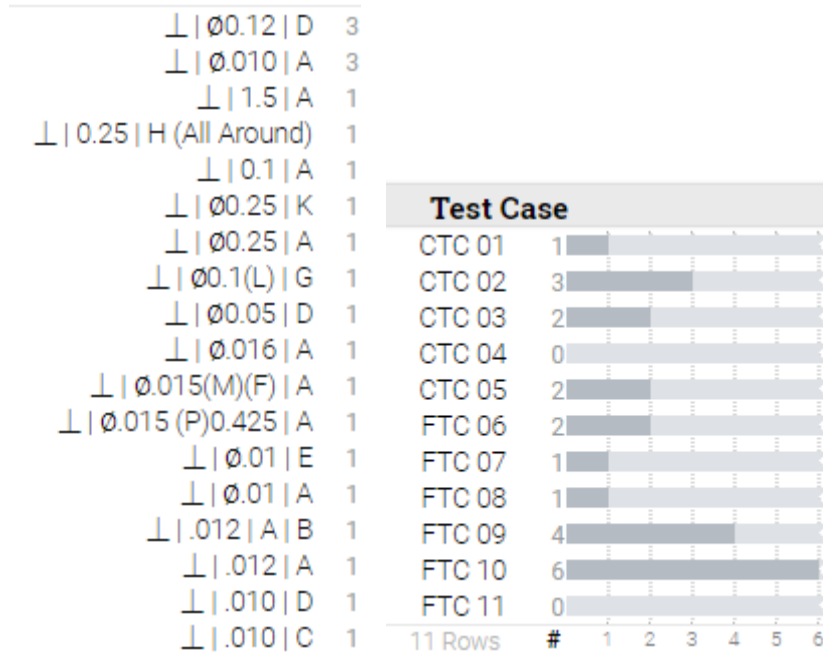


Figura 10: Tolleranze di perpendicolarità e distribuzione nei casi di test.

	Limitazione	Criteri di prova
Annotazione Semantica	Struttura	Combinazioni errate di FCF e quote in un'annotazione
	Parametri	Parti mancanti di una quota o FCF o utilizzo di testo grafico per modellare parti di un'annotazione che non possono essere modellate semanticamente
	Geometria	Associazione di quota, destinazione del Riferimento e FCF alle entità geometriche errate
Annotazione Grafica	Visibilità	Le annotazioni o le funzioni di Riferimento non vengono visualizzate nella vista salvata corretta
	disposizione	Parti di annotazioni non visualizzate correttamente l'una rispetto all'altra
	Posizione	Posizione dell'annotazione errata in una vista salvata Orientamento
	Orientamento	dell'annotazione errata in una vista salvata Linee di direttrice o estensione
	Linee	mancanti, estranee o posizionate in modo errato
	Testo	Testo di annotazione mancante, estraneo o errato

Tavolo 2: Categorie di criteri del test di annotazione.

Le figure seguenti sono due semplici esempi di errori GD&T specifici rilevati dal progetto di test. La Figura 11 mostra un FCF in cui il modificatore disposto in modo diseguale era presentato solo come testo grafico. Tuttavia, non esiste alcun significato semantico associato al modificatore, sebbene l'annotazione appaia corretta nella figura. Il software di convalida non ha trovato alcuna rappresentazione interna del modificatore nel software CAD. Questo errore è stato classificato come errore di parametro semantico nella Tabella 2. Non ci sono problemi con l'annotazione se viene utilizzata solo in un processo basato su disegno.



Figura 11: Modificatore disposto in modo diseguale come solo testo.

La Figura 12 mostra un FCF in cui manca l'ampiezza della zona di tolleranza proiettata. Questo errore è stato classificato come errore di testo grafico nella Tabella 2. Semanticamente, non c'erano problemi con il valore della zona di tolleranza proiettata nel modello CAD, quindi il modello CAD poteva essere utilizzato per il consumo a valle automatizzato.



Figura 12: Magnitudo della zona di tolleranza del progetto mancante.

2.5 Risultati del test

Esistono molti modi per interpretare gli errori per le caratteristiche GD&T. Si possono porre molte domande alle quali si spera possano trovare risposta i risultati del test. Le domande logiche da porsi sarebbero: quale dei quattro sistemi CAD utilizzati per modellare le definizioni dei casi di test è migliore degli altri? Ci sono stati miglioramenti nei sistemi CAD tra le versioni del 2012 (utilizzate per modellare il CTC) e le versioni 2015 (utilizzate per modellare l'FTC)? Uno dei casi di test è stato particolarmente problematico? Alcuni tipi di annotazioni hanno più errori di altri? Quali lezioni apprese ci sono dal progetto di test?

La raccolta dei risultati dei test è considerata come un esperimento scientifico in cui ogni GD&T caratteristica è misurata 36 volte, una volta in ciascuno dei quattro sistemi CAD nelle nove categorie semantiche e grafiche nella tabella 2.

Ci sono 296 caratteristiche GD&T individuali nel CTC e FTC che sono state testate (FTC 7, 10, 11 non sono state testate) e misurate 36 volte per un totale di 10.656 misurazioni. In totale, il progetto di test ha trovato 411 casi di 98 tipi unici di errori delle caratteristiche GD&T che sono stati classificati nelle tre categorie di grafici semantici e sei annotazioni nella Tabella 2.

Il numero di misurazioni (10656) e di errori di annotazione (411) si traduce in una percentuale di successo nella modellazione delle annotazioni nei sistemi CAD di circa il 96 per cento. Anche se questo potrebbe sembrare piuttosto alto, qualsiasi errore GD&T può avere gravi conseguenze per i processi a valle. La sezione seguente esplorerà i dettagli della distribuzione dell'errore tra i modelli CAD, i sistemi CAD, il tipo di annotazione e il tipo di errore.

2.6 Distribuzione degli errori

Al livello più semplice, le 411 istanze di errori caratteristici GD&T possono essere raggruppate in base a varie caratteristiche. È stata inoltre sviluppata una visualizzazione dei dati basata sul web per esplorare la distribuzione di tutti gli aspetti

di il test Astuccio GD&T caratteristiche ([https://pages.nist.gov/CAD-PMI-Testing / results.html](https://pages.nist.gov/CAD-PMI-Testing/results.html)). La Figura 13 mostra uno screenshot di un grafico a barre con la distribuzione degli errori dalle categorie descritte nella Tabella 2. C'è una divisione quasi uguale tra il numero di errori semantici (204) e gli errori grafici (207). Tuttavia, esiste un'ampia gamma del numero di errori in ciascuna categoria, da 16 nella visibilità e nell'orientamento dell'annotazione a 82 nella geometria dell'annotazione. Ogni singola annotazione può avere più errori semantici o grafici.

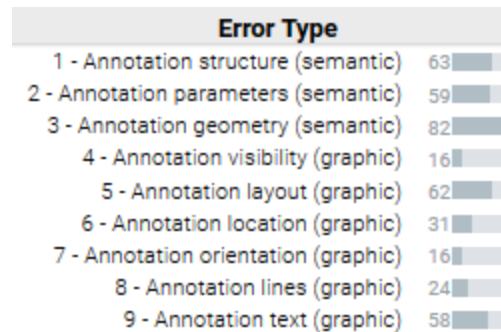


Figura 13: Distribuzione degli errori per tipo di errore.

La Figura 14 mostra la distribuzione degli errori per scenario di test. CTC 2 e 4 hanno più errori rispetto agli altri CTC. Ciò potrebbe significare che ci sono alcune annotazioni in quei casi di test che sono difficili da modellare correttamente. Rispetto al CTC, l'FTC dovrebbe contenere più errori perché ci sono più annotazioni nell'FTC. Questo è vero per FTC 6 e 9 ma non per FTC 8. Come il CTC, FTC 6 e 9 potrebbero avere annotazioni più "problematiche" da modellare rispetto a FTC 8. Questa discrepanza verrà esaminata di seguito.

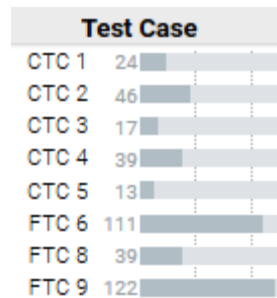


Figura 14: Distribuzione degli errori per test case.

Le caratteristiche di Riferimento, le quote, le tolleranze di posizione e le tolleranze del profilo di superficie hanno la maggior parte dei tipi di annotazioni, come mostrato nella Figura 9. La Figura 15 mostra che questi tipi di annotazioni hanno anche molti errori associati, come ci si potrebbe aspettare. Tuttavia, anche le quote del foro, i target di Riferimento e altre quote presentano un gran numero di errori, indicando che questi tipi di annotazioni potrebbero essere problematici da modellare. Diversi tipi di annotazioni (angolarità, eccentricità circolare, coassialità, cilindricità, rotondità, simmetria e tolleranze di eccentricità totale) non sono mostrati nella Figura 15 e non sono associati a errori. Tra tutti i CTC e FTC ci sono solo 13 delle 296 annotazioni senza errori.

La Figura 16 mostra la distribuzione degli errori per sistema CAD, caso di test e tipo di annotazione. I quattro sistemi CAD, CATIA, Creo, NX e SolidWorks sono identificati solo come CAD A, B, C e D, non necessariamente in questo ordine. Uno degli scopi del progetto di test era fornire privatamente feedback ai fornitori di software CAD per migliorare le loro implementazioni di PMI. Il progetto ha avuto successo nel farlo, tuttavia, non è mai stata intenzione del progetto valutare o classificare pubblicamente i sistemi CAD, quindi la designazione pubblica dei sistemi CAD solo con una lettera. Alcune tendenze sono evidenti dalla Figura 16. Le versioni 2015 dei sistemi CAD presentano più errori rispetto alle versioni 2012. Questo è prevedibile poiché l'FTC modellato nelle versioni 2015 ha più caratteristiche GD&T rispetto al CTC modellato nelle versioni 2012, quindi, più possibilità di errori. Entrambe le versioni di CAD A hanno meno errori rispetto agli altri sistemi CAD e una buona indicazione che CAD A

ha una migliore implementazione della modellazione GD&T. Un'anomalia nei risultati del test è per CAD C. Le versioni 2012 e 2015 hanno quasi lo stesso numero di errori, 49 e 51, rispettivamente.

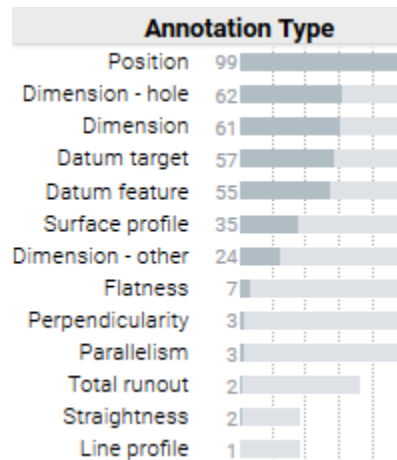


Figura 15: Distribuzione degli errori per tipo di annotazione.

Sulla base degli altri tre sistemi CAD, ci si aspetterebbe che ci sarebbero stati molti più errori per la versione 2015 di CAD C o meno errori per la versione 2012. Questa discrepanza sarà esaminata nelle figure successive.

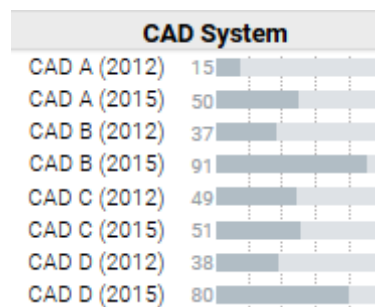


Figura 16: Distribuzione degli errori per sistema CAD.

La distribuzione degli errori può anche essere filtrata per test case. La Figura 17 mostra la distribuzione degli errori per sistema CAD e tipo di annotazione per CTC 1. Non ci sono errori per i sistemi CAD 2015 perché il CTC è stato modellato solo nei sistemi CAD 2012. CAD B e C hanno un po' più di errori rispetto a CAD A e D.

La Figura 18 mostra la distribuzione degli errori per sistema CAD e tipo di annotazione per CTC 2. È ovvio che CAD C ha molti più errori rispetto agli altri sistemi CAD e che le destinazioni dei dati sono la probabile fonte di tali errori. CTC 2 ha target di Riferimento a otto punti e un target di Riferimento ad area circolare. Se CAD C ha problemi nella modellazione di un target di Riferimento a punto singolo, è probabile che gli stessi errori di annotazione vengano trovati con tutti i target di Riferimento di punto. Questo può spiegare il gran numero di errori con CTC 2 modellato in CAD C e spiegare perché ci sono più errori del previsto per CAD C (2012) nella Figura 16.

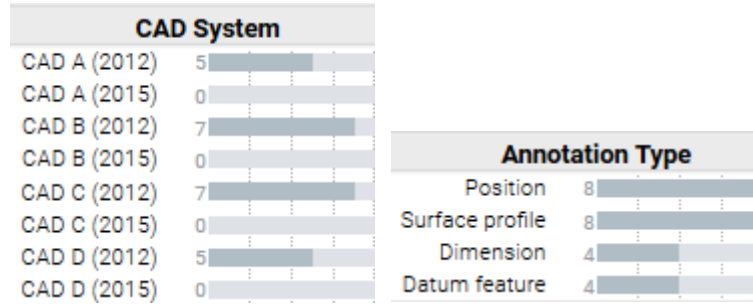


Figura 17: Distribuzione degli errori per CTC 1 per sistema CAD e tipo di annotazione.

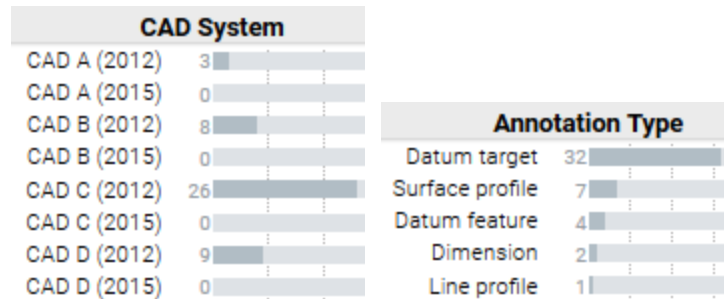


Figura 18: Distribuzione degli errori per CTC 2 per sistema CAD e tipo di annotazione.

La Figura 19 mostra la distribuzione degli errori per sistema CAD e tipo di annotazione per FTC 8. CAD A ha un solo errore per tutte le annotazioni.

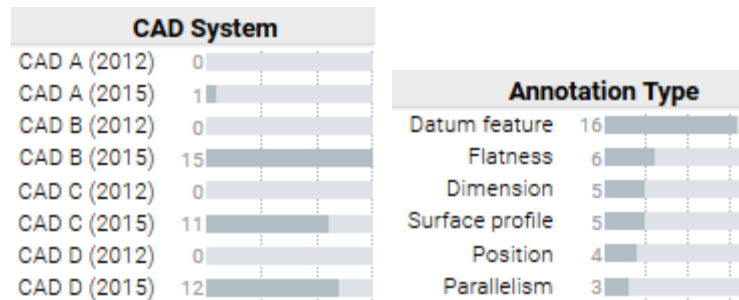


Figura 19: Distribuzione degli errori per FTC 8 per sistema CAD e tipo di annotazione.

La distribuzione degli errori può anche essere filtrata da un errore specifico. La Figura 20 mostra la distribuzione degli errori per uno specifico errore di testo della grafica di annotazione. È ovvio che entrambe le versioni di CAD B presentano problemi con questo tipo di errore.

2.7 Analisi esplorativa dei dati

Le cifre precedenti riportano i risultati del test come numeri assoluti di errori GD&T senza mostrare alcuna percentuale relativa. La Figura 21 è un grafico a blocchi medio che adotta un approccio statistico per analizzare i risultati del test. Un diagramma a blocchi è un tipo di analisi esplorativa dei dati che utilizza principalmente tecniche grafiche per ottenere informazioni sui risultati sperimentali [28]. L'asse verticale del grafico a blocchi è "Media

Probabilità di successo "dove la media è determinata dal numero di risposte" passate "all'osservazione di un FCF GD&T per un errore. L'asse orizzontale è i cinque casi di test CTC, etichettati 1-5. Ogni blocco contiene le lettere colorate AD che si riferiscono ai sistemi CAD. La posizione di ogni lettera è la media per quel sistema CAD e caso di test. La posizione delle lettere AD in un blocco è il valore medio del rendimento di un sistema CAD per un caso di test. Alcune lettere si sovrappongono l'una all'altra, il che significa che quei sistemi CAD hanno lo stesso valore medio. Un valore medio di 1 indica che il sistema CAD non aveva errori per i casi di test.

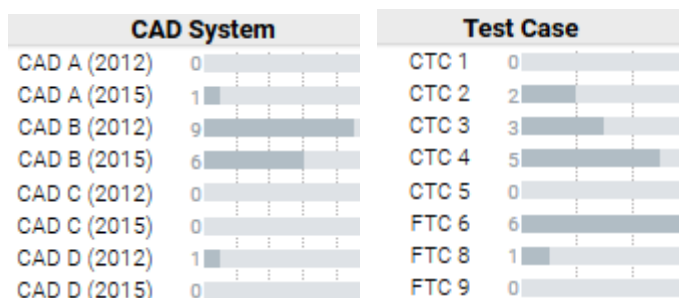


Figura 20: Distribuzione di un errore specifico per sistema CAD e test case.

La linea tratteggiata sull'intero grafico è la "grande media" per tutti i sistemi CAD e per i casi di test CTC. La linea continua in ogni blocco è la "media del blocco" per i quattro sistemi CAD per un caso di test. I sistemi CAD al di sotto della linea continua hanno ottenuto risultati peggiori rispetto alla media a blocchi. I valori medi del blocco vengono visualizzati anche appena sopra l'asse orizzontale. Il numero di annotazioni per caso di test viene visualizzato anche appena sopra l'asse orizzontale. L'altezza di un blocco è la variazione delle prestazioni dei sistemi CAD per un caso di test.

Diverse conclusioni possono essere tratte dal diagramma a blocchi. CAD A, all'inizio di ogni blocco, offre prestazioni migliori o quasi migliori per tutti e cinque i casi di test e le sue prestazioni non dipendono dal caso di test. Gli altri tre sistemi CAD hanno le prestazioni peggiori per almeno uno dei casi di test mostrati da B, C e D nella parte inferiore dei blocchi. CTC 1 ha prestazioni scadenti per tutti i sistemi CAD. Per CTC 2, CAD C si comporta molto peggio del blocco e delle medie grandi che corrispondono al gran numero di errori CAD C nella Figura 18. CTC 3 è il caso di test meno problematico con ogni sistema CAD che funziona al di sopra della media generale. CTC 4 si comporta male con la media dei blocchi più piccola e l'altezza più grande significa una grande variazione nel modo in cui i sistemi CAD si sono comportati. CTC 5 si comporta bene tranne che per CAD D.

La figura 22 è come la figura precedente tranne per il fatto che è per i tre FTC. CAD B ha ottenuto risultati peggiori rispetto alla media a blocchi per tutti i casi di test e peggiori per due dei casi di test. CAD A ha dato i risultati migliori per due dei tre casi di test, anche se scarsi per FTC 9. Solo CAD C ha dato risultati migliori della media generale per tutti i casi di test. Tutti i sistemi CAD hanno ottenuto risultati migliori rispetto alla media generale per FTC 8.

La Figura 23 e la Figura 24 sono diagrammi a blocchi per CTC e FTC, rispettivamente, che mostrano la probabilità media di successo per i sistemi CAD rispetto al tipo di annotazione.

La tabella 3 è una chiave per i diciassette tipi di annotazioni lungo l'asse orizzontale di ciascun grafico a blocchi. I numeri del tipo di annotazione mancante su ogni grafico indicano che nessuno dei CTC o FTC ha quel tipo di annotazione. Sopra i valori medi del blocco lungo l'asse orizzontale c'è il numero di annotazioni per il tipo di annotazione. Il CTC ha 15 tipi di annotazioni e l'FTC ha solo 10 tipi di annotazioni. Nove tipi di annotazione hanno tre o meno istanze di quel tipo di annotazione in tutto il CTC.

Per il CTC, CAD A offre le prestazioni migliori per tutti i 15 tipi di annotazione tranne le tolleranze di posizione (tipo di annotazione 6). CAD D offre le prestazioni peggiori per quattro tipi di annotazioni (2, 11, 13, 17) per i quali due dei tipi di annotazione (11, 13) gli altri sistemi CAD non avevano errori. Le dimensioni per i fori (2) si sono comportate male per tutti i sistemi CAD. Anche i target di riferimento (5) si sono comportati male per tutti i CAD.

sistemi tranne CAD A. Cinque dei tipi di annotazione (9, 10, 14-16) non hanno errori, con un valore medio di 1, e per due altri tipi di annotazione (11, 13) solo CAD D presentava errori.

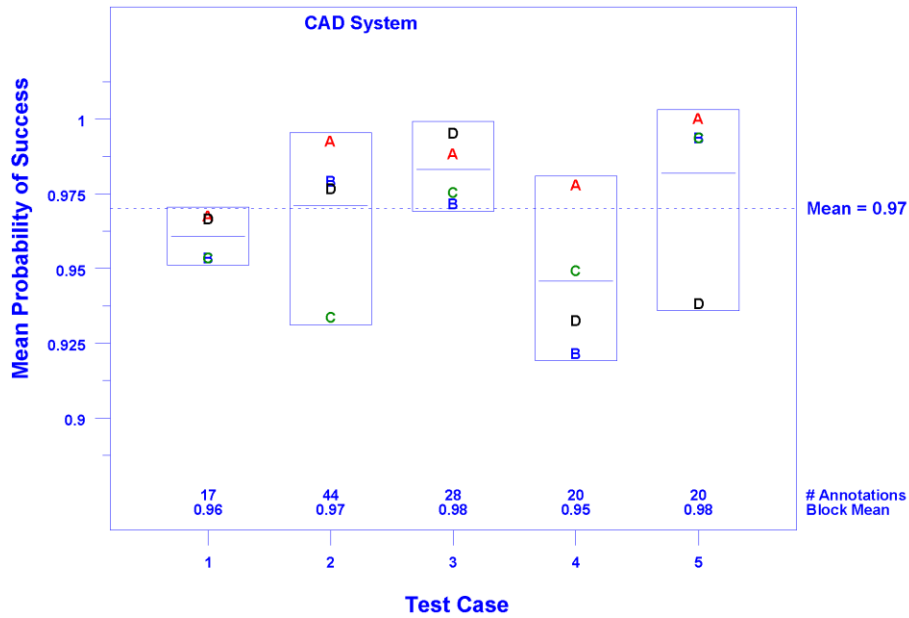


Figura 21: Grafico a blocchi medio CTC per sistema CAD e scenario di test.

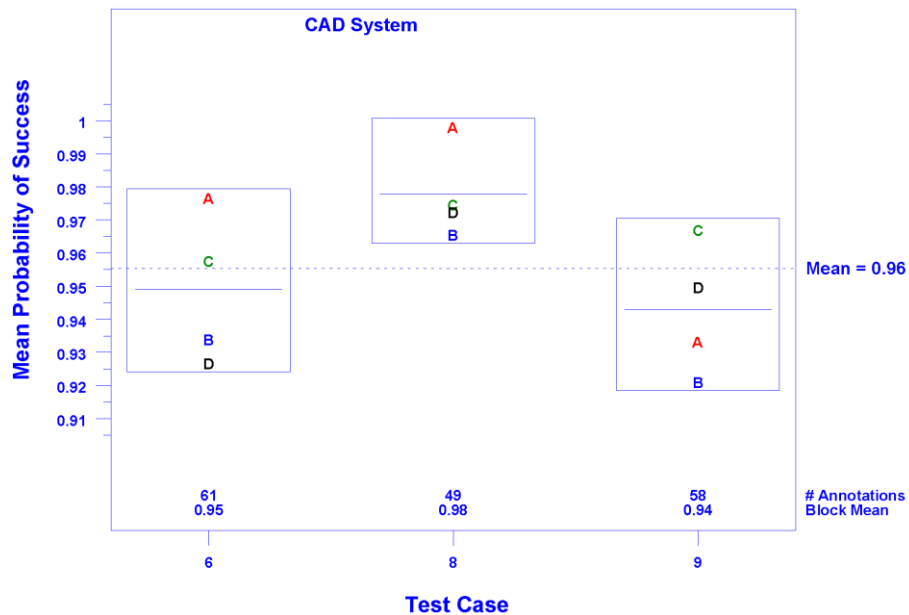


Figura 22: Grafico a blocchi medio FTC per sistema CAD e test case.

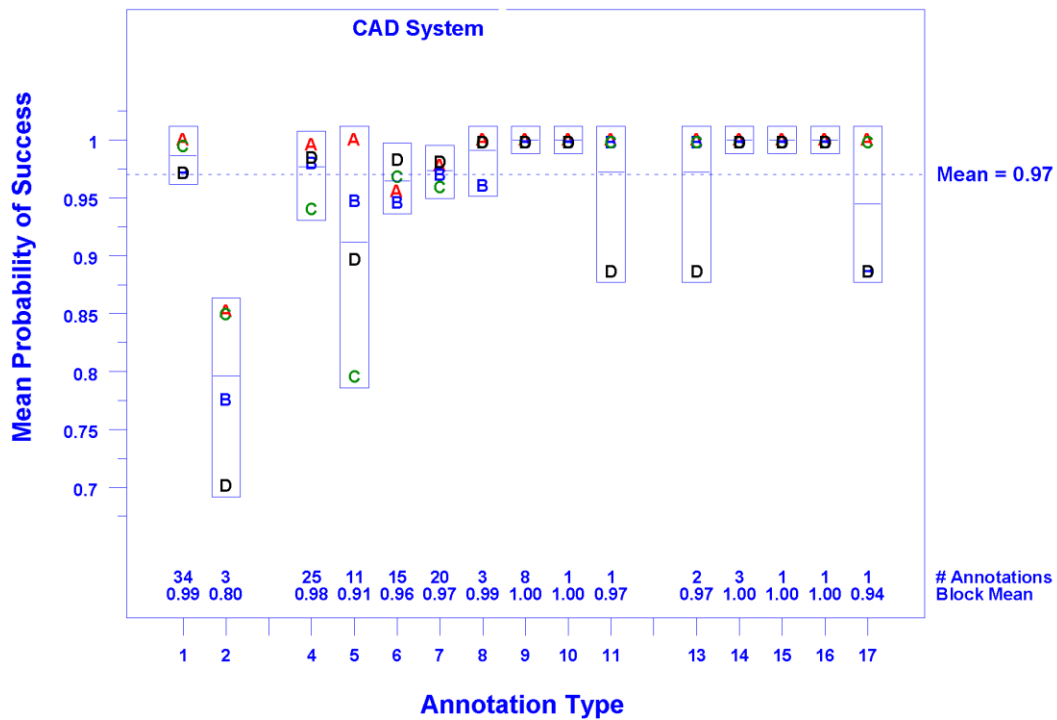


Figura 23: Grafico a blocchi medio CTC per sistema CAD e tipo di annotazione.

1	Dimensione	10	Angolarità
2	Dimensione - foro	11	Profilo di linea
3	Dimensione - altro	12	Parallelismo
4	Caratteristica Datum	13	Eccentricità totale
5	Target di riferimento	14	Eccentricità circolare
6	Posizione	15	Coassialità
7	Profilo di superficie	16	Rotondità
8	Planarità	17	Rettilinearità
9	Perpendicolarità		

Tabella 3: Tipi di annotazioni.

Per l'FTC nella Figura 24, CAD A e C hanno ottenuto risultati migliori della media a blocchi per sette tipi di annotazioni su dieci. Analogamente al CTC, anche le dimensioni dei fori sono un problema con tutti i sistemi CAD. CAD B ha ottenuto risultati peggiori rispetto alla media a blocchi per otto tipi di annotazioni su dieci. I target di riferimento (5) hanno la più ampia gamma di prestazioni (blocco più alto). CAD A ha funzionato perfettamente per i target di riferimento sia per FTC che per CTC. Le tolleranze di planarità, perpendicolarità e parallelismo (8, 9, 12) vengono tutte eseguite al di sopra della media generale per tutti i sistemi CAD.

La Figura 25 e la Figura 26 sono diagrammi a blocchi per CTC e FTC, rispettivamente, che mostrano la probabilità media di successo per i sistemi CAD rispetto al tipo di errore. La tabella 4 è una chiave per i nove tipi di errore lungo l'asse orizzontale per ogni grafico a blocchi. Sopra il blocco valori medi lungo l'orizzontale

asse sono il numero di errori per ogni tipo di errore. La linea tratteggiata verticale separa i tipi di errore semantico e grafico. Per il CTC, CAD A si comporta molto bene per otto dei nove tipi di errore tranne che per il tipo di errore 2 (parametri semantici) dove esegue il peggiore. CAD C ha prestazioni peggiori per cinque dei sei tipi di errore per i grafici di annotazione. Il tipo di errore 3 (geometria semantica) ha la più ampia gamma di prestazioni (blocco più alto) e la media di blocco più bassa. CAD D per quel tipo di errore esegue il peggiore di qualsiasi tipo di errore.

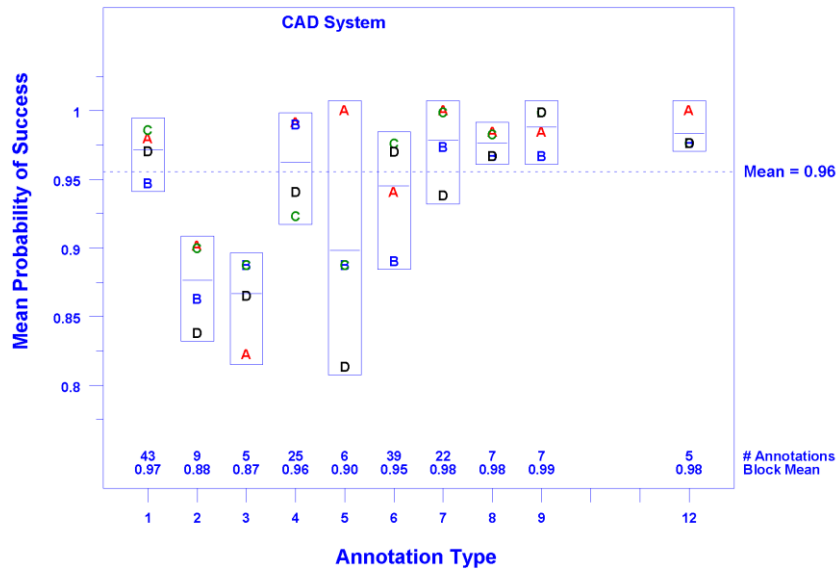


Figura 24: Grafico a blocchi medio FTC per sistema CAD e tipo di annotazione.

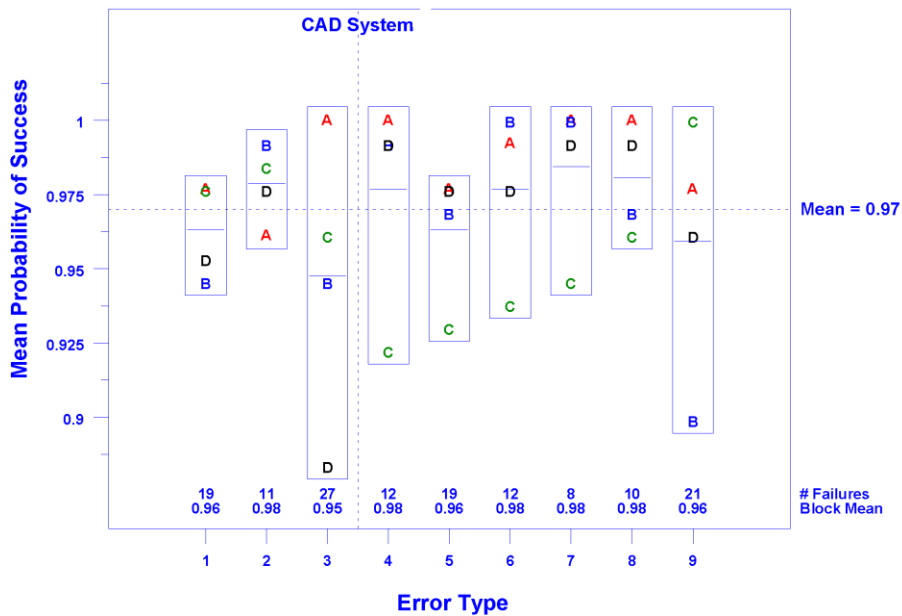


Figura 25: Grafico a blocchi medio CTC per sistema CAD e tipo di errore.

1	Struttura semantica
2	Parametri semantici
3	Geometria semantica
4	Visibilità grafica
5	Layout grafico
6	Posizione grafica
7	Orientamento grafico
8	Linee grafiche
9	Testo grafico

Tabella 4: Tipi di errore.

Per l'FTC nella Figura 26, CAD A si comporta molto bene per otto dei nove tipi di errore come fa anche per il CTC. CAD B è il peggiore per cinque tipi di errore, ma funziona bene per due tipi di errore (4, 6). CAD D esegue il peggiore per due dei tipi di errore semantico (2, 3) ma il migliore per il terzo tipo di errore (1). Tutti i sistemi CAD funzionano bene per tre dei tipi di errore grafico (4, 7, 8).

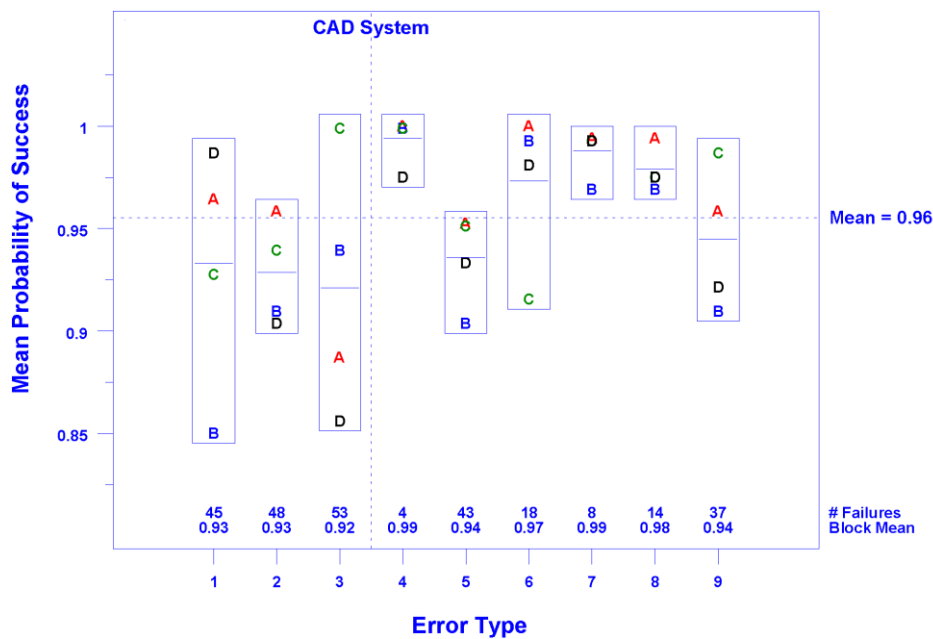


Figura 26: Grafico a blocchi medio FTC per sistema CAD e tipo di errore.

Per l'analisi esplorativa dei dati, è possibile generare altri grafici a blocchi medi che evidenziano caratteristiche simili dei risultati del test. Ad esempio, i valori per il sistema CAD e il test case nella Figura 21 possono essere invertiti in modo che il sistema CAD si trovi lungo l'asse orizzontale e ogni blocco conterrà i numeri per i cinque CTC. Questo pone l'accento su come ogni test case è stato eseguito per un dato sistema CAD. Altri grafici a blocchi medi possono utilizzare altre combinazioni di valori come il caso di test

e tipo di annotazione o tipo di errore. Altri esempi di grafici a blocchi si trovano nella guida ai risultati del test [12].

Una delle domande poste all'inizio di questo documento chiede se i risultati dei test mostrano che ci sia stato un miglioramento nella modellazione del PMI nei sistemi CAD tra le versioni 2012 e 2015. La Figura 27 è un grafico degli effetti principali che tenta di rispondere a questa domanda confrontando i risultati per il CTC (modellato nei sistemi CAD 2012) e FTC (modellato nei sistemi CAD 2015), per il sistema CAD e il tipo di errore. Lungo l'asse orizzontale ci sono i quattro sistemi CAD e nove tipi di errore dalla tabella

4. La posizione delle lettere "C" rossa e "F" blu per CTC e FTC, rispettivamente, corrisponde alla probabilità media di successo per il parametro lungo l'asse orizzontale. Il sistema CAD e il tipo di errore sono stati scelti perché sono gli unici parametri completamente comuni tra CTC e FTC. Il CTC e l'FTC condividono solo 8 dei 17 tipi di annotazioni tra di loro. Le linee tratteggiate corrispondono alle grandi medie per CTC e FTC.

La Figura 27 mostra che i sistemi CAD 2015 utilizzati per modellare l'FTC (rosso) in genere non hanno funzionato meglio dei sistemi CAD 2012 utilizzati per modellare il CTC (blu). Tuttavia, questo non è un confronto equo. Il CTC e l'FTC sono come mele e pomodori. L'FTC ha più caratteristiche GD&T rispetto al CTC, quindi maggiori possibilità di errore e molte delle annotazioni nell'FTC sono più complesse. Questo era l'intento della FTC: avere più annotazioni ed esercitare costrutti più interessanti dagli standard ASME Y14. Per renderlo un confronto tra mele e mele, il CTC potrebbe essere rimodellato nei sistemi CAD 2015 e ritestato. In questo caso, il grafico degli effetti principali potrebbe includere anche tipi di annotazione e mostrare una chiara evidenza se ci fosse un miglioramento nei sistemi CAD.

Il grafico a blocchi degli effetti principali mostra che per CAD C il CTC si è comportato peggio dell'FTC. Ciò potrebbe essere il risultato della difficoltà nella modellazione del target di riferimento in CAD C, come spiegato nella Figura 18 e nella Figura

21. Mostra inoltre che l'FTC ha funzionato in modo simile al CTC per tre tipi di errore e molto meglio per un tipo di errore.

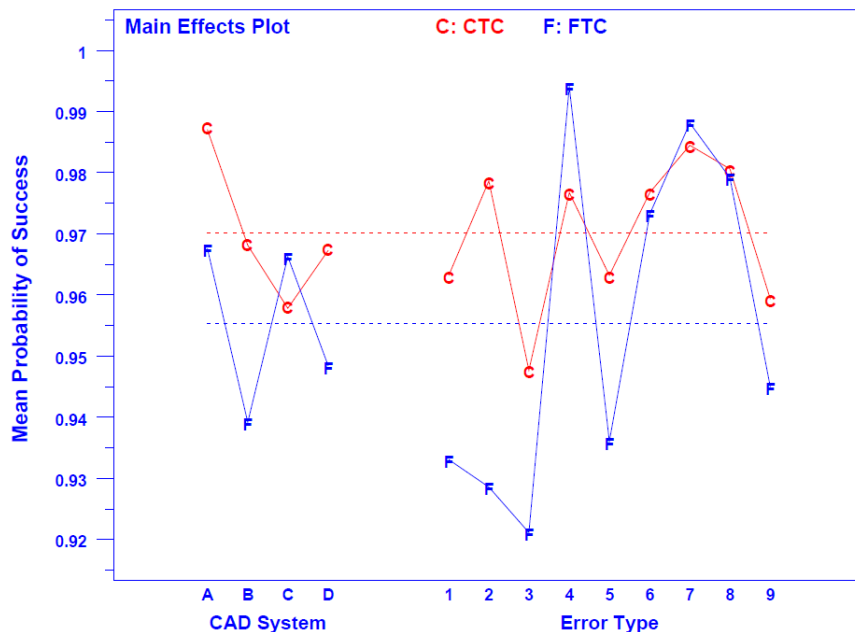


Figura 27: Grafico combinato degli effetti principali per il sistema CAD e il tipo di errore.

3 CONCLUSIONI

Il progetto di test NIST per misurare le capacità dei sistemi CAD di modellare le caratteristiche GD&T ha avuto successo. Molti diversi tipi di errori di annotazione semantica e grafica sono stati identificati e comunicati ai fornitori di software CAD partecipanti in modo che potessero migliorare le loro implementazioni per le caratteristiche GD&T. Ci sono anche molte lezioni apprese dal progetto di test NIST che possono essere utilizzate per migliorare i test futuri e l'utilizzo dei modelli CAD. I modelli CAD NIST sono disponibili online (<https://go.usa.gov/mGVm>) e sono stati scaricati da molti utenti finali come fonte di geometria della parte già pronta con caratteristiche di rappresentazione GD&T da testare nei flussi di lavoro basati su modelli.

La premessa del progetto era di testare le caratteristiche GD&T come definite dagli standard ASME Y14 [8, 9]. Alle parti con geometria rappresentativa è stata applicata un'ampia varietà di annotazioni per quote, tolleranze geometriche, feature di Riferimento, target di Riferimento e modificatori. Tutte le annotazioni fanno riferimento alle clausole applicabili negli standard ASME Y14 che ne controllano l'utilizzo. Tuttavia, le annotazioni non intendono rappresentare le migliori pratiche. Avrebbero potuto essere utilizzate strategie più semplici per applicare le strategie GD&T. Alcuni dei modelli CAD NIST potrebbero essere più complessi del necessario per un'azienda di produzione da utilizzare per testare il modo in cui le caratteristiche GD&T vengono utilizzate nei flussi di lavoro basati su modelli.

Esiste anche una distribuzione non uniforme delle tolleranze geometriche causata dai tipi di caratteristiche geometriche a cui possono essere applicate. Naturalmente, molte parti hanno tolleranze di posizione, profilo della superficie e planarità, tuttavia, delle definizioni dei casi di test che sono state modellate, solo CTC 5 ha tolleranze di rotondità, coassialità, eccentricità circolare e eccentricità totale tipiche della geometria cilindrica. Potrebbe essere necessario disporre di ulteriori caratteristiche geometriche cilindriche per testare ulteriormente l'uso di questi tipi di tolleranze.

La distribuzione delle tolleranze influisce anche sui risultati del test. CTC 2 ha sette target di riferimento del punto. I risultati dei test in Figura 18 e Figura 23 mostrano che CAD C presentava molti errori relativi ai target di riferimento. È ragionevole presumere che se si verifica un errore con una destinazione del dato, lo stesso errore apparirà in tutte le destinazioni del dato. Pertanto, i risultati del test sono distorti rispetto a CAD C per CTC 2. Se ci fosse un solo target di riferimento, i risultati per CAD C e CTC 2 potrebbero non essere così negativi. I futuri progetti di test dovrebbero considerare la distribuzione delle caratteristiche GD&T che vengono testate.

Prima di testare i sistemi CAD, non era nota la piena portata dei possibili errori semantici e grafici delle caratteristiche GD&T. Durante il processo di test le nove categorie di tipi di errore di annotazione semantica e grafica in

tavolo 2 sono stati perfezionati per accogliere i tipi di errori osservati. Tutti i tipi di errori sono stati trattati allo stesso modo indipendentemente dall'effetto su come un GD&T sarebbe stato utilizzato in un consumo a valle automatizzato o basato sull'uomo da altri processi di produzione. Un errore relativo alla grafica dell'annotazione, come spazi o caratteri estranei, che può essere facilmente tenuto in considerazione durante la lettura di un disegno 2D, ha lo stesso peso di un'annotazione con informazioni semantiche errate o mancanti su una tolleranza. Tuttavia, la mancanza di informazioni sulla tolleranza semantica può avere gravi conseguenze per l'uso automatizzato a valle di tali informazioni. Gli errori potrebbero essere ponderati in base alle conseguenze per il loro utilizzo in altri processi. L'Appendice C MIL-STD-31000A definisce gli "effetti delle condizioni sulla qualità dei dati CAD per la produzione" che potrebbero essere una base per gli errori di ponderazione.

Inoltre, non è stata presa in considerazione un'annotazione con più errori semantici o grafici. Ulteriori analisi con la visualizzazione dei dati Keshif degli errori del target di riferimento in CTC 2 mostrano che ci sono 19 errori per il target di riferimento a sette punti o più di due errori per target di riferimento. I risultati per alcuni sistemi CAD e casi di test sarebbero migliori se più errori per un'annotazione fossero contati come uno solo. Tuttavia, il conteggio di più errori in quanto si potrebbe oscurare l'entità dei problemi con una particolare annotazione.

I 98 tipi univoci di annotazioni, per i quali c'erano 411 istanze, sono classificati nei nove ampi tipi di errori semantici e grafici in

tavolo 2. Un'ulteriore analisi degli errori di annotazione e dei tipi di errore potrebbe portare a tipi di errore aggiornati che sono più adatti alla categorizzazione dei tipi di annotazione. Ad esempio, alcuni tipi di errori potrebbero essere specifici delle tolleranze geometriche mentre altri solo relativi alle quote. Un'ulteriore analisi con la visualizzazione dei dati Keshif mostra che per i 34 errori di annotazione univoci per le tolleranze di posizione e profilo di superficie, solo cinque tipi di errori sono in comune. Le categorie del tipo di errore potrebbero essere utilizzate anche per determinare un fattore di ponderazione correlato alla conseguenza dell'errore quando l'annotazione viene utilizzata nei processi a valle. Le categorie dei tipi di errore aggiornate potrebbero essere utilizzate come base per definire più "criteri di qualità dell'annotazione" in MIL-STD-31000A, Appendice C, Sezione C.7.9 o qualche altro standard che definisce come GD &

Se lo scopo del test è esclusivamente quello di testare le caratteristiche GD&T, è necessario considerare la complessità della geometria della parte. Si potrebbero sviluppare parti di prova più piccole che testino solo un insieme limitato di annotazioni. Ad esempio, un blocco con diversi tipi di fori, alcuni dei quali includerebbero caratteristiche come lamatura, svasatura e profondità, potrebbe essere tutto ciò che è necessario per testare tutte le caratteristiche di dimensione e tolleranza relative ai fori. Altre parti di prova potrebbero essere specifiche per superfici cilindriche o a forma libera.

Naturalmente, i risultati del progetto di test NIST sono un'istantanea nel tempo in cui sono stati testati i sistemi CAD del 2012 e 2015. Presumibilmente gli errori identificati dal progetto sono stati corretti nelle versioni più recenti dei sistemi CAD. Le caratteristiche GD&T nelle definizioni dei casi di test si basano su versioni precedenti degli standard ASME Y14. Le annotazioni potrebbero essere aggiornate per le versioni più recenti di tali standard. Le definizioni dello scenario di test potrebbero anche essere modificate per l'utilizzo di standard ISO per dimensioni e tolleranze. Le definizioni dei casi di test combinate (CTC) potrebbero anche essere aggiornate in modo che le parti siano completamente tollerate come l'FTC. Il progetto di test NIST è stato molto costoso e richiedeva tempo e le risorse non erano disponibili per aggiornare i modelli come suggerito sopra. Definizioni di casi di test sempre più semplici potrebbero rendere questo processo meno oneroso.

Come accennato in precedenza, i modelli CAD NIST e le definizioni dei casi di test sono disponibili gratuitamente per il download. Ciò ha portato all'utilizzo dei modelli CAD per scopi non considerati dal progetto di test. Sulla base di ciò, uno dei maggiori svantaggi dei modelli CAD sono le loro dimensioni. La dimensione più grande per la maggior parte del CTC è di circa un metro e gli FTC sono un po' più piccoli. Tuttavia, sono ancora troppo grandi per essere fabbricati rapidamente ea basso costo. Non è stata data alcuna considerazione per rendere le definizioni dei casi di test più piccole e facilmente fabbricabili e ispezionabili. I futuri progetti di test dovrebbero prendere in considerazione parti più piccole "tenute in mano" con caratteristiche che possono essere facilmente prodotte e ispezionate senza attrezzi o fissaggi speciali.

I modelli CAD NIST sono stati utilizzati anche da molte aziende manifatturiere per testare i flussi di lavoro ingegneristici basati su modelli. Altre società di software CAD li hanno utilizzati per testare quanto bene il loro software importa le caratteristiche GD&T. I forum internazionali di test per STEP [29], JT [30] e 3D PDF [25] hanno utilizzato i modelli CAD NIST per testare l'esportazione di quei formati di file derivati.

Il progetto di test NIST ha anche mostrato come applicare un certo rigore per lo sviluppo di metodologie di test software CAD e l'uso dell'analisi dei dati per immergersi profondamente nei risultati dei test.

4 DISCLAIMER

Qualsiasi menzione di prodotti commerciali nel documento è solo a scopo informativo; non implica una raccomandazione o approvazione da parte del NIST.

Robert R. Lipman, <https://orcid.org/0000-0002-5182-9412>

James J. Filliben, <https://orcid.org/0000-0002-2388-3198>

5 RIFERIMENTI

- [1] Hedberg, J. ; Lubell, J. ; Fischer, L. ; Maggiano, L. ; Barnard Feeney, A. : Testing the Digital Thread a Support of Model-Based Manufacturing and Inspection, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 16 (2), 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032697>
- [2] Hartman, N. ; Zahner, J. ; Hedberg, T. ; Barnard Feeney, A. : Extending and Evaluating the Model-based Product Definition, National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR 18-015, 2017. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.18-015>
- [3] MIL-STD-31000A, DoD Standard Practice: Technical Data Packages, Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, 2013.
- [4] Wong, K. : The CAD Interoperability Monster Still Lurks, Digital Engineering, 2014, <https://www.digitalengineering247.com/article/cad-interoperability-monster-still-lurks/> . Modellatore 3D ACIS, <https://www.spatial.com/products/3d>
- [5] , Dassault Systemes Spatial.
- [6] Parasolid, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/plmcomponents/parasolid.html> , Siemens.
- [7] Lipman, R. ; Lubell, J. : Controllo della conformità della rappresentazione delle PMI nello scambio di dati STEP del modello CAD
File, Assistito dal computer Design, 66 (2015), 2015, 14-23.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.002>
- [8] ASME Y14.5-1994, Dimensioning and Tolerancing - Engineering Drawing and Related Documentation Practices, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1994. ASME Y14.41-2003, Digital Product Definition Data Practices - Engineering Drawing and Related Documentation Practices, American Society of Mechanical Engineers, New York,
- [9] 2003.
- [10] ISO 1101: 2012, Specifiche del prodotto geometrico (GPS) - Tolleranza geometrica - Tolleranze di forma, orientamento, posizione e run-out, Organizzazione internazionale per la standardizzazione, Ginevra, Svizzera, 2012.
- [11] ISO 16792: 2006, Documentazione tecnica di prodotto - Pratiche dei dati di definizione dei prodotti digitali, Organizzazione internazionale per la standardizzazione, Ginevra, Svizzera, 2006.
- [12] Lipman, R. ; Filliben, J. : Guida ai modelli CAD PMI del NIST e risultati dei test di verifica della capacità di modellazione PMI del sistema CAD, NIST Advanced Manufacturing Series 100-10, 2017.
<https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-10>
- [13] ISO 10303-1: 1994, Sistemi di automazione industriale e integrazione - Rappresentazione e scambio di dati di prodotto - Parte 1: Panoramica e principi fondamentali, Organizzazione internazionale per la standardizzazione, Ginevra, Svizzera, 1994.
- [14] Pratt, M. : Introduzione alla ISO 10303 - lo standard STEP per lo scambio di dati di prodotto, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 1 (1), 2001, 102-103.
- [15] Frechette, S. ; Jones, A. ; Fischer, B. : Strategy for Testing Conformance to Geometric Dimensioning & Tolerancing Standards, Procedia CIRP, 10 (2013), 2013, 211-215.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.08.033>
- [16] Kindrick, J. ; Sauter, J. ; Matthews, R. : Miglioramento dei test di conformità e interoperabilità, StandardView, 4 (1), 1996, 61-68.
- [17] Cheney, D. ; Fischer, B. : Misurazione della capacità di modellazione PMI nei sistemi CAD: verifica del caso di test combinato Report 1, National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR 15-997, 2015. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.15-997>
- [18] Cheney, D. ; Fischer, B. : Misurazione della capacità di modellazione PMI nei sistemi CAD: Report 3 Fully-Toleranced Test Case Verification, National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR 15-999, 2015. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.15-999>
- [19] CATIA, <https://www.3ds.com/products-services/catia/> , Dassault Systemes. LAVORI SOLIDI, <https://www.solidworks.com/>
- [20] , Dassault Systemes. Creo, <https://www.ptc.com/en/products/cad/creo> , PTC.
- [21]
- [22] NX, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/> , Siemens. CADIQ, <http://www.iti-global.com/cadiq>
- [23] , ITI International TechneGroup.

- [24] ISO 14306: 2012, Sistemi di automazione industriale e integrazione - Specifica del formato di file JT per la visualizzazione 3D, Organizzazione internazionale per la standardizzazione, Ginevra, Svizzera, 2012.
- [25] Consorzio PDF 3D, <http://www.3dpdfconsortium.org/> .
- [26] Yalcin, MA; Elmqvist, N .; Bederson, B .: Keshif: esplorazione rapida ed espressiva di dati tabulari per principianti, transazioni IEEE su visualizzazione e computer grafica, 24 (8), 2018, 2339-2352. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2723393>
- [27] Yalcin, MA: Keshif: Data Made Explorable, <https://keshif.me/> .
- [28] Croarkin, C .; Tobias, P .: NIST / SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods / Block Plots, NIST

Statistico
Ingegneria
Divisione / SEMATECH,

2012,
<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/blockplo.htm> . Forum degli implementatori
- [29] CAx, <https://www.cax-if.org> . JT
- [30] Implementor Forum, <https://www.prostep.org/en/projects/jt-implementor-forum/> ,
prostep ivip.