



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

---

# Impieghi dello scanner ottico 3D per prove su componenti automobilistici e in ambito di urto pedone

---

*Laureanda:*  
Elena Lomurno

*Relatori:*  
Prof.ssa Cristina Bignardi  
Prof. Alberto Audenino  
*Tutor aziendale:*  
Ing. Andrea Severini



Anno Accademico 2017-2018



*Ai miei genitori,  
a Marianna,  
ai miei nonni (vicini e lontani)  
e agli amici più cari.*



# Sommario

Nella presente tesi è stato studiato l'impiego di uno scanner ottico 3D, *ATOS Core 500* prodotto da GOM, in alcuni test sperimentali eseguiti nel laboratorio "Components & Pedestrian" del Centro Sicurezza FCA di Orbassano (TO).

L'obiettivo è stato quello di verificare l'utilità e l'applicabilità di tale sistema di misura nelle procedure di valutazione della sicurezza in campo automobilistico studiando il funzionamento dello strumento e del relativo software associato. Dopo aver richiamato le normative di riferimento sono state descritte le prove eseguite e i corrispondenti risultati. In particolare è stata analizzata la deformazione del puntone della prima linea di carico e della dorsale di vetture a seguito di un urto assicuratori a bassa velocità (protocollo RCAR di crash test a bassa velocità). L'analisi ottenuta con il software è risultata coerente con la deformazione fisica dei componenti. In seguito lo scanner è stato utilizzato nell'ambito di prove d'urto pedone, in particolare nell'operazione di tracciatura (prevista dalle direttive Euro NCAP) delle aree di impatto gamba-bacino di una vettura, e per la proiezione in *real time* della griglia di tracciatura dell'area di impatto testa sul cofano. Nel primo caso lo scanner ha prodotto risultati più precisi, in modo rapido e ripetibile, rispetto al metodo tradizionale. Durante la proiezione sul cofano, invece, ha generato distorsione delle sezioni di tracciatura in corrispondenza dell'avvallamento tra cofano e parabrezza. Una volta ripristinata la continuità tra le superfici, mediante una fascia in cartone, la proiezione è apparsa accurata ed efficace. Il software in dotazione è stato utilizzato per il calcolo della distribuzione delle aree di impatto testa su cofano previsto dalla norma UNECE R. 127. È stata misurata l'estensione delle porzioni di area di cofano interferenti con il vano motore sottostante ed è stato verificato il rispetto della condizione imposta dalla normativa. Lo strumento ha prodotto risultati soddisfacenti e accurati in breve tempo.

Il dispositivo è stato utile anche per l'analisi delle deformazioni su cofano a seguito di urti testa. Le deformazioni rilevate con il software sono risultate coerenti con le corrispondenti fisiche.

Infine lo scanner è stato utilizzato per puro *reverse engineering* di componenti producendo modelli digitali con elevata risoluzione.

Lo scanner *ATOS Core 500* di GOM non acquisisce oggetti che non risultano otticamente accessibili perciò occorre accertarsi che il componente di interesse non sia occluso e

ciò è limitante nel caso in cui gli spazi a disposizione siano ridotti. Inoltre non può effettuare delle analisi *real time* della deformazione dei componenti, né memorizzarne gli spostamenti.

# Abstract

In this thesis was studied a 3D optical scanner use, the *ATOS Core 500* made by GOM, in some experimental tests performed in the "Components & Pedestrian" laboratory at FCA Safety Center (Orbassano, Italy).

The purpose was to verify the measuring device applicability and usefulness in automotive safety evaluation procedures.

Firstly, it was studied how the instrument and its software work. After a brief description of the used laws and protocols, the record of performed experimental tests and results is presented. Specifically, the front and rear deformation of autos after a low-speed crash (*RCAR low-speed structural crash test protocol*) was analyzed. The software results are in line with the physical deformation. Subsequently, the scanner was employed in pedestrian tests, in particular to mark vehicles impact areas for leg and upper leg, in order to comply with Euro NCAP protocols. To mark head impact area on bonnet, the live projection was used. In the first case the device produced rapidly more accurate and repeatable results than traditional methods. Concerning projection, the scanner generated distortion of marking sections in the hollow between bonnet and windscreen. If the continuity between these two surfaces is restored, for example with a cardboard stripe, the projection appears to be accurate and efficient. The given software was used to calculate the head impact areas distribution on the bonnet according to the agreement UNECE R. 127. Thanks to the software it was possible to measure the extension of interfering areas on the bonnet with the underlying engine compartment. This calculation verifies the condition imposed by the procedure producing rapidly satisfying and accurate results.

The device was also useful to analyze bonnet deformation after head crashes. The software generated outputs in line with physical deformation.

Lastly, the scanner was used for pure reverse engineering applications obtaining high resolution digital models.

Since *ATOS Core 500*, made by GOM, does not capture objects not optically accessible, it is important to check if the component is visible to the scanner cameras. This could be a limit when the component is in a narrow space. Furthermore the studied device cannot analyze in real time the components deformation or memorize its displacement.



# Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduzione</b>  | <b>13</b> |
| <b>1 Scanner 3D e loro impiego</b>   | <b>17</b> |
| 1.1 Impieghi dei sistemi di misura ottici tridimensionali e dei software associati della GOM . . . . . | 18        |
| 1.1.1 Volkswagen: test su componente e analisi della deformazione . .                                  | 18        |
| 1.1.2 BMW: GOM Inspect come software standard in azienda . . . . .                                     | 19        |
| 1.1.3 Bosch: GOM Inspect come software per report dettagliati . . . . .                                | 19        |
| 1.1.4 Orthopädietechnik Winkler: calcolo del ciclo di vita di una protesi da corsa . . . . .           | 20        |
| <b>2 Strumentazione e software utilizzati</b>  | <b>23</b> |
| 2.1 Scanner <i>ATOS Core 500</i> . . . . .   | 23        |
| 2.1.1 Componenti hardware in dotazione . . . . .   | 26        |
| 2.1.2 Calibrazione del sensore . . . . .   | 26        |
| 2.1.3 Processo di misura . . . . .   | 27        |
| 2.2 Software <i>ATOS Professional 2016</i> . . . . .   | 28        |
| 2.2.1 Ambiente di lavoro DIGITALIZZA . . . . .   | 28        |
| 2.2.2 Ambiente di lavoro ANALISI . . . . .   | 33        |
| 2.2.3 Ambiente di lavoro LIVE . . . . .  | 37        |
| 2.2.4 Report e risultati . . . . .   | 42        |
| <b>3 Procedure operative per l'urto assicuratori</b>   | <b>43</b> |
| 3.1 Protocollo RCAR di crash test a bassa velocità . . . . .   | 43        |
| 3.1.1 Impatto frontale: preparazione del veicolo e area di test . . . . .                              | 45        |
| 3.1.2 Impatto posteriore: preparazione del veicolo e area di test . . . . .                            | 46        |
| 3.2 Sistema tedesco di rating assicurativo del veicolo . . . . .                                       | 47        |
| 3.2.1 Procedura di classificazione . . . . .   | 47        |
| 3.2.2 Procedura di riclassificazione . . . . .   | 48        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>4</b> | <b>Urto assicuratori: prove sperimentali eseguite</b>                                  | <b>51</b>  |
| 4.1      | Modello 1 . . . . .  | 52         |
| 4.1.1    | Prima prova . . . . .  | 52         |
| 4.1.2    | Seconda prova . . . . .  | 56         |
| 4.2      | Modello 2 . . . . .  | 60         |
| <b>5</b> | <b>Procedure operative per l'urto pedone</b>   | <b>67</b>  |
| 5.1      | Modelli di segmenti corporei impattanti . . . . .                                      | 67         |
| 5.1.1    | Impattore testa . . . . .  | 68         |
| 5.1.2    | Impattore bacino . . . . .   | 68         |
| 5.1.3    | Impattore gamba di tipo TRL . . . . .  | 69         |
| 5.1.4    | Impattore gamba di tipo FlexPLI . . . . .  | 71         |
| 5.1.5    | Confronto tra impattore di tipo TRL e di tipo FlexPLI . . . . .                        | 72         |
| 5.2      | Tracciatura del veicolo . . . . .  | 74         |
| 5.3      | Valutazione dei punti di impatto . . . . .   | 76         |
| 5.3.1    | Area di impatto testa . . . . .  | 76         |
| 5.3.2    | Area di impatto bacino . . . . .   | 77         |
| 5.3.3    | Area di impatto gamba . . . . .  | 77         |
| <b>6</b> | <b>Urto pedone: prove sperimentali eseguite</b>  | <b>79</b>  |
| 6.1      | Tracciatura Euro NCAP con lo scanner <i>ATOS Core 500</i> . . . . .                    | 79         |
| 6.1.1    | Tracciatura dell'area di impatto bacino e gamba . . . . .                              | 79         |
| 6.1.2    | Proiezione della griglia per la tracciatura dell'area di impatto testa . . . . .       | 82         |
| 6.2      | Calcolo della distribuzione delle aree di impatto testa (ECE R. 127) . . . . .         | 85         |
| 6.2.1    | Distribuzione delle aree sul Modello 4 . . . . .                                       | 87         |
| 6.2.2    | Distribuzione delle aree sul Modello 5 . . . . .                                       | 92         |
| 6.3      | Analisi degli affondamenti sul cofano . . . . .  | 94         |
| 6.3.1    | Cofano 1 . . . . .   | 96         |
| 6.3.2    | Cofano 2 . . . . .   | 98         |
| 6.3.3    | Correlazione tra gli affondamenti reali e il risultato FEM . . . . .                   | 100        |
| <b>7</b> | <b><i>ATOS Core 500 per reverse engineering su componenti</i></b>                      | <b>107</b> |
| 7.1      | Bombole di GPL per autoveicolo . . . . .   | 107        |
| 7.2      | Modello di impattore di bacino . . . . .   | 108        |
| <b>8</b> | <b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>   | <b>111</b> |
| <b>A</b> | <b>Tutorial per l'utilizzo di <i>ATOS Core 500</i> e <i>ATOS Professional 2016</i></b> | <b>115</b> |
|          | <b>Bibliografia e sitografia</b>   | <b>143</b> |

# Lista dei simboli

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>RCAR</b>       | Research Council for Automobiles Repairs            |
| <b>GOM</b>        | Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH           |
| <b>ATOS</b>       | Advanced Topometric Sensor                          |
| <b>CAD</b>        | Computer-Aided Design                               |
| <b>GDV</b>        | Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft |
| <b>Euro NCAP</b>  | European New Car Assessment Program                 |
| <b>MCL</b>        | Medial Collateral Ligament                          |
| <b>PCL</b>        | Posterior Cruciate Ligament                         |
| <b>ACL</b>        | Anterior Cruciate Ligament                          |
| <b>UNECE</b>      | United Nations Economic Commission for Europe       |
| <b>TRL</b>        | Transportation Research Lab                         |
| <b>FlexPLI</b>    | Flexible Pedestrian Legform Impactor                |
| <b>CONTRAN</b>    | Conselho Nacional de Trânsito                       |
| <b>SASO</b>       | Saudi Standards, Metrology and Quality Org.         |
| <b>FMVSS</b>      | Federal Motor Vehicle Safety Standards              |
| <b>C-NCAP</b>     | China New Car Assessment Program                    |
| <b>US-NCAP</b>    | The United States New Car Assessment Program        |
| <b>IIHS</b>       | The Insurance Institute for Highway Safety          |
| <b>LATIN-NCAP</b> | The Latin New Car Assessment Program                |
| <b>J-NCAP</b>     | Japan New Car Assessment Program                    |



# Introduzione

I sistemi di misura ottica delle coordinate 3D stanno gradualmente sostituendo quelli a contatto e i calibri tradizionali in molti settori industriali. Sono infatti in grado di rilevare informazioni relative a un oggetto, più accurate, dettagliate e facilmente interpretabili, con tempi di misura inferiori [1].

L'obiettivo di questa tesi è verificare l'utilità e l'applicabilità di un sistema di misura ottico nelle procedure di valutazione della sicurezza in campo automobilistico. Saranno esaminate le applicazioni dello scanner 3D *ATOS Core 500*, prodotto dalla Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH (GOM), ed utilizzato in alcune prove eseguite presso il Centro Sicurezza FCA di Orbassano (TO). Inoltre lo stesso centro ha richiesto la realizzazione di un tutorial illustrativo in formato *Power Point* delle funzioni dello strumento per definire un protocollo interno di utilizzo nell'ambito delle prove di crash (Allegato A).

La sicurezza a bordo delle automobili è un tema di notevole importanza per le case costruttrici allo scopo di garantire minori danni in caso di incidente.

Il Centro Sicurezza FCA di Orbassano ospita una pista interna e una esterna per l'esecuzione di crash test in full scale, un laboratorio di "Components & Pedestrian", una slitta per la simulazione di urti full scale in laboratorio, un laboratorio dedicato alla calibrazione dei manichini e due camere di misura statica dei veicoli [2]. Nella struttura si eseguono ogni anno circa 500 crash test in full scale, 300 prove in slitta, 1700 prove su sottosistemi e 1000 calibrazioni di trasduttori elettronici (potenziometri, accelerometri e celle di carico). Si effettuano, inoltre, prove ad alta velocità (HS), prove assicuratori GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft) e prove "Tatcham" per il Regno Unito. Nel Centro si studiano le performance di sicurezza riguardanti i veicoli del gruppo FCA per l'integrazione dei sistemi di protezione attivi e passivi quali airbag, cinture di sicurezza, seggiolini e altri dispositivi. Le prove vengono effettuate secondo le normative più diffuse (ECE, FMVSS, CONTRAN, SASO ecc.) e con validazione dei risultati da parte di organismi terzi (E-NCAP, C-NCAP, USA-NCAP, IIHS, LATIN-NCAP, J-NCAP, ecc.). Il centro di Orbassano collabora con numerose istituzioni internazionali per lo sviluppo di nuovi standard di sicurezza.

Il presente studio riguarda l'impiego dello scanner *ATOS Core 500* in alcune prove eseguite nel laboratorio "Components & pedestrian" del Centro Sicurezza FCA in cui si effettuano diversi tipi di test: sul singolo componente, di urto pedone, di urti a bassa velocità, strutturali, statici, dinamici, geometrici su componente, di caratterizzazione, di sistema o su veicolo completo. L'esigenza di adottare tale dispositivo per la misura degli effetti delle prove nasce dalla possibilità offerta dal sistema di poter osservare piccole deformazioni di un componente in modo continuo e non solo per punti discreti.

Nel Capitolo 1 saranno inizialmente esaminati i contesti in cui i prodotti della GOM sono attualmente utilizzati sia da parte di altre case automobilistiche diverse da FCA, sia da parte di aziende produttrici di componentistica e sia da soggetti operanti nel campo della ricerca in materia di protesi da corsa.

Nel Capitolo 2 sono descritte le caratteristiche hardware e software del dispositivo utilizzato nel presente studio. Tale capitolo ha costituito la base per la realizzazione del tutorial menzionato precedentemente.

Nel Capitolo 3 è riportato il quadro normativo di riferimento per il protocollo RCAR e il sistema tedesco di rating assicurativo.

Nel Capitolo 4 sono descritte le applicazioni dello scanner in ambito di urto assicuratori RCAR a bassa velocità eseguite presso il Centro Sicurezza FCA, riportando le modalità di esecuzione delle prove e i relativi risultati.

Nel Capitolo 5 è riportato il quadro normativo di riferimento per le prove di urto pedone, in particolare le norme ECE R. 127 [3] e "Pedestrian testing protocol" [4] di European New Car Assessment Program (Euro NCAP).

Nel Capitolo 6 sono descritte le applicazioni dello scanner in ambito di urto pedone eseguite presso il Centro Sicurezza FCA, riportando le modalità di esecuzione delle prove e i relativi risultati.

Nel Capitolo 7 è descritto l'uso dello scanner in applicazioni di *reverse engineering* su componenti.

Nel Capitolo 8 sono riepilogati i risultati della sperimentazione condotta evidenziando i punti di forza e i limiti dello strumento utilizzato nel presente studio e sono descritti gli aspetti da migliorare per ampliarne l'uso in eventuali applicazioni future.

Per motivi di riservatezza nella rappresentazione dei risultati sperimentali sono stati omessi i valori numerici e le relative unità di misura mediante adimensionalizzazione e normalizzazione in un range compreso tra -1 e 1.



# Capitolo 1

## Scanner 3D e loro impiego

Gli scanner ottici 3D sono utilizzati per operazioni di *reverse engineering* nell'ambito di procedure di *rapid prototyping*. Come descritto in [5], il *rapid prototyping* (prototipazione rapida) comprende un insieme di tecniche industriali per realizzare fisicamente un prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire dalla sua definizione matematica tridimensionale ottenuta o direttamente in ambiente CAD o tramite uno scanner 3D (*reverse engineering*). In questo caso il processo inizia con la creazione manuale del modello utilizzando materiali idonei (legno, metallo, resina, ecc.). Partendo dall'oggetto reale così costruito, è possibile, mediante l'impiego di scanner 3D, ricavarne la geometria ed il relativo modello CAD [6]. La fase preliminare alla prototipazione vera e propria consiste nella generazione del file STL (*Standard Triangulation Language To Layer*), uno standard grafico che descrive l'oggetto tramite una suddivisione in triangoli delle superfici che lo compongono, a partire dal modello matematico ottenuto con le modalità descritte precedentemente. Le superfici del pezzo vengono *meshate* con elementi di tipo triangolare [5]. Ciò rende possibile ed agevole qualsiasi successiva modifica direttamente sul modello virtuale.

Gli scanner 3D disponibili sul mercato sono destinati a diversi utilizzi: industriale, professionale o personale. A seconda del produttore, si differenziano per l'ampiezza del volume di misura, la portabilità e i campi di applicazione. Sul web si ritrovano diversi esempi di tali strumenti impiegati nei settori più disparati: industriale e automobilistico, biomedicale, architettonico e artistico. Per il presente lavoro è stato utilizzato lo scanner 3D *ATOS Core 500*, di Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH (GOM). Questo dispositivo permette la digitalizzazione 3D rapida dei componenti da impiegare per stampe 3D in-house. Senza bisogno di ulteriori elaborazioni, il file di dati generato (STL) può essere inviato direttamente alla stampante 3D per la riproduzione. Questa tecnica consente di realizzare oggetti personalizzati con caratteristiche proprie della produzione di massa, ad esempio per il settore odontoiatrico e degli apparecchi acustici. Poiché le geometrie di tali oggetti sono costituite da superfici libere complesse, l'accuratezza

della loro forma e la loro dimensione possono essere verificate con sistemi di misura ottica come ATOS Core [7].

Di seguito si riportano esempi di utilizzo di prodotti della GOM, oltre l'*ATOS Core 500*, in ambito automobilistico, industriale e biomedicale.

## 1.1 Impieghi dei sistemi di misura ottici tridimensionali e dei software associati della GOM

I sistemi di scansione ottica 3D ATOS, grazie ai sensori di cui sono dotati, permettono di eseguire rilievi accurati e rapidi con un'elevata risoluzione. Sul sito web di GOM [8] è possibile consultare numerosi dossier in cui sono documentate alcune applicazioni, da parte di aziende operanti per lo più nel settore automobilistico e industriale, degli scanner GOM e dei relativi software associati che qui si richiamano sinteticamente.

### 1.1.1 Volkswagen: test su componente e analisi della deformazione

Nel settore automobilistico gli scanner GOM sono utilizzati per analizzare l'andamento delle deformazioni a seguito delle prove eseguite sui componenti della vettura. I prototipi sono sottoposti a differenti condizioni di carico in modo da determinare le interazioni tra il corpo principale dell'autoveicolo, le parti ad esso collegate e il suo interno. Si effettuano esperimenti standard sottoponendo l'oggetto di interesse a cambi di temperatura o a sovraccarichi e osservandone le eventuali deformazioni complessivamente considerate. I dispositivi GOM che utilizzano il sistema fotogrammetrico TRITOP, consentono di rilevare graficamente le deformazioni mediante l'uso di una particolare fotocamera. Tale tecnica si adatta anche a condizioni ambientali estreme. Per prima cosa l'utente applica un numero arbitrario di marker sulla superficie da misurare. Grazie alla telecamera digitale ad alta risoluzione e al software vengono misurate le coordinate spaziali dei marker e i vettori 3D degli spostamenti che, a loro volta, vengono proiettati in piano e visualizzati simbolicamente con delle frecce come si vede in figura 1.1 [9].

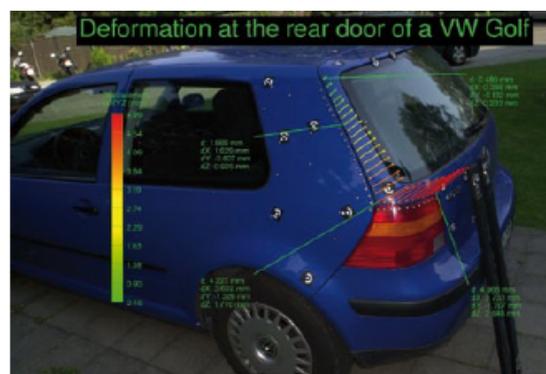


Figura 1.1: Deformazione del portellone posteriore [9].

### 1.1.2 BMW: GOM Inspect come software standard in azienda

BMW ha installato GOM Inspect come software standard per la visualizzazione 3D su centinaia di computer appartenenti al gruppo. Sistemi di misura automatici consentono una maggiore ripetibilità nei processi di produzione industriale. Le misure possono essere analizzate e confrontate direttamente con i dati CAD di progetto. Le deviazioni dal modello CAD originario sono evidenziate in scala cromatica e quindi risultano facilmente riconoscibili le zone critiche da migliorare nei processi di fabbricazione. In figura 1.2 si riporta un esempio di misura e analisi dei dati rispetto al CAD effettuato con i prodotti ATOS [10].

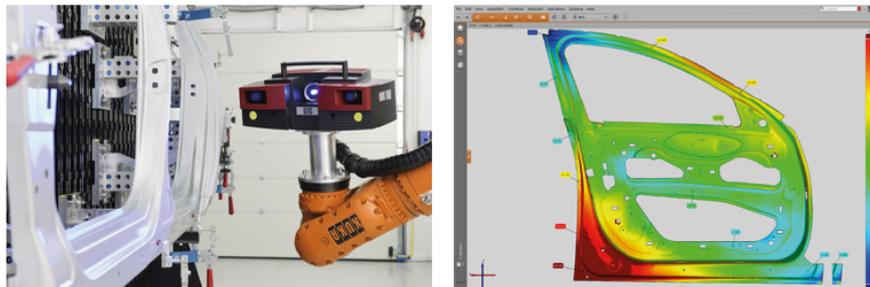


Figura 1.2: Esempio di misura e di analisi delle deviazioni rispetto al modello CAD di progetto [10].

### 1.1.3 Bosch: GOM Inspect come software per report dettagliati

Gli scanner ottici 3D *ATOS Triple Scan* sono impiegati per misurare vari prodotti plastici o ottenuti per fusione. Tale tecnologia consente di ottenere rapidamente le informazioni e i dettagli del pezzo finito, ottenuto per fusione, utili per rilevare le deviazioni rispetto al modello CAD di progetto e per regolarne i parametri di produzione. Con questo approccio è possibile anche per verificare la funzionalità delle parti realizzate. Oltre alla misura vera e propria vengono ottenuti altri dati importanti riguardo ai possibili difetti superficiali o interni del componente. L'uso dei software associati allo scanner facilita la correzione di eventuali difetti mediante *reverse engineering*. In figura 1.3 si riporta un esempio di applicazione del software GOM Inspect che consente l'analisi della geometria dei componenti e la determinazione della posizione dei fori. Confrontando la scansione del pezzo con i dati progettuali CAD, il produttore utilizza il software per rappresentare le deviazioni di tolleranza con una mappa in falso colore [11].

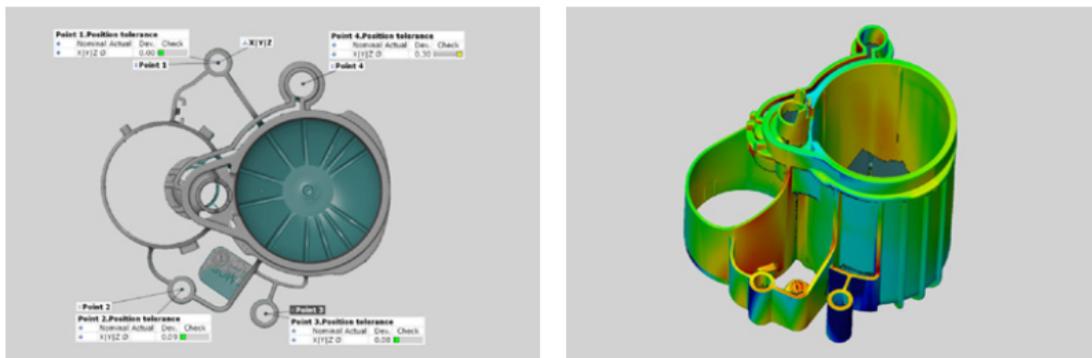


Figura 1.3: Esempio di deviazione delle tolleranze con mappa di falso colore di un supporto per una pompa [11].

### 1.1.4 Orthopädietechnik Winkler: calcolo del ciclo di vita di una protesi da corsa

Le protesi sportive si caratterizzano per la necessità, tra le altre, di resistere a movimenti molto rapidi in presenza di carichi elevati. I sistemi di misura ottici sono utili per determinare la durata del ciclo di vita delle protesi stesse allo scopo di aumentare la sicurezza dell'atleta. I dati misurati vengono utilizzati per le operazioni di verifica e di confronto con i risultati ottenuti con metodi di misura tradizionali, come ad esempio gli estensimetri. L'azienda "Orthopädietechnik Winkler" ha sviluppato un progetto di ricerca su una protesi da corsa realizzata con una nuova fibra rinforzata da un materiale composito plastico con matrice di resina epossidica chiamato CRP ("Carbon-fiber reinforced polymer"). Tali protesi vengono realizzate in maniera personalizzata per ciascun individuo a cui sono destinate. Gli strati di CRP unidirezionali costituiti da fibre trasmettono la maggior parte del carico. I risultati dell'acquisizione tramite scanner, oltre che per gli obiettivi della ricerca, sono stati utilizzati anche per posizionare sulle protesi alcuni sensori per il controllo delle deformazioni e per avvertire l'atleta in caso di sovraccarico o danneggiamento. Prima di sviluppare un modello di previsione del ciclo di vita della protesi è necessario determinare le caratteristiche del materiale con cui è realizzata, come il modulo di Young, il coefficiente di Poisson e la resistenza a taglio attraverso prove di trazione e compressione. A questo scopo si effettuano sia delle simulazioni tramite software, sia delle prove sperimentali sulla protesi stessa. Per calcolare la durata del ciclo di vita della protesi i ricercatori hanno utilizzato la curva di Wöhler che è un grafico costruito su base statistica che mette in relazione la componente alternata di un ciclo di fatica con il numero di cicli che un provino è in grado di sopportare prima della rottura, in corrispondenza di una prefissata probabilità di accadimento (curva S-N).

I provini, pur sottoposti allo stesso tipo di carico, non si romperanno tutti dopo lo stesso numero di cicli (N), ma forniranno risultati caratterizzati da una distribuzione

normale con un determinato valore di dispersione. Successivamente si ripete la stessa serie di esperimenti con diversi valori della sigma alternata (componente alternata del ciclo di sforzo) [12].

Ai fini dello studio sulla protesi da corsa, i ricercatori hanno applicato un carico ciclico su diverse protesi per determinare la curva di Wöhler. Il carico è stato applicato in modo unidirezionale con un idropulsore (figura 1.4a). Le protesi sono state testate fino a rottura in un range di numero di cicli compreso tra mille e due milioni. Per il rilievo delle deformazioni si è utilizzato il sistema di misura ottico senza contatto PONTOS della serie ATOS. Il sensore ottico, a differenza dei metodi tradizionali come gli estensimetri, rileva gli spostamenti lungo le tre dimensioni x, y e z. Il sistema PONTOS si integra nel setup sperimentale senza necessità di apportarvi modifiche richiedendo solo l'uso di marker adesivi da applicare sull'area di interesse (figure 1.4a e 1.4b). Le misure possono essere effettuate anche in condizioni ambientali critiche. Simultaneamente possono essere registrate intensità di forze, distanze, temperature e altro da canali analogici.

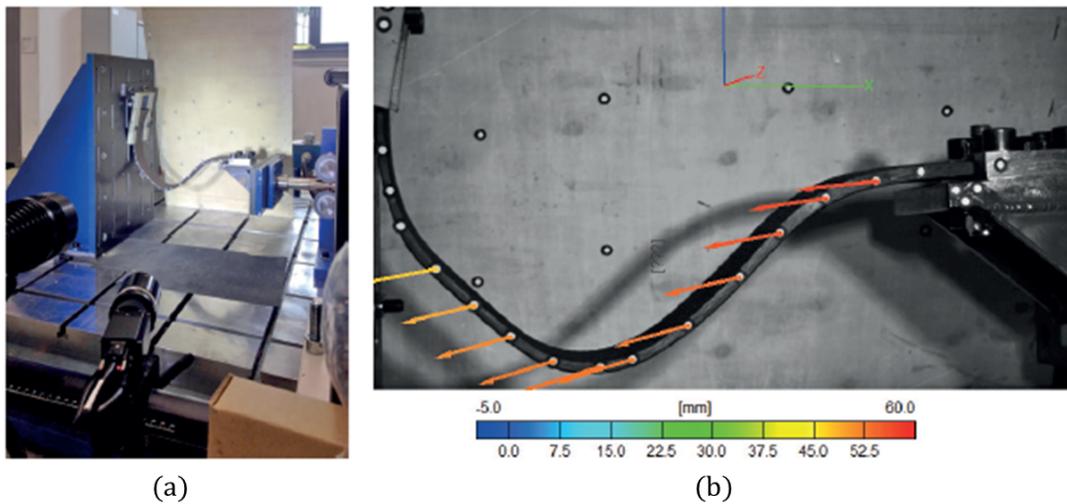


Figura 1.4: Il setup sperimentale per la prova su una protesi da corsa che integra il sistema PONTOS (a); il risultato del calcolo degli spostamenti nello spazio rilevati con il sensore ottico (b) [13].

Per validare i risultati ottenuti dalla sperimentazione vengono effettuati alcuni test su pazienti (figura 1.5). Il task consiste nel farli camminare su un tapis roulant ad una velocità compresa tra 6 e 10 km/h. Per registrare il moto del punto dove è applicata la forza e la corrispondente deformazione della piastra, anche per la validazione, si utilizza il sistema PONTOS che consente l'analisi del soggetto in movimento.

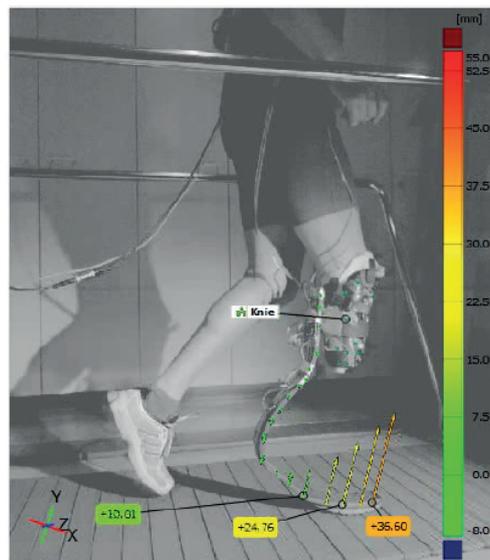


Figura 1.5: Validazione dei dati ottenuti sperimentalmente mediante un test su pazienti [13].

Le prove dimostrano che i carichi a cui la protesi è normalmente sottoposta sono inferiori rispetto a quelli che possono inficiarne la durabilità. Per contro, l'uso prolungato della protesi o il sovraccarico (per esempio dovuto a movimenti come il salto) può portarne alla riduzione della rigidità. Per queste ragioni è importante integrare la protesi con un sistema di sensori che ne assicurino il controllo costante [13].

## Capitolo 2

# Strumentazione e software utilizzati

Lo strumento utilizzato nel presente studio è un sistema di misura ottico 3D della serie ATOS sviluppato da GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH), denominato scanner *ATOS Core 500* costituito da due telecamere e un proiettore in grado di eseguire un rilievo nei minimi dettagli misurando milioni di punti [1]. Il software in dotazione è *ATOS Professional 2016*. Il programma calcola automaticamente le coordinate 3D di una nuvola di punti ad alta risoluzione. La mesh poligonale calcolata descrive le superfici di forma qualsiasi e le geometrie regolari ed è la base per creare un modello CAD mediante *reverse engineering*. Il software è stato testato e certificato dal tedesco *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) e dall'americano *National Institute of Standards and Technology* (NIST) acquisendo la classe di precisione 1 [14].

Nel seguito le sequenze di comandi sono evidenziate su sfondo grigio.

### 2.1 Scanner *ATOS Core 500*

Lo scanner ATOS Core 500 opera con una coppia di telecamere stereoscopiche (figura 2.1) utilizzando il principio della triangolazione con tecnologia Triple Scan brevettata da GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH).

Le due telecamere stereoscopiche operano unitamente al proiettore per acquisire tre punti di vista di un oggetto in un solo processo di misura. Questa tecnologia richiede un numero ridotto di scansioni fornendo dati ad alta qualità anche per superfici lucide e geometrie complesse. Pattern a frangia di forma prestabilita sono proiettati sulla superficie dell'oggetto e acquisiti dalle due telecamere. Dato che la geometria delle telecamere e del proiettore è nota grazie alla calibrazione preliminare, è possibile cal-

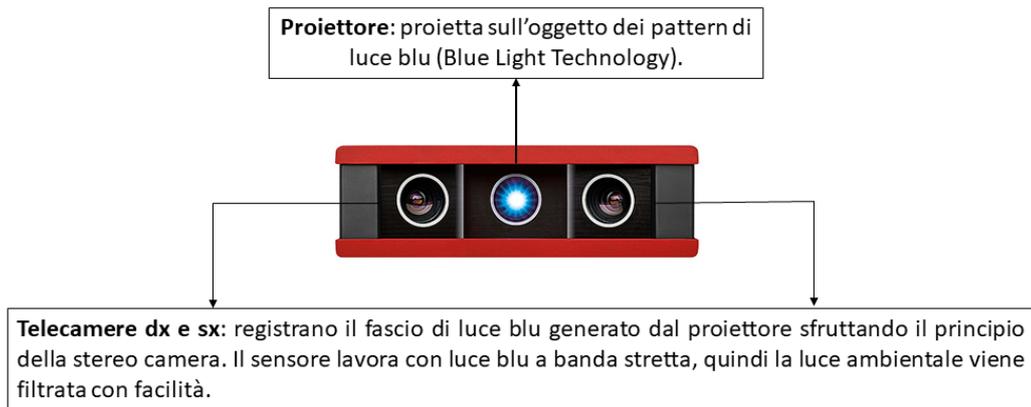


Figura 2.1: Scanner ottico 3D ATOS Core 500 [15].

colare le coordinate 3D dei punti dalle tre distinte intersezioni dei raggi ottici (figura 2.2).

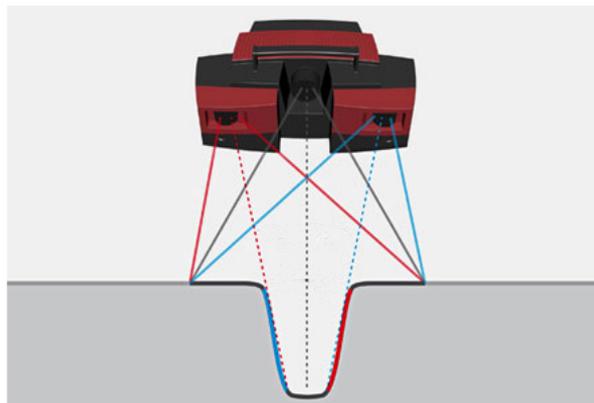


Figura 2.2: Principio della tripla scansione degli scanner della serie ATOS [16].

Il proiettore emette frange eterogenee sulla superficie dell'oggetto, generando uno sfasamento basato su distribuzioni sinusoidali dell'intensità sui sensori delle telecamere. ATOS Core usa differenti sfasamenti per massimizzare la precisione durante la digitalizzazione. Sulla base delle equazioni di trasformazione ottica, le coordinate 3D vengono calcolate automaticamente per ogni pixel delle telecamere. La tecnologia di proiezione *Blue Light* sviluppata da GOM sfrutta luce LED blu (400-500 nm) a banda stretta, così da poter effettuare misure precise indipendentemente dalle condizioni di luce ambientale poiché in tal modo è più agevole filtrare le componenti cromatiche non necessarie per le operazioni di rilievo. I componenti utilizzati nel sistema sono stabili nel tempo, hanno una maggiore vita utile, una limitata produzione di calore e minori costi di manutenzione. Le operazioni di acquisizione richiedono l'uso di marker di riferimento da posizionare sull'oggetto da misurare. Le telecamere stereoscopiche e

il sistema di punti di riferimento consentono:

- il rilevamento dei movimenti del sensore o del componente;
- la verifica della precisione e della qualità delle misure;
- l'identificazione dei cambiamenti ambientali (luminosità ambientale).

In tabella 2.1 si riportano le specifiche tecniche dello scanner utilizzato.

Tabella 2.1: Specifiche tecniche dello scanner ATOS Core 500 [17].

|   | <i>ATOS Core 500</i>                              | Unità di misura |
|---|---|-----------------|
| Punti di misura per singola scansione           | 5 milioni   | -               |
| Dimensioni                                      | $361 \times 205 \times 64$                        | <i>mm</i>       |
| Volume di misura                                | $500 \times 380 \times 380$                       | <i>mm</i>       |
| Trasferimento dei segnali immagine e di comando | Data link Gigabit con interfaccia Ethernet (GigE) | -               |
| Luce del proiettore                             | Radiazione ottica artificiale blu (400-500)       | <i>nm</i>       |
| Temperatura ambientale                          | 5-40  | °C              |
| Campo di tensione                               | 90-240  | <i>V</i>        |
| Frequenza di rete                               | 50-60   | <i>Hz</i>       |
| Potenza assorbita                               | 65  | <i>W</i>        |
| Pannello di calibrazione standard               | CP40/MV560  | -               |
| Diametro dei marker                             | 3   | <i>mm</i>       |
| Distanza di misura                              | 440   | <i>mm</i>       |

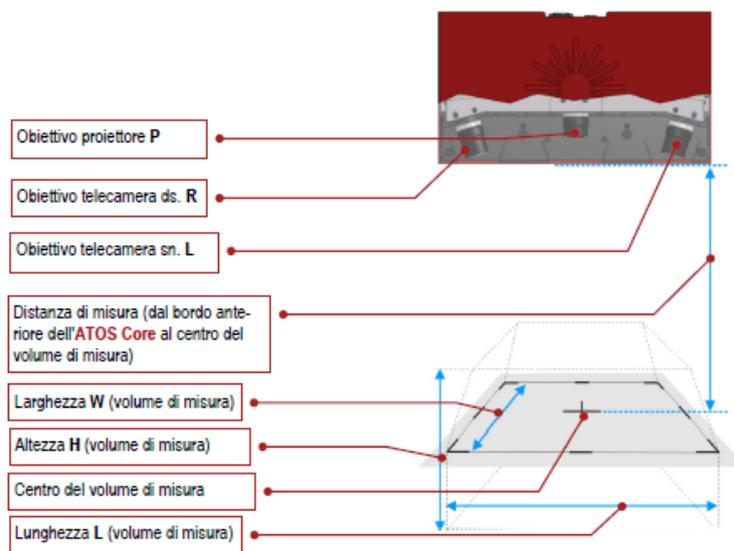


Figura 2.3: Nomenclatura relativa allo scanner ATOS Core 500 e al suo volume di misura [17].

### 2.1.1 Componenti hardware in dotazione

In figura 2.4 sono riportati gli elementi in dotazione con lo scanner utilizzato.



Figura 2.4: Componenti in dotazione con lo scanner *ATOS Core 500*.

Viene fornito un supporto mobile a cui fissare lo scanner per consentirne un agevole spostamento. Si può sollevare, abbassare, ruotare e, mediante il braccio trasversale, avvicinarlo o allontanarlo tenendo fisse le ruote del supporto stesso. La sonda (Touch Probe) rappresentata in figura 2.4 consente la misurazione di singoli punti presi direttamente sulla superficie dell'oggetto di interesse. Il Touch Probe di GOM è utile per diverse applicazioni [1]:

- misura rapida 3D di singoli punti;
- misura di punti in aree difficilmente accessibili;
- comparazione diretta con CAD;
- allineamento in tempo reale.

I marker servono per creare dei punti di riferimento rispetto ai quali il software colloca le immagini acquisite nello spazio, allineandole con le scansioni precedenti. Sul PC è installato il software *ATOS Professional 2016*. Il telecomando è utilizzato per controllare lo scanner a distanza.

### 2.1.2 Calibrazione del sensore

Il sistema di telecamere stereoscopiche controlla costantemente l'accettabilità delle acquisizioni. In caso di decalibrazione il software genera un avviso. La procedura di calibrazione è semplice e rapida. Si utilizza il pannello CP40/MV560 rappresentato in figura 2.5a.

Una volta collegato il dispositivo al PC e averlo inizializzato, tramite il software si esegue la calibrazione dello strumento secondo le istruzioni visualizzate nell'apposita

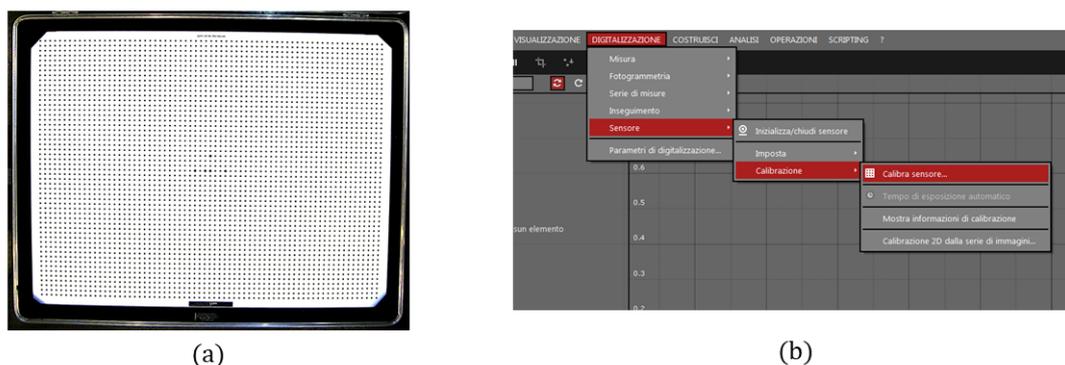


Figura 2.5: Pannello di calibrazione CP40/MV560 e sequenza di comandi su *ATOS Professional 2016*.

finestra di dialogo. In figura 2.5b è rappresentato lo *screenshot* dei comandi per accedere alla procedura di calibrazione guidata. L'utente deve spostare lo scanner eseguendo una sequenza di movimenti e inquadrando il pannello come suggerito nella finestra di dialogo.

### 2.1.3 Processo di misura

Lo scanner è collegato al PC e inizializzato in circa venti minuti per adeguarlo alle condizioni termiche ambientali. Come spiegato nel manuale di acquisizione base di ATOS (sezioni A1-A3) [18], durante la misura il sensore proietta un pattern sulla superficie dell'oggetto che le telecamere rilevano. In pochi secondi il software calcola milioni di punti tridimensionali (vedere Tabella 2.1) ad alta precisione per ogni misura. Per acquisire l'intero oggetto il sensore combina differenti viste parziali. Il sensore ATOS può essere posizionato manualmente di fronte al componente come desiderato. Dopo ogni misurazione, il sensore o l'oggetto vengono spostati per cogliere aree non acquisite dalla scansione precedente. Ogni singola misura viene trasformata nel sistema di coordinate del software, generando una nuvola di punti 3D dell'area di ripresa. Per ogni acquisizione il sistema controlla i seguenti fattori per assicurare l'affidabilità dei risultati anche in condizioni ambientali critiche:

- stato di calibrazione del sistema di misura;
- movimento dell'oggetto di misura e del sensore;
- cambiamenti della luce ambientale.

Per maggiore chiarezza si evidenzia la differenza tra scansione e digitalizzazione (sezione A4 della [18]):

- **scansione:** si riferisce all'esecuzione di una singola misura ottenuta mediante la proiezione delle frange sul componente;

- **digitalizzazione:** è la procedura che indica l'acquisizione completa delle coordinate 3D dell'oggetto da misurare dopo l'esecuzione delle scansioni effettuate.

## 2.2 Software ATOS Professional 2016

La schermata iniziale visibile quando si avvia il programma è riportata in figura 2.6a.

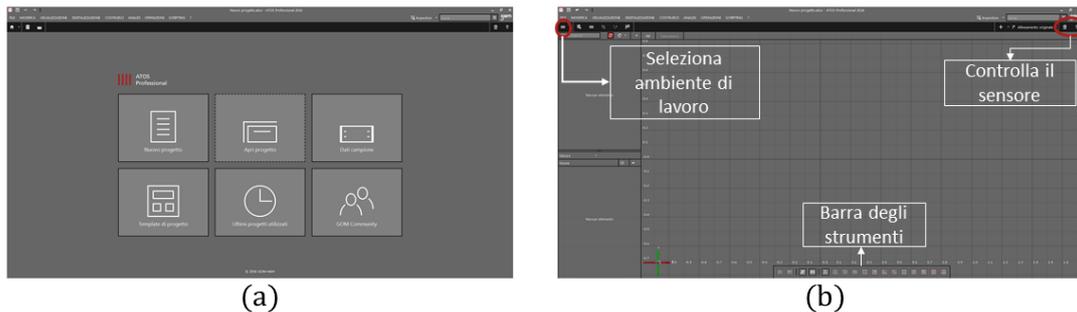


Figura 2.6: Schermata di avvio del software *ATOS Professional 2016* (a) e schermata iniziale dell'ambiente di lavoro (b).

L'ambiente di lavoro si presenta come in figura 2.6b. In alto a destra c'è l'icona che controlla il sensore e comunica all'utente se il sensore è scollegato (in nero), se è in fase di inizializzazione (in giallo) o se è pronto all'uso (in rosso). In basso è collocata la barra degli strumenti che consente di effettuare diverse operazioni sulla geometria, sulle mesh o sulle serie di misure. Con l'icona in alto a sinistra si seleziona l'ambiente di lavoro a seconda dell'operazione che si vuole effettuare.

Il software distingue due categorie di elementi:

1. **effettivi:** comprendono le *serie di misure* (le scansioni) e le mesh create;
2. **nominali:** comprendono i modelli CAD importati o realizzati a partire dalle mesh.

Tali elementi vengono organizzati ad *albero* e visualizzati nei riquadri a sinistra della figura 2.6b. È possibile importare o esportare file contenenti mesh, modelli CAD, geometrie, scansioni e altro in vari formati. In particolare quelli più utilizzati sono:

- **geometrie:** CSV, ASCII, VDA/PSET, IGES, XML;
- **mesh:** G3D, STL, POL, PLY, JT-Open.

### 2.2.1 Ambiente di lavoro DIGITALIZZA

Per la digitalizzazione di un oggetto il sensore ATOS proietta su di esso un pattern di frange luminose mentre le telecamere ne registrano la relativa immagine. Se il contrasto

delle frange è troppo basso il software non riesce a calcolare le coordinate dei punti 3D. Il contrasto dipende dal tipo di superficie da rilevare: quella ideale, che garantisce maggiore contrasto, è opaca e chiara. Invece, il contrasto sulle superfici riflettenti o trasparenti è basso. In tal caso occorre utilizzare, per esempio, uno spray opacizzante e antiriflesso per trattare le superfici da rilevare prima della ripresa (sezione E5 di [18]). Nell'ambiente di lavoro DIGITALIZZA è possibile avviare la scansione dell'oggetto da acquisire, creando una *Serie di misure* che farà parte degli *Elementi effettivi*. La scansione deve essere effettuata in modo che siano visibili sempre almeno tre marker di posizione nota, per consentire l'allineamento tra una porzione di oggetto scansionata e la successiva. Una volta scansionato l'oggetto è possibile trasformare la serie di misure in mesh e, successivamente, nel modello CAD o viceversa. La sequenza di comandi impartita è:

**OPERAZIONI → CAD → Mesh effettiva in CAD.../CAD in Mesh effettiva...** (figura 2.7).



Figura 2.7: Sequenza di comandi per trasformare la mesh in CAD e viceversa.

La vista delle telecamere è racchiusa nel riquadro in figura 2.8. Nei cerchi sono visibili le icone relative ai parametri da regolare per ottenere una scansione di buona qualità.

1. **Tempo di esposizione:** con un solo tempo, lo scanner effettua una scansione unica di durata regolabile dall'utente, altrimenti ne effettua due o tre. È possibile impostare i tempi di esposizione in modo manuale.
2. **Tempo di esposizione per la misura:** con la rotella del mouse si modificano le zone più o meno esposte.
3. **Tempo di esposizione dei punti di riferimento:** con la rotella del mouse si modifica il tempo di esposizione dei marker da cui dipende anche il contrasto; se

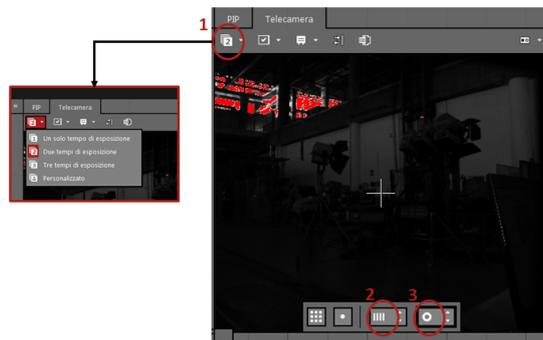


Figura 2.8: Vista delle telecamere e parametri da regolare per la scansione.

risultano a *basso contrasto* bisogna aumentarlo, se risultano *soureaesposti* bisogna diminuirlo.

### Punti di riferimento del software

Il sensore ATOS può acquisire solo le aree comprese nel campo visivo delle telecamere. Se l'oggetto ha fori, curvature o dimensioni che eccedono il volume di misura occorrono più acquisizioni per digitalizzarlo. Il sistema identifica i marker di riferimento in real time. Il software costruisce un'ellisse attraverso le transizioni dei livelli di grigio sui marker (sfondo nero e porzione circolare bianca) e ne calcola il centro (figura 2.9). Al punto riconosciuto viene automaticamente assegnata un'etichetta identificativa.

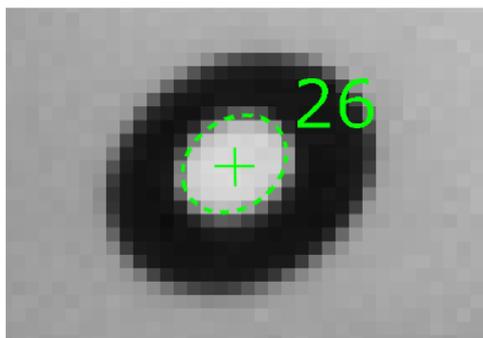


Figura 2.9: Marker di riferimento visto dal software (sezione D di [18]).

Il software può anche orientare le misure senza utilizzare i marker di riferimento utilizzando una trasformazione per *best-fit* (sezione D di [18]).

Dopo ogni acquisizione il programma genera un feedback sulla qualità della scansione secondo i giudizi riportati in figura 2.10a. Il feedback tiene conto di diversi parametri tra cui la temperatura del sensore, l'allineamento reciproco delle scansioni, il movimento e la variazione di luminosità (figura 2.10b).

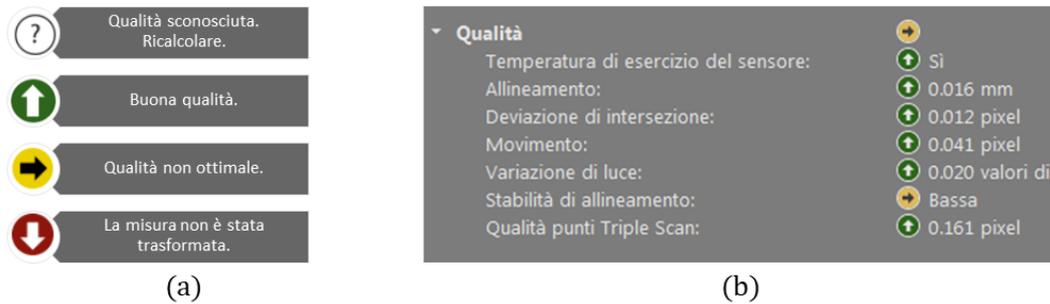


Figura 2.10: Feedback sulla qualità di scansione (a) e parametri che determinano la qualità (b).

### Criteri per l'applicazione dei marker

Non esistono delle vere e proprie regole per l'applicazione dei marker, ma ci si basa sul tipo di oggetto e sull'esperienza dell'operatore tenendo conto delle seguenti indicazioni (sezione D di [18]):

- non posizionare i marker troppo vicini ai bordi (distanza di almeno un diametro del marker) per evitare che il software, in fase di poligonalizzazione, non riempia i buchi dovuti al marker stesso;
- distribuire regolarmente i marker nel volume di misura (altezza, larghezza, altezza);
- posizionare i marker in modo che siano visibili dalle telecamere;
- evitare l'allineamento dei marker;
- non applicare marker in numero eccessivo nel volume di misura perché ciò non migliora l'accuratezza.

Inoltre, l'oggetto o la porzione da acquisire, deve essere al centro del volume di misura (figura 2.11).

In figura 2.12 è riportato in grigio il risultato 3D della scansione del puntone di una vettura reale. Si nota che il software visualizza un box tridimensionale corrispondente all'inquadratura attuale delle telecamere, rappresentativo del volume di misura. Il riquadro a destra mostra le proprietà della misura selezionata.

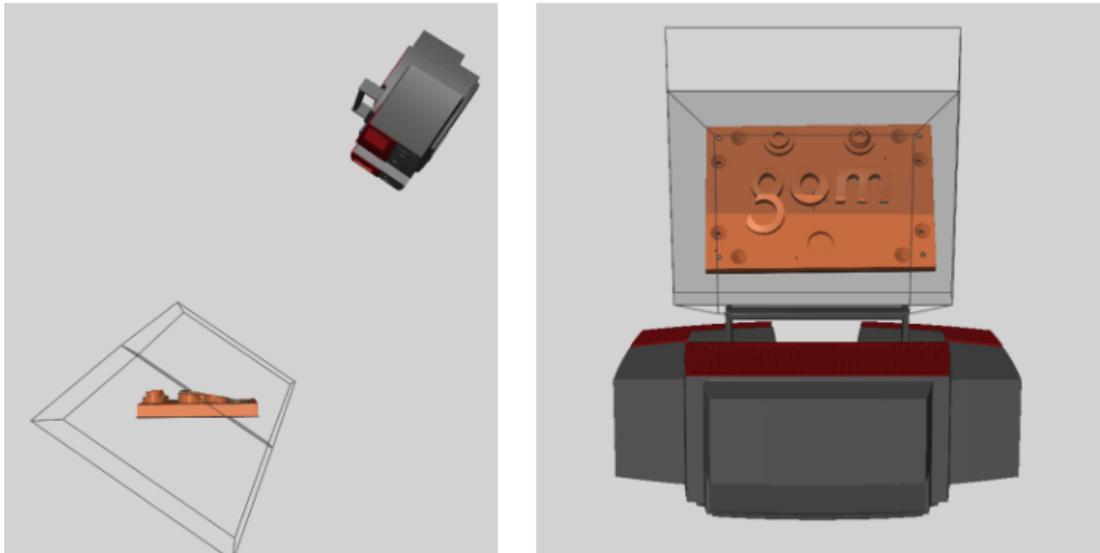


Figura 2.11: Posizione corretta dell'oggetto nel volume di misura (sezione E di [18]).



Figura 2.12: Esempio di scansione del puntone di una vettura reale.

## Poligonalizzazione

Dopo l'acquisizione e l'allineamento ogni misura è considerata dal software come entità distinta. Durante la poligonalizzazione il software modifica le anteprime delle singole mesh convertendole, infine, in una mesh unica costituita da triangoli non sovrapposti. A seconda della curvatura della superficie i triangoli della mesh hanno una densità differente. Durante la poligonalizzazione il software:

- rileva il rumore dovuto al sensore;
- elimina gli errori di mesh;
- riempie i punti di riferimento (marker);
- effettua lo *smoothing* e il *thinning*.

La poligonalizzazione si avvia cliccando sull'icona .

**Modifica della mesh** Dopo la poligonalizzazione la mesh ottenuta contiene dei difetti dovuti alla procedura di acquisizione. Il problema principale è rappresentato dalla presenza di buchi sulla mesh di superficie. Impartendo la sequenza di comandi

**OPERAZIONI** → Mesh → Chiudi fori

è possibile ripararli con le seguenti modalità:

- Modo interattivo: consente di chiudere i fori completamente o parzialmente (icona );
- Modo automatico: consente di chiudere i fori completamente selezionando un'area specifica della mesh;
- Ponte di mesh: consente di dividere fori di grandi dimensioni creandone di più piccoli (figura 2.13) da riempire con il metodo interattivo.

Inoltre la mesh si può riparare, levigare, alleggerire e rifinire mediante gli appositi comandi presenti tra le OPERAZIONI.

### 2.2.2 Ambiente di lavoro ANALISI

La mesh poligonale, ottenuta dall'acquisizione, può essere analizzata confrontandola direttamente con la geometria CAD importata (elemento nominale). Per mezzo del software è possibile eseguire un'analisi 3D delle superfici e un'analisi 2D delle sezioni o dei punti [14]. Talvolta si richiede di confrontare lo stesso componente in due momenti

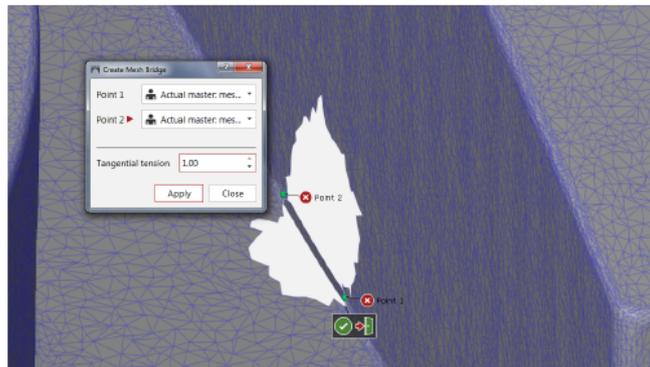


Figura 2.13: Ponte di mesh (sezione M 3.4 di [18]).

diversi, per esempio prima e dopo una prova che ne provoca la deformazione. In questo caso è possibile:

- eseguire la scansione dell'oggetto prima e dopo la prova;
- realizzare la mesh, generare il modello CAD dell'elemento indeformato ed esportarlo;
- realizzare la mesh dell'elemento deformato;
- importare in un unico file la mesh dell'elemento deformato e il modello CAD dell'indeformato;
- allineare i due elementi;
- eseguire l'analisi.

### Allineamento

Un fattore importante per un'analisi di qualità è costituito dall'allineamento di due scansioni successive. Eseguite le distinte acquisizioni del pezzo, prima e dopo la prova, tramite il software le si allineano prendendo come riferimento i punti rimasti indeformati. Il software esegue un primo allineamento automaticamente (*Allineamento originale*). Se il risultato non è soddisfacente si può avviare la procedura di allineamento iterativa e qualitativa. Il software dispone di tre diversi metodi di allineamento (figura 2.14):

- Allineamento iniziale;
- Allineamento principale;
- Allineamento manuale.

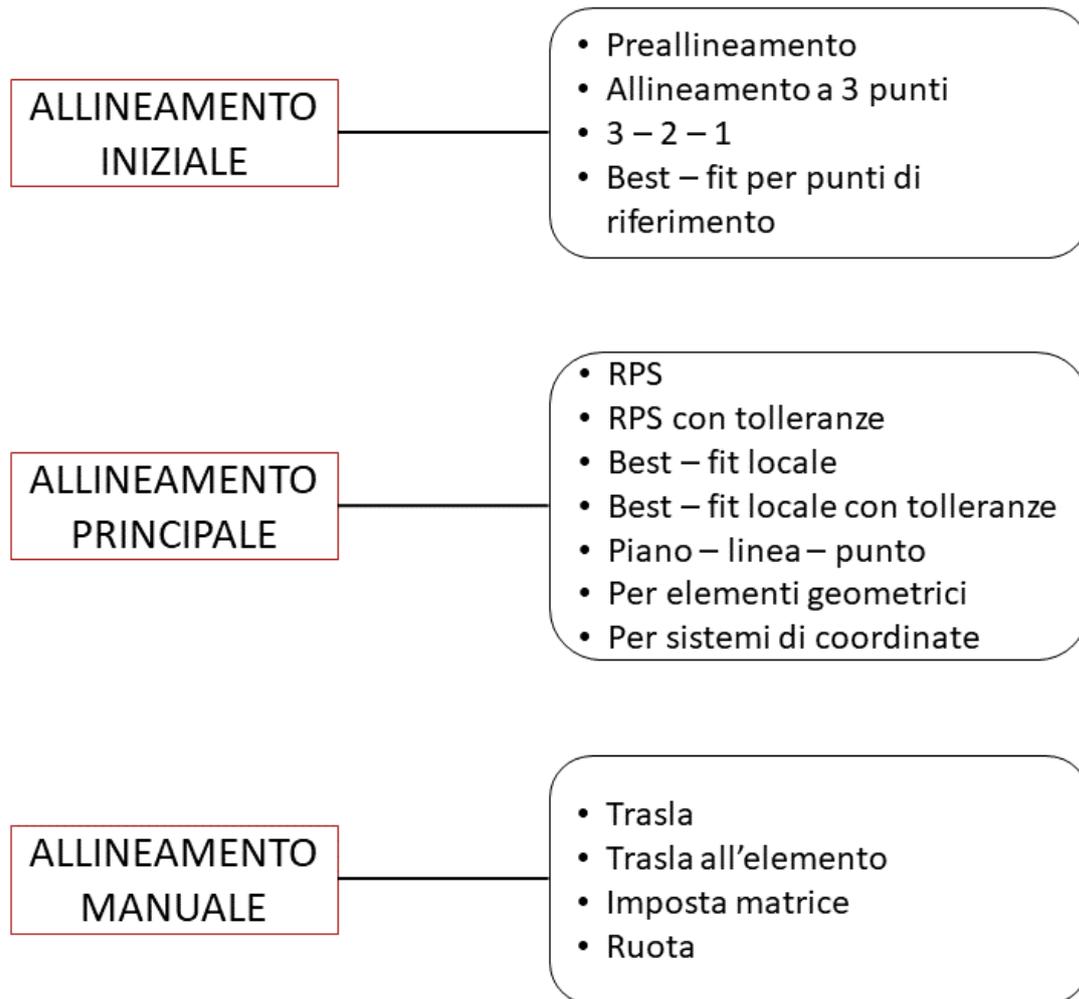


Figura 2.14: Metodi di allineamento del software *ATOS Professional 2016*.

Una possibile sequenza operativa inizia con il *Preallineamento* che tenta di allineare i dati misurati a quelli nominali (modello CAD), indipendentemente dalle rispettive posizioni iniziali (sezione F3 di [19]). È possibile impostare il *tempo di ricerca* dell'allineamento a seconda della forma del pezzo:

1. tempo breve: adatto per componenti con struttura regolare;
2. tempo normale: adatto per componenti piatti;
3. tempo lungo: adatto per componenti simmetrici rispetto ad un asse.

In generale, più un componente è articolato, più rapidamente il software trova una soluzione per l'allineamento. Il programma può eseguire un best-fit aggiuntivo dopo il preallineamento per migliorare la corrispondenza tra le scansioni. Se il preallineamento non è sufficiente si utilizzano gli altri metodi disponibili. Una volta allineate le scansioni si effettua l'analisi delle deviazioni creando una mappa cromatica i cui colori hanno il significato riportato in tabella 2.2.

Tabella 2.2: Significato dei colori della mappa cromatica risultante dall'analisi (sezione F4 di [19]).

| Colore | Significato         |
|--------|---------------------|
| Blu    | Deviazione negativa |
| Verde  | Nessuna deviazione  |
| Rosso  | Deviazione positiva |

Il confronto è eseguito tra la superficie nominale di riferimento e la mesh effettiva del pezzo. Esistono due comandi per calcolare un confronto di superfici:

1. *Crea confronto di superficie su CAD;*
2. *Crea confronto di superficie sull'effettivo.*

Con entrambi i comandi il software confronta ogni punto del modello CAD con il corrispondente punto effettivo o viceversa calcolando la distanza perpendicolare diretta di ogni punto dei poligoni del modello CAD dai corrispondenti punti effettivi misurati. Con il primo comando la mappa cromatica, rappresentativa dei risultati dell'analisi, è riportata sul modello CAD mentre con il secondo è riportata sulla mesh effettiva.

Si possono creare delle etichette su cui compare il valore di spostamento relativo al punto in esame, chiamate *Annotazioni di deviazione*. Esse consentono di rappresentare numericamente l'entità delle deviazioni puntuali. Si possono anche creare delle annotazioni per i valori di deviazione minima e massima in una determinata porzione di superficie.

### 2.2.3 Ambiente di lavoro LIVE

Come descritto nella sezione A del manuale [20] con il termine *live* si intende la capacità del sensore GOM di "inseguire" i punti da rilevare in un sistema di coordinate locale definito dall'utente. L'inseguimento avviene in *real time*. In questa fase si possono attivare due condizioni operative: il *tracking* e la *misurazione online*. Col *tracking* si segue lo spostamento real time di alcuni punti prefissati sull'oggetto interessato dal movimento, rispetto ad una serie di altri punti individuati sulla parte del componente che rimane fissa. Il programma visualizza in tempo reale i valori della terna di coordinate dei punti predefiniti sulla parte che si muove. In questa modalità è possibile anche l'*inseguimento* delle deviazioni con il quale si visualizzano gli spostamenti di tutti i punti dell'oggetto in movimento rappresentati secondo una mappa cromatica prefissata. Con la *misurazione online* si utilizza la Touch Probe (sonda a contatto) con la quale, dopo aver definito una superficie di riferimento individuata da almeno tre punti, è possibile ottenere la posizione di qualsiasi altro punto ubicato in prossimità della stessa zona di riferimento. Il movimento dell'oggetto dev'essere lento e di limitata entità. L'acquisizione *live* si presta per valutare gli effetti di carichi applicati in modalità quasi statica.

#### Esempio di acquisizione LIVE

A scopo dimostrativo si descrive l'acquisizione degli spostamenti nel caso di apertura e chiusura di uno sportello per serbatoio carburante di una vettura. In questo caso la parte fissa è rappresentata dalla scocca, la parte mobile è lo sportello stesso su cui si posizionano i rispettivi marker. Dapprima occorre effettuare una scansione dell'oggetto di interesse (figura 2.15) avendo cura di includere anche la porzione che sicuramente resterà fissa.

Se necessario si può creare un sistema di riferimento locale da allineare con quello globale (vedere la sezione 2.2.2) che, a seconda della geometria dell'elemento da misurare, potrà avere l'origine o sulla parte mobile o su quella fissa. In seguito si crea la mesh dell'intero componente dalla quale ottenere il modello CAD. Dopo tale operazione occorrerà verificare l'allineamento tra i sistemi di riferimento. Nell'ambiente LIVE si creano due cosiddetti *componenti a punti*, uno rigido e uno soggetto a deformazione. Per quello rigido si selezionano i marker che non sono soggetti a spostamento, in questo caso quelli sulla scocca; per quello soggetto a deformazione si selezionano i marker sullo sportello (figura 2.15). Si possono costruire eventuali punti di inseguimento per i quali visualizzare la variazione delle coordinate spaziali durante l'acquisizione live. Tali punti saranno *seguiti* dallo scanner entro le dimensioni del volume di misura (figura 2.16).

Per visualizzare il movimento del componente mobile durante l'acquisizione (non solo dei suoi punti di inseguimento) occorre creare una specifica mesh della parte mobile stessa, farne una copia e fissarla al componente che comprende i marker che si

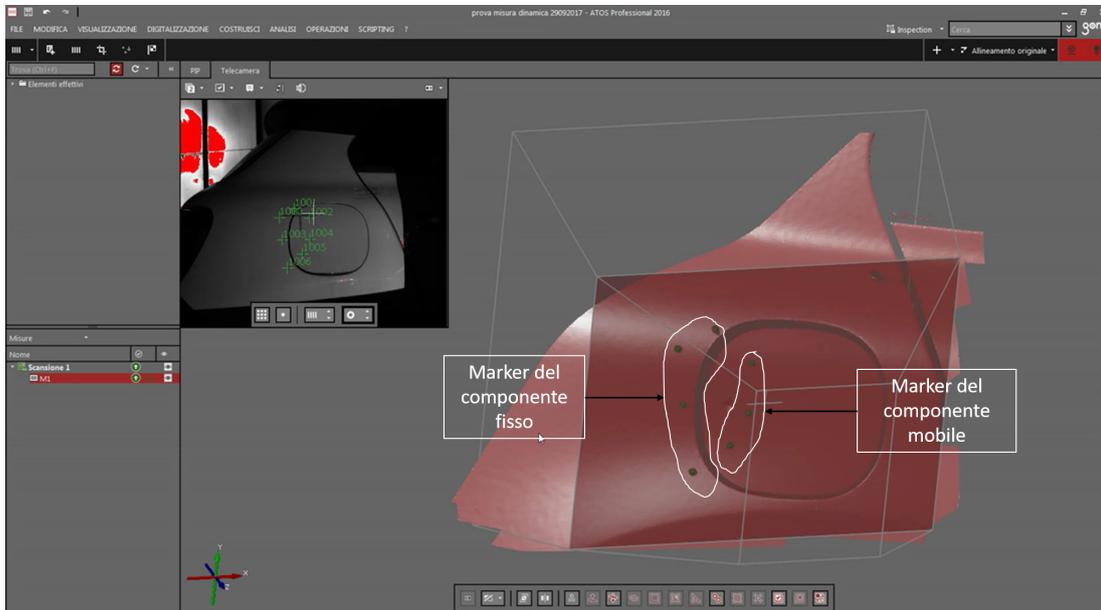


Figura 2.15: Scansione dell'area di interesse per la misura dinamica.

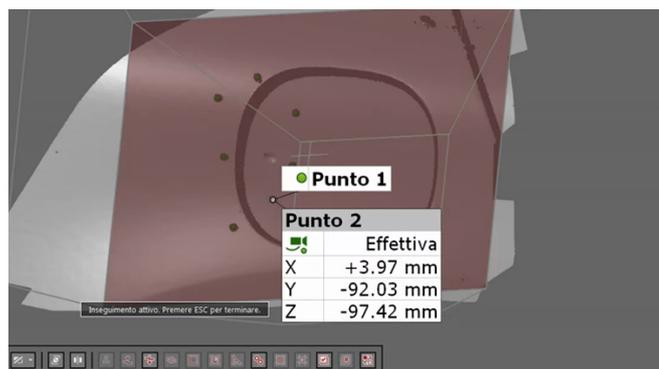


Figura 2.16: Punto di inseguimento sullo sportellino.

sposteranno. La mesh originaria (attiva) sarà contrassegnata da un quadratino verde nella lista ad albero (figura 2.17).

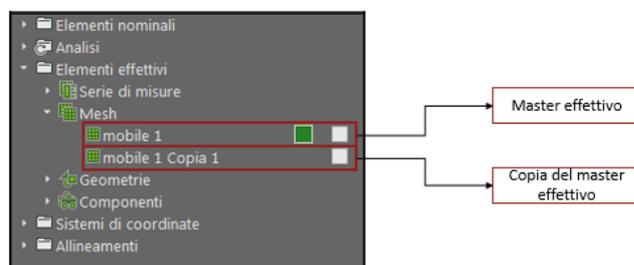


Figura 2.17: Mesh dello sportello e una sua copia; il master effettivo è contrassegnato dal quadratino verde.

La sequenza di comandi da impartire è: **LIVE → Fissa elemento a componente**, che richiede di selezionare la *componente a punti* soggetto a deformazione e la porzione di mesh dell'elemento mobile.

Si può osservare la mappa delle deviazioni durante l'acquisizione *live* visualizzandola prima dell'avvio con la seguente sequenza di comandi:

**ANALISI → Confronto CAD → Confronto di superficie sull'effettivo**.

Occorre selezionare la copia del master effettivo creata precedentemente facendo in modo che sia l'unico elemento visualizzato nella finestra dell'ambiente di lavoro (figura 2.18).

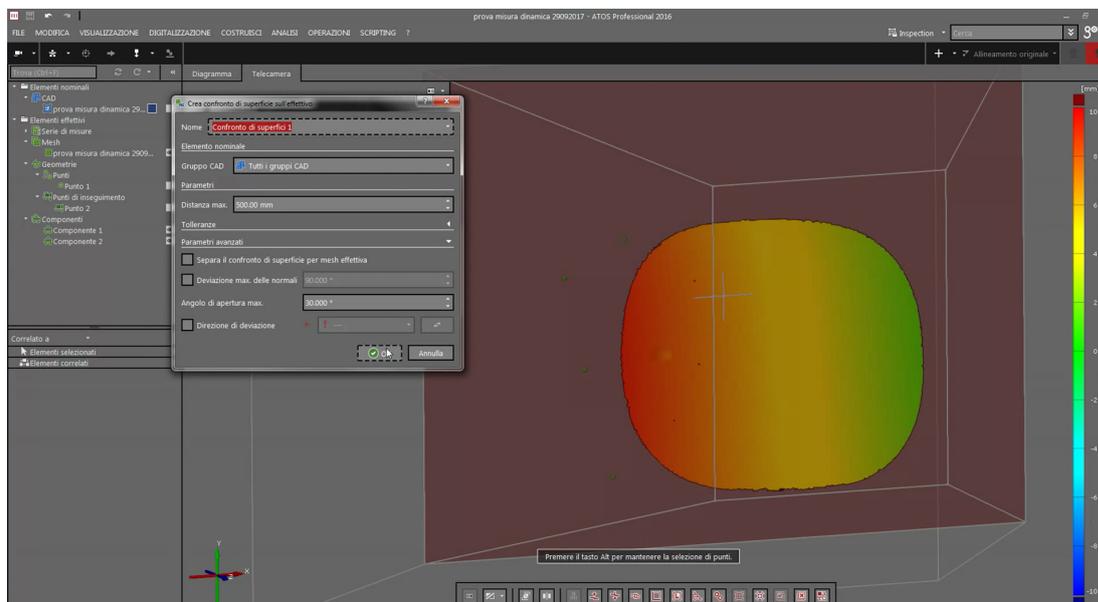


Figura 2.18: Risultato iniziale dell'analisi.

Una volta calcolata la mappa cromatica di analisi è possibile avviare l'acquisizione

*live* lasciando visibile il risultato dell'analisi stessa. La mappa cromatica si aggiorna automaticamente durante l'acquisizione (figura 2.19) richiedendo tempi lunghi, perciò tale procedura è consigliata per misure quasi statiche, su oggetti che si spostano lentamente.

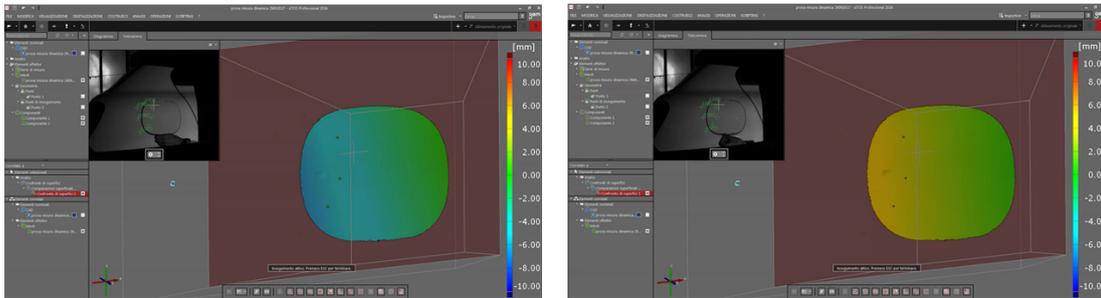


Figura 2.19: Aggiornamento live della mappa delle deviazioni.

### Calcolo della posizione con Touch Probe

Utilizzando la sonda in dotazione (figura 2.20) è possibile ricavare la posizione nello spazio di un dato punto sulla superficie dell'oggetto compreso nel volume di misura dello scanner. Il software identifica la probe GOM tramite i punti di riferimento posti sull'impugnatura e, mediante la calibrazione, calcola la posizione della testa di misura sferica, noti il suo centro e il suo raggio.



Figura 2.20: Touch probe PM5, sonda con diametro 5 mm (sezione D di [20]).

Acquisita una serie di misure relative ad una superficie su cui sono presenti dei marker di riferimento si possono misurare e memorizzare manualmente con la sonda le coordinate di qualsiasi altro punto sulla superficie stessa ricadenti all'interno del volume di misura. La sequenza di comandi da impartire è:

**LIVE → Misurazioni con touch probe → Punto su superficie (touch probe).**

I punti di riferimento della probe non devono appartenere alla stessa nuvola dei punti di riferimento dell'oggetto da misurare (sezione D di [20]). La finestra di dialogo, nella sezione **Piano**, chiede di definire con la probe prima la superficie a cui appartengono i punti da misurare, rilevandone almeno tre sufficientemente vicini tra loro. Per l'acquisizione di ciascun punto di calibrazione si può utilizzare il telecomando in dotazione premendo il tasto con la freccia verso destra (figura 2.4). Per l'acquisizione dei punti

desiderati occorre premere più a lungo lo stesso tasto, passando così alla sezione successiva della finestra di dialogo **Punto su superficie** (figura 2.21).

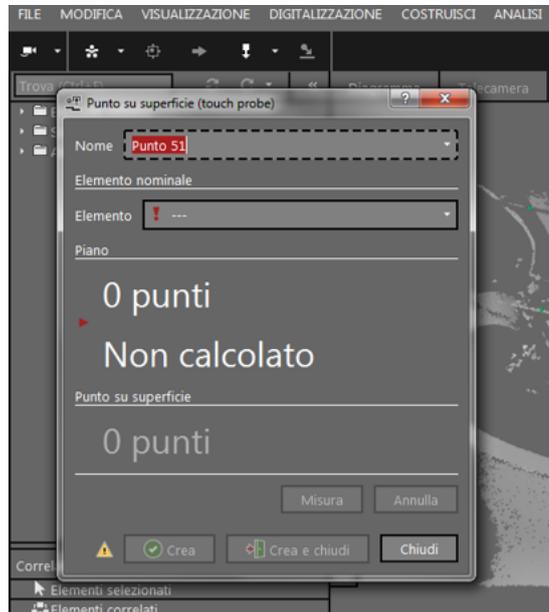


Figura 2.21: Finestra di dialogo per l'acquisizione dei punti sulla superficie con la sonda.

### 2.2.4 Report e risultati

I risultati dell'analisi possono essere presentati in report personalizzabili con snapshot, immagini, tabelle, diagrammi, testi e grafici. I dati possono essere visualizzati e modificati direttamente nell'interfaccia utente ed esportati o sotto forma di documento PDF o come immagini [14]. In figura 2.22 si riporta la barra degli strumenti per eseguire le operazioni nell'ambiente relativo alla reportistica. I pulsanti disponibili sono (sezione



Figura 2.22: Barra degli strumenti dell'ambiente di reportistica.

M di [19]):

- Ripristino viste 3D dalle pagine di report;
- Sovrascrittura pagine di report;
- Riconfigurazione pagine di report;
- Definizione parole chiave del progetto;
- Esportazione report in formato PDF;
- Avvio della presentazione a schermo.

Per creare una pagina di report in modo rapido si utilizza il pulsante  presente nell'ambiente di lavoro ANALISI.

## Capitolo 3

# Procedure operative per l'urto assicuratori

In seguito sono riportate le norme di riferimento per il protocollo RCAR di crash test e la descrizione del sistema tedesco di rating assicurativo che regolano le prove descritte nel capitolo 4.

### 3.1 Protocollo RCAR di crash test a bassa velocità

La prima applicazione sperimentale dello scanner *ATOS Core 500* riguarda l'urto assicuratori previsto dalla normativa Research Council for Automobiles Repairs (RCAR) [21]. La procedura di prova RCAR serve a valutare la danneggiabilità e la riparabilità di un veicolo a seguito di un urto in ambito urbano. L'obiettivo del test è la stima dei danni al veicolo (danni fisici e costi di riparazione) in corrispondenza di due tipi di impatto:

1. impatto frontale del veicolo con velocità di 15 km/h contro una barriera rigida;
2. impatto posteriore di una barriera rigida mobile con velocità di 15 km/h contro il veicolo fermo.

Definito l'*overlap* come la percentuale della semi-larghezza anteriore o posteriore del veicolo che impatta contro la barriera, le due modalità di impatto ne prescrivono un valore pari al 40% in modo da indurre i progettisti ad adottare soluzioni costruttive per limitare i danni strutturali a bassa velocità. La barriera deve essere inclinata di 10° rispetto alla normale alla direzione di marcia. In figura 3.1 è riportata la configurazione di prova del veicolo per l'impatto frontale, in caso di guida a sinistra o a destra, dove:

- U = overlap del 40%;
- B = larghezza frontale del veicolo;

- R = raggio di 150 mm;
- F = veicolo di test;
- A = angolo di 10°.

La barriera è posizionata in modo che l'urto coinvolga la porzione di auto prefissata e dev'essere vincolata a terra, ma non a contatto col suolo per non ostacolare la rotazione della vettura.

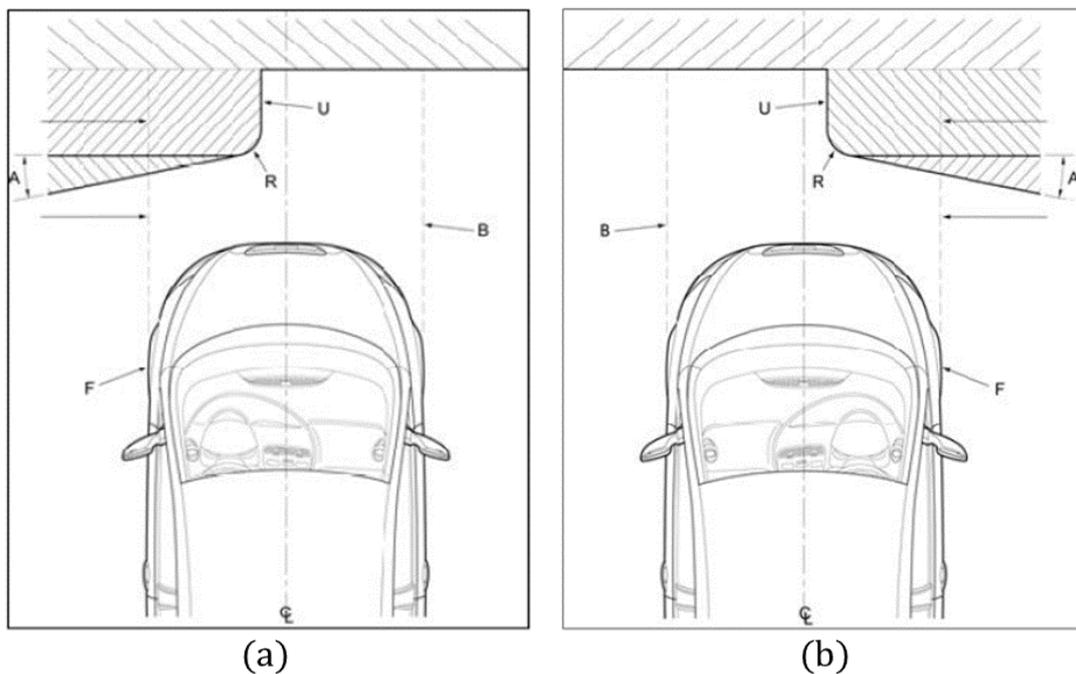


Figura 3.1: Configurazione del veicolo e della barriera per l'impatto frontale nell'urto assicuratori ("Appendix 1" di [21]).

In figura 3.2 è riportata la configurazione per l'impatto posteriore, in vista laterale e dall'alto, dove:

- MB = Barriera Mobile;
- H = Altezza della barriera (700 mm  $\pm$  10 mm);
- h = Distanza della barriera dal terreno (200 mm  $\pm$  10 mm);
- F = Veicolo di prova;
- R = Raggio costante (150 mm);
- r = Raggio costante (50 mm);
- U = Overlap 40%;

- B = Larghezza posteriore del veicolo.

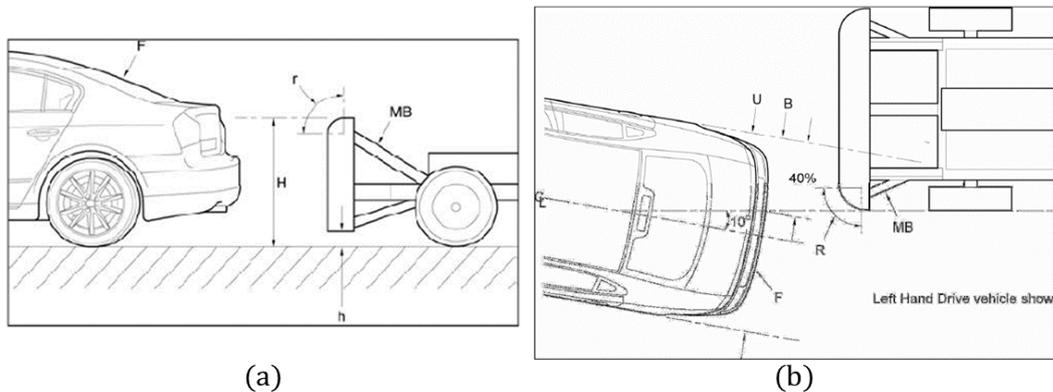


Figura 3.2: Configurazione del veicolo e della barriera per l'impatto posteriore nell'urto assicuratori ("Appendix 2" di [21]).

### 3.1.1 Impatto frontale: preparazione del veicolo e area di test

L'area di test comprende la pista di accelerazione, la barriera e la strumentazione necessaria. I 5 m finali di pista che precedono la barriera devono essere orizzontali, piani e lisci. La barriera deve essere stabilmente ancorata al pavimento. La faccia frontale deve essere verticale entro  $\pm 1^\circ$  e deve essere inclinata in orizzontale di  $10^\circ$  rispetto alla perpendicolare all'asse longitudinale del veicolo. Il contatto iniziale del veicolo dev'essere sul lato guidatore e la parte frontale del veicolo deve sovrapporsi alla barriera del  $40\% \pm 25$  mm. Di seguito si riportano le prescrizioni per determinare il peso complessivo della vettura:

- i serbatoi devono essere pieni o il loro contenuto dev'essere rimpiazzato da zavorre di peso equivalente;
- la pressione degli pneumatici dev'essere quella consigliata dal costruttore per il caso di singolo occupante;
- la massa totale della vettura è data dal peso a vuoto <sup>1</sup> più quello di un manichino 50 percentile maschio, pari a  $75 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg}$  o di una zavorra equivalente assicurata con una cintura standard a tre punti di ancoraggio (*Standard A + 1*);
- l'aggiunta di zavorre non deve alterare il rapporto fronte-retro in peso oltre il 5% (angolo di beccheggio).

<sup>1</sup>Peso del veicolo non occupato con gli pneumatici alla pressione prescritta dal fabbricante. Include il serbatoio del carburante pieno ed eventuali equipaggiamenti standard.

### Condizioni di prova

Prima di eseguire la prova occorre verificare che:

- i pedali regolabili, lo sterzo e gli attacchi delle cinture siano posizionati a metà del range della loro corsa;
- i sedili frontali siano a metà della loro corsa, sia verticalmente che orizzontalmente, e lo schienale sia posizionato nella condizione ordinaria di guida (alternativamente usare un manichino per la determinazione del punto "H"<sup>2</sup>);
- il quadro sia acceso ma il motore spento;
- nessuna marcia sia ingranata (veicolo a folle);
- le porte siano chiuse (a chiave o no).

La vettura è accelerata da un meccanismo esterno. Al momento dell'urto sul veicolo non deve agire nessuna forza di propulsione. La velocità di impatto, compresa fra 15 km/h e 16 km/h, va misurata non oltre un metro prima della barriera.

#### 3.1.2 Impatto posteriore: preparazione del veicolo e area di test

L'area di test è analoga a quella per l'impatto frontale. L'urto avviene tra la barriera mobile e la parte posteriore del veicolo fermo. La barriera deve essere conforme alle dimensioni indicate in figura 3.2. In particolare:

- la faccia frontale della barriera deve essere inclinata al massimo di 1°;
- la barriera deve essere assicurata in modo da seguire un percorso rettilineo;
- deve essere dotata di freni in modo da evitare impatti secondari dopo il primo contatto;
- il suo peso deve essere pari a 1400 kg ± 5 kg.

La barriera va posizionata in modo che l'overlap sia pari al 40% ± 25 mm della semi-larghezza posteriore della vettura e che il suo asse longitudinale formi un angolo di 10° ± 1° con l'asse longitudinale del veicolo. Se possibile si usa la stessa vettura dell'impatto frontale utilizzando il lato opposto rispetto alla prova frontale.

---

<sup>2</sup>È il punto di articolazione tra il busto e le parti superiori delle gambe. Rappresenta la posizione relativa all'anca quando si sta seduti su di un sedile ed è espressione delle condizioni di comfort per l'occupante [22].

## 3.2 Sistema tedesco di rating assicurativo del veicolo

Il sistema di rating tedesco per la definizione della classe assicurativa serve a valutare i costi dei risarcimenti assicurativi per stimare il premio per uno specifico veicolo nel mercato tedesco. Anche la maggior parte degli enti assicuratori di livello internazionale si basa sulla classe definita dal German Rating per il calcolo dei premi [23]. La procedura è stata messa a punto da Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) sotto la guida di un ente fiduciario indipendente (RCAR) e prevede una valutazione tecnica della riparabilità del veicolo. La lista delle classi assicurative viene pubblicata il primo ottobre di ogni anno dalla stessa GDV. Le categorie di veicoli, riferite ai modelli dell'anno precedente, vengono modificate e controllate sulla base delle nuove statistiche della GDV valutando le differenze tra quanto certificato inizialmente e i risultati reali rilevati su strada. Le classi, definite in base al valore e ai range degli indici, sono determinate con metodi statistici (analisi iterativa della minima varianza) sia per la copertura completa che parziale. Esistono 25 categorie nella copertura completa e 24 nella parziale. La classificazione di ogni modello è basata sul premio di rischio RP definito per il tipo di veicolo più rappresentativo per la categoria a cui esso appartiene. Ad ognuna di queste è associato un range di valori dell'indice RP: il superamento dei limiti dell'intervallo obbliga alla riclassificazione del modello.

### 3.2.1 Procedura di classificazione

Se un nuovo veicolo può essere assegnato ad un gruppo esistente, ad esso si attribuisce l'indice RP corrispondente. Per i veicoli che non possono essere assegnati ad un gruppo esistente se ne crea uno nuovo e i valori della frequenza dei risarcimenti (CF), della media dei risarcimenti (CA) e del premio di rischio (RP) devono essere determinati per la prima volta.

#### Copertura completa

Nella copertura completa la classificazione dei nuovi modelli che non possono essere collocati in un gruppo già esistente si basa sul valore dell'indice del premio di rischio ( $RP_{index}$ ) calcolato secondo la seguente formula:

$$RP_{index} = \left\{ Index \left( \frac{CA_{individual}}{CA_{total}} \cdot 100 \right) \cdot Index \left( \frac{CF_{individual}}{CF_{total}} \cdot 100 \right) \right\} / 100,$$

dove:

- $CA_{individual}$  è la media dei risarcimenti del modello da classificare;
- $CA_{total}$  è la media dei risarcimenti relativi a tutti i modelli sul mercato;

- il rapporto tra le due grandezze descritte rappresenta l'indice della media dei risarcimenti  $CA_{Index}$ ;
- $CF_{individual}$  è la frequenza dei risarcimenti del modello da classificare;
- $CF_{total}$  è la frequenza dei risarcimenti relativi a tutti i modelli sul mercato;
- il rapporto tra le precedenti due grandezze descritte rappresenta l'indice della frequenza dei risarcimenti  $CF_{Index}$ .

I rapporti che compaiono nella formula ( $CA_{Index}$  e  $CF_{Index}$ ) indicano con quale percentuale il modello da classificare è superiore o inferiore alla media complessiva di tutti i modelli in termini di media e frequenza dei risarcimenti. La CA per un nuovo modello non esiste e viene calcolata secondo il metodo di calcolo del danno (TSB). Per tener conto anche dell'influenza della potenza del veicolo (P) sui costi di riparazione medi per un particolare modello, si introduce un termine che è funzione della potenza stessa (l'indice  $CA_{kW}$ ). Il metodo di calcolo della media dei risarcimenti è il seguente:

$$Index\ CA = Index\ CA_{TSB} + Index\ CA_{kW},$$

dove  $Index\ CA_{kW} = 0,1 \cdot P(kW) + 5,7$ .

In questo metodo di calcolo sono importanti non solo i prezzi dei singoli ricambi, ma anche il tempo occorrente per la riparazione. Al diminuire del tempo di riparazione e della quantità di materiale necessario l'indice dei risarcimenti medi e la corrispondente categoria saranno inferiori.

Per correlare i risultati dell'urto descritto nel paragrafo 3.1 con la classe corrispondente di rischio del veicolo in esame si compila una tabella in cui si riporta la tipologia dei componenti danneggiati con i relativi costi di riparazione e numero di ore necessarie per l'intervento. In base a tali informazioni si determinano gli indici CA e CF e il punteggio da attribuire al veicolo analizzato.

### **Copertura parziale**

Quando non c'è nessun calcolo di risarcimento simile, la classificazione iniziale per la copertura assicurativa parziale è basata su un precedente indice del premio di rischio per un modello analogo calcolato su base statistica. Se non ci sono modelli con dati statistici disponibili, l'indice del premio di rischio si determina tenendo conto, in media, di quelli dello stesso costruttore o di altri.

### **3.2.2 Procedura di riclassificazione**

Le classificazioni sono aggiornate ogni anno sulla base delle statistiche della GDV dell'anno precedente. Per ampliare la base statistica e per tener conto dei fattori di influenza

casuali, i report includono i dati degli ultimi tre anni. Il risultato dell'aggiornamento è pubblicato il primo ottobre di ogni anno.

### Copertura completa

La riclassificazione della copertura completa avviene quando i valori statistici attuali del gruppo di progetto ( $CF_{index}$  e  $CA_{index}$ ) sono aumentati o diminuiti rispetto alla classificazione iniziale o dell'anno precedente e di conseguenza l'indice RP supera i limiti del range (inferiore o superiore). Il  $CA_{index}$  del singolo modello ottenuto col metodo di calcolo del danno è valido solo se vengono prodotte almeno 7300 unità all'anno. Per valutare il  $CF_{index}$  devono essere prodotte almeno 2800 unità all'anno. Se non si dispone di questi valori annuali si utilizza la procedura detta di credibilità in cui il valore degli indici CF e CA è ottenuto come media pesata fra i valori dell'indice di classificazione iniziale e i valori dell'indice statistico secondo la seguente formula:

$$CF_{cred} = CF_{stat} \cdot \sqrt{\frac{AU}{AU_{total}}} + CF_{ic} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{AU}{AU_{total}}}\right),$$

dove:

- $CF_{cred}$  è la credibilità dell'indice di frequenza dei risarcimenti;
- $CF_{stat}$  è l'indice statistico della frequenza dei risarcimenti;
- $CF_{ic}$  è l'indice di frequenza dei risarcimenti della classificazione iniziale;
- $AU$  è il numero di unità annuali del tipo di veicolo;
- $AU_{total}$  è il limite statistico accertato di unità annuali con lo stesso valore di indice corrispondente.

### Copertura parziale

I valori del premio di rischio della classificazione iniziale nella copertura parziale vengono determinati se si producono almeno 8100 unità all'anno. Se il numero di unità prodotte è inferiore si utilizza, anche in questo caso, una procedura di credibilità. La norma [23] fornisce ogni ulteriore dettaglio riguardante le procedure di rating e il punteggio relativo al tipo di classe nel caso di copertura completa o parziale.



## Capitolo 4

# Urto assicuratori: prove sperimentali eseguite

Nell'urto assicuratori si considera la deformazione di un elemento strutturale dell'auto chiamato *puntone della prima linea di carico*. Esso fa parte del pianale inferiore che, assieme all'*upper body*, costituisce la scocca del veicolo (figura 4.1).

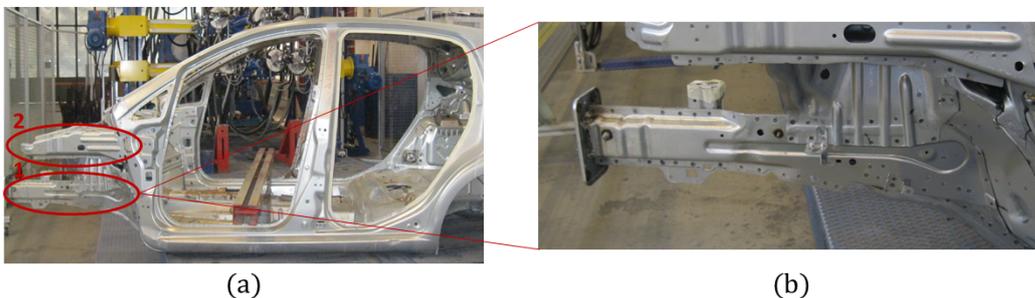


Figura 4.1: Scocca di una vettura, prima linea di carico (cerchio 1), seconda linea di carico (cerchio 2) (a) e puntone della prima linea di carico nel dettaglio (b).

Il puntone della prima linea di carico si collega al longherone mediante un elemento *a collo d'oca* e percorre longitudinalmente la lunghezza del veicolo fino alla parte posteriore. Sui due puntoni della prima linea di carico (destro e sinistro) è montata la traversa *crash box* che è un elemento sacrificale pensato per deformarsi per primo in modo da assorbire la maggior parte dell'energia dovuta all'urto. Sostituire una traversa *crash box* comporta costi di gran lunga inferiori rispetto alla riparazione dei puntoni stessi. È stata eseguita la scansione del puntone prima e dopo l'urto di tre veicoli, due dello stesso modello (modello 1) e il terzo di un modello differente (modello 2), in tre prove successive. Con il software è stato possibile allineare le mesh realizzate dalle serie di misure ottenute e calcolare la mappa cromatica degli spostamenti.

## 4.1 Modello 1

Sono state effettuate due prove di urto assicuratori su due veicoli diversi dello stesso modello per la verifica di diverse soluzioni tecniche.

### 4.1.1 Prima prova

Si è assunto che a seguito della prova di urto frontale descritta nel paragrafo 3.1.1 il montante "A" (cerchiato in figura 4.2) sia rimasto indeformato, in modo da consentire l'allineamento fra le scansioni precedente e successiva all'urto attraverso tale porzione della scocca. Si sono posizionati i marker come rappresentato in figura 4.2. La scansione è iniziata dal montante "A" procedendo verso il puntone.



Figura 4.2: Posizionamento dei marker sul primo veicolo (modello 1) a partire dal montante "A", cerchiato in rosso.

In figura 4.3 sono riportati il puntone reale e il corrispondente modello CAD acquisito con lo scanner prima della prova.

La parte posteriore alla flangia del puntone è difficilmente accessibile otticamente dalle telecamere dello scanner, perciò l'acquisizione ottenuta non è ottimale (figura 4.4).

In figura 4.5 è rappresentato il veicolo reale dopo l'urto a confronto con il risultato della scansione.

Le scansioni sono classificate dal software come *Serie di misure*. Esse vengono trasformate in *mesh effettiva*. La mesh creata è composta da elementi triangolari ed è riportata in figura 4.6.

Si può regolare la dimensione degli elementi che compongono la mesh rendendola più o meno dettagliata. Una volta ottenute le mesh della porzione di veicolo in esame, prima e dopo la prova, se ne trasforma una delle due in modello CAD. Nel nostro caso si è scelto, arbitrariamente, come modello CAD di riferimento quello ottenuto dalla scansione del pezzo indeformato, precedente all'urto (figura 4.3). La scansione

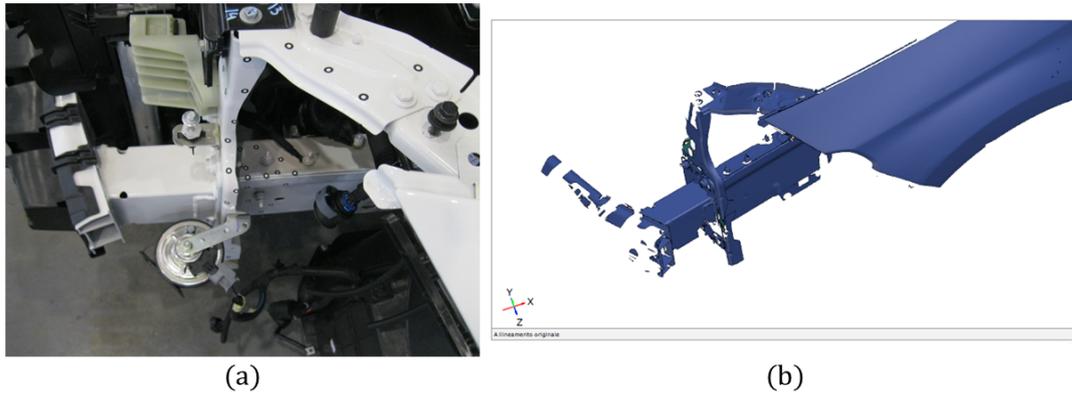


Figura 4.3: Immagine del puntone reale (a) e acquisizione eseguita dallo scanner prima della prova (b).

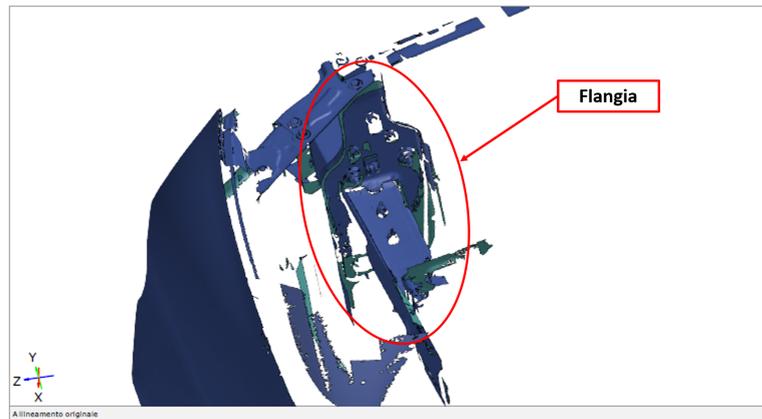


Figura 4.4: Parte posteriore della flangia del puntone.

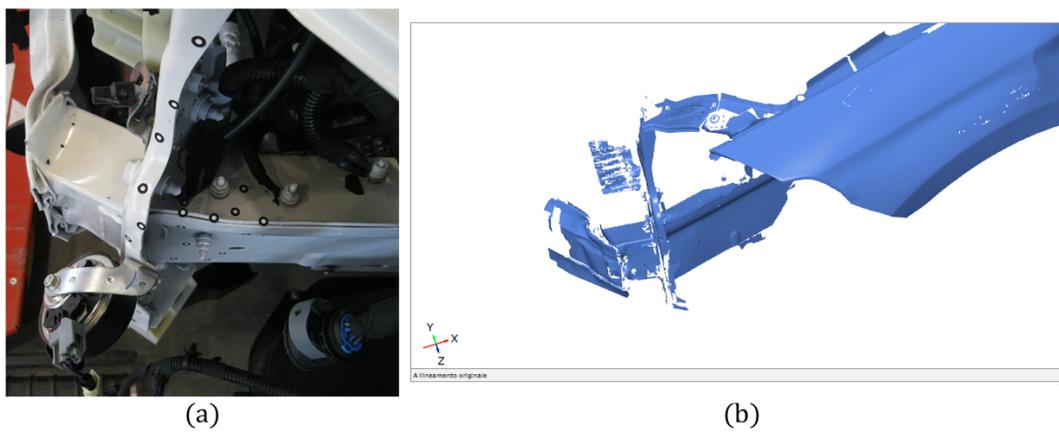


Figura 4.5: Confronto tra il puntone reale (a) e l'acquisizione eseguita dallo scanner dopo l'urto (b).

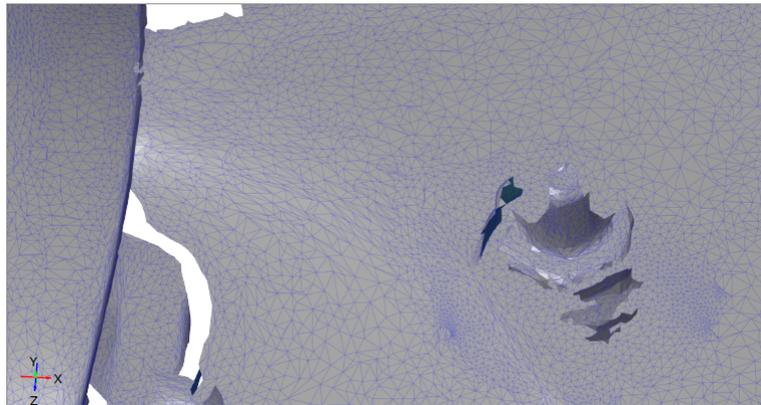


Figura 4.6: Elementi di mesh triangolari.

successiva all'urto viene esportata sotto forma di mesh, in formato STL e importata nello stesso ambiente di lavoro dov'è presente il modello CAD.

### Qualità dell'allineamento

Una volta importata, la mesh non risulta allineata al modello CAD, perciò si è proceduto in modo iterativo utilizzando i diversi metodi di allineamento disponibili nel software. Inizialmente si è provato ad allineare le scansioni utilizzando la funzione di *Preallineamento*. Per la vettura in esame (Modello 1), con tale funzione si è ottenuto un allineamento corretto rispetto al montante "A" rimasto indeformato a seguito della prova. La qualità dell'allineamento si può verificare eseguendo il *Confronto di superficie sull'effettivo* solamente sul montante "A" (figura 4.7). In questa zona lo spostamento risultante tra prima e dopo la prova è nulla (appare, infatti, in verde).

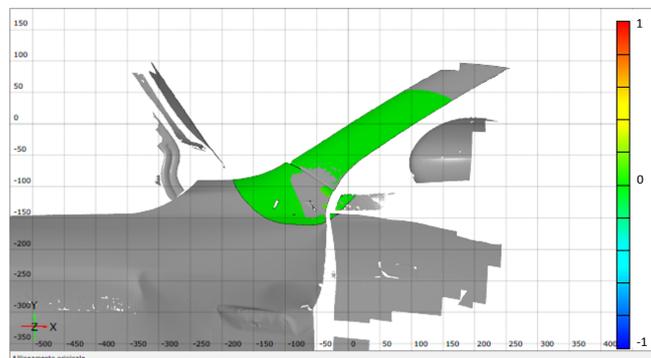


Figura 4.7: Analisi degli spostamenti sul montante "A" per la verifica della qualità dell'allineamento.

### Analisi degli spostamenti

Verificata la correttezza dell'allineamento, si sono confrontate la superficie nominale di riferimento, ovvero il modello CAD della scansione del pezzo indeformato, con la mesh effettiva del pezzo deformato a seguito dell'urto. Nel caso in esame si è utilizzata la funzione per ottenere il confronto di superficie sull'effettivo (vedere paragrafo 2.2.2). Con questo metodo si ottiene la mappa colore direttamente sul pezzo deformato. Il risultato dell'analisi per la prima vettura esaminata (Modello I) è riportato in figura 4.8.

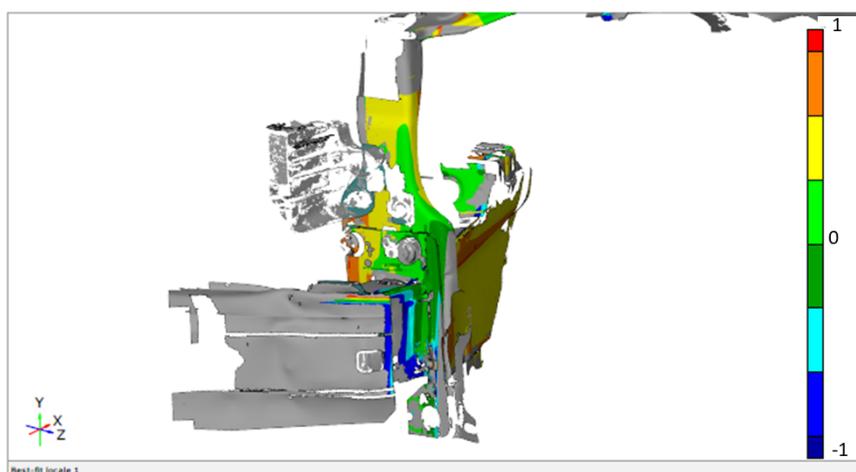


Figura 4.8: Spostamenti lungo l'asse x, longitudinale rispetto al puntone, risultanti dal confronto tra elemento nominale indeformato e deformato.

Si può osservare che le deviazioni significative conseguenti all'urto interessano solo il puntone. Il parafrangente non essendo rilevante ai fini dell'analisi, ma utile per l'allineamento delle scansioni, non è stato considerato e non compare nell'immagine. Il componente di interesse è il puntone: esso si deforma in modo apprezzabile e la flangia ha ruotato in senso orario attorno all'asse y. La mappa fornisce dei risultati accurati lungo l'asse x, direzione dove si concentra la maggior parte dello spostamento. La parte più interna della flangia si sposta positivamente in direzione coerente con quella dell'urto di 0,71. Lo spostamento della porzione visibile della traversa *crash box* è un risultato atteso perché si tratta di un componente sacrificale fissato al puntone con la funzione di assorbire l'energia dell'urto e deformarsi al posto di esso. Per tale ragione è stata trascurata ai fini del calcolo dei risultati.

La parte posteriore della flangia appare frastagliata a causa della sua posizione poco visibile otticamente dallo scanner. Di conseguenza gli spostamenti calcolati non sono affidabili. Il software consente di rappresentare le deviazioni dell'oggetto, rispetto al modello di riferimento, in modo continuo per tutti i punti acquisiti. Se non viene trovata corrispondenza tra le scansioni in alcune regioni il software non riesce a determinare le deviazioni e la zona interessata appare di colore grigio. A causa delle imperfezioni

nelle superfici acquisite, se gli spostamenti subiti dal componente sono significativi (dell'ordine delle decine di mm) il software in tali zone dà risultati poco affidabili in termini di deviazioni dal modello nominale.

#### 4.1.2 Seconda prova

È stata eseguita la prova descritta nella sezione precedente su una seconda vettura dello stesso modello (Modello 1). Per tale veicolo è stato provocato sia l'impatto frontale che quello posteriore secondo la procedura riportata nel paragrafo 3.1.2. Nel caso dell'urto posteriore la scansione è partita dal parafrangente posteriore del lato di impatto perché era presumibile che questo restasse indeformato a seguito della prova. Ciò ha permesso di sfruttarlo per l'allineamento delle due acquisizioni.

In figura 4.9 si vede la parte frontale del veicolo pronto per la scansione dopo il posizionamento dei marker.



Figura 4.9: Configurazione della parte frontale del secondo veicolo (Modello 1) prima della prova.

In figura 4.10 si vede la parte posteriore del veicolo preparato per la scansione dopo il posizionamento dei marker.

In figura 4.10a è rappresentato il parafrangente posteriore utilizzato come riferimento per l'allineamento delle scansioni in quanto prevedibilmente indeformato dopo la prova. È stato utilizzato lo stesso veicolo sia per l'impatto frontale che per quello posteriore. Dopo l'esecuzione di quest'ultimo sono prevedibili deformazioni nella zona della dorsale posteriore cerchiata in rosso nella figura 4.10b e sul pavimento del bagagliaio, in particolare nella vasca per la ruota di scorta. Dopo l'impatto frontale, invece, sono prevedibili deformazioni del puntone (figura 4.9b), come descritto nella prova precedente. Sono state eseguite scansioni della parte frontale e posteriore del veicolo prima (figure 4.11b e 4.13b) e dopo l'urto (figure 4.12b e 4.14b). Per acquisire le immagini relative al portabagagli lo scanner è stato posizionato al suo interno (figura 4.13a). Ciò dimostra che lo strumento è molto versatile e riesce ad inserirsi in modo adeguato in diversi



Figura 4.10: Configurazione della parte posteriore del secondo veicolo (Modello 1) prima della prova.

setup sperimentali, sia in ambienti grandi e facilmente accessibili, sia all'interno di spazi più ristretti e meno raggiungibili da un sistema di misura fisso esterno.

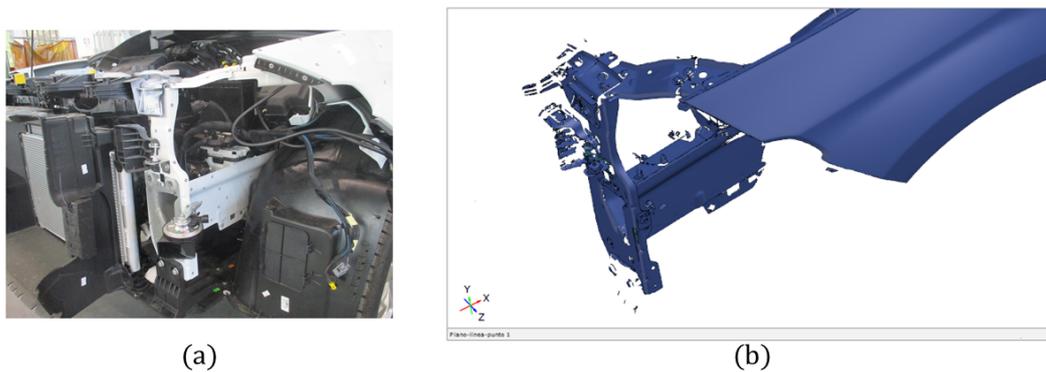


Figura 4.11: Confronto tra la foto reale (a) della parte frontale del veicolo e la scansione eseguita con lo scanner (b) *prima* dell'urto.

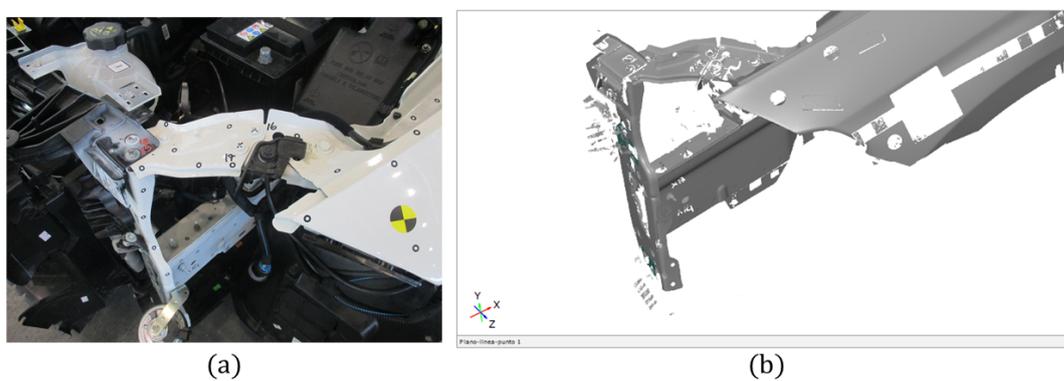


Figura 4.12: Confronto tra la foto reale (a) della parte frontale del veicolo e la scansione eseguita con lo scanner (b) *dopo* l'urto.

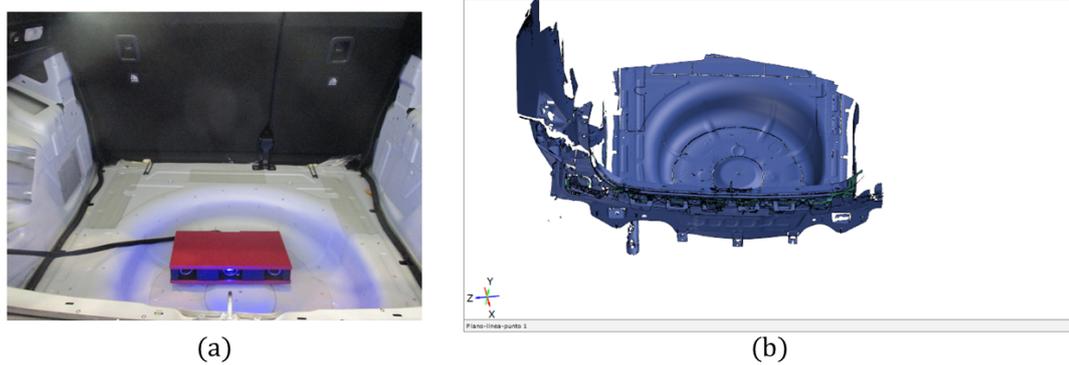


Figura 4.13: Confronto tra la foto reale (a) della parte posteriore del veicolo e la scansione eseguita con lo scanner (b) *prima* dell'urto.

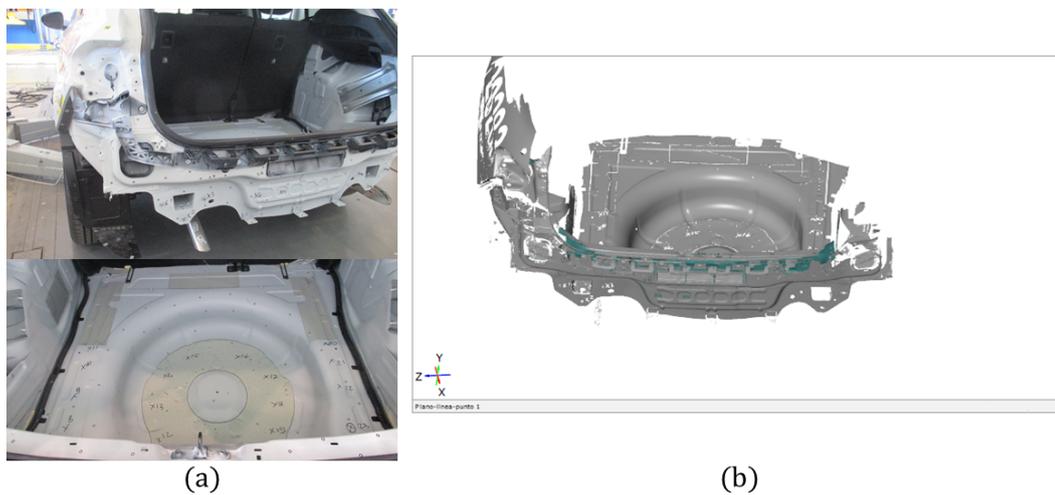


Figura 4.14: Confronto tra la foto reale (a) della parte posteriore (dorsale e pavimento del bagagliaio) del veicolo e la scansione eseguita con lo scanner (b) *dopo* l'urto.

Le scansioni precedenti alla prova vengono trasformate da *serie di misure* a *mesh effettive* e da *mesh effettive* in modelli CAD (figure 4.11b e 4.13b). I modelli CAD rappresentano gli *elementi nominali* rispetto ai quali si effettua il confronto dei componenti deformati. Nelle figure 4.12b e 4.14b sono riportate le scansioni successive agli urti trasformate in mesh effettive.

### Qualità dell'allineamento

È stato effettuato l'allineamento della *mesh effettiva* rispetto al modello CAD: per il puntone è stato utilizzato il montante "A" e per verificarne la correttezza è stata eseguita l'analisi delle deviazioni in quella zona. In figura 4.15a si rileva che non risultano deviazioni tra la scansione precedente alla prova e quella successiva. La deviazione nulla è contrassegnata con il colore verde.

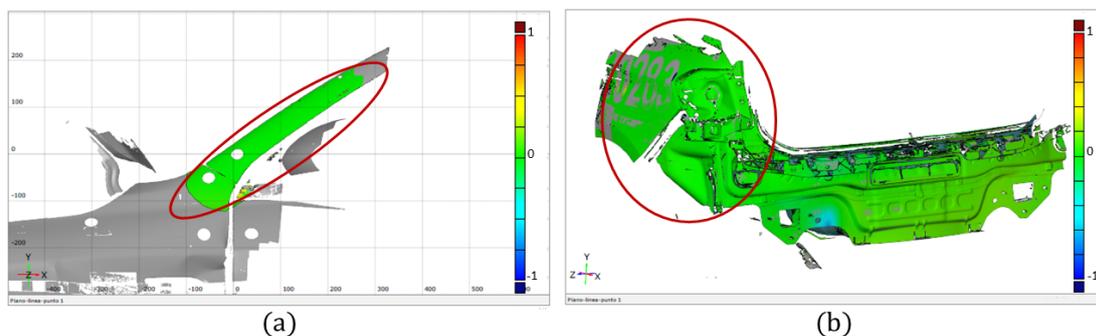


Figura 4.15: Analisi delle deviazioni sul montante "A" (a) e sul parafrangente posteriore (b) per la verifica della qualità dell'allineamento.

Per l'allineamento della zona posteriore si è fatto riferimento al parafrangente verificando che gli spostamenti fossero nulli, ovvero che ci fosse corrispondenza tra la scansione precedente all'urto e quella successiva in quella porzione. A conferma del corretto allineamento, in figura 4.15b la porzione del parafrangente utilizzata come riferimento appare di colore verde.

### Analisi degli spostamenti

Dopo la verifica della qualità dell'allineamento, è stata utilizzata la funzione di confronto superficiale rispetto all'elemento effettivo per visualizzare le deviazioni sul modello deformato (analogamente a quanto descritto per la prima prova). A differenza della prima prova effettuata, per l'analisi e la scansione del puntone è stata rimossa la traversa frontale. Confrontando le figure 4.5b e 4.12b si rileva che nella seconda prova la deformazione del puntone è meno evidente. Ciò è confermato osservando la mappa cromatica risultante dall'analisi delle deviazioni del puntone (figura 4.16).

La porzione più interna della flangia del puntone della prima linea di carico ha subito uno spostamento positivo lungo l'asse x di 0,40 che è risultato inferiore al corrispondente valore nella prima prova eseguita sullo stesso Modello 1 (figura 4.8) e si riduce gradualmente verso la parte esterna (ovvero la destra) della flangia. Sulla parte posteriore del veicolo, sono state ottenute deformazioni coerenti con quelle attese. In figura 4.17a è stata evidenziata nel cerchio in rosso lo spostamento subito dalla dorsale posteriore in corrispondenza del punto di impatto, negativo lungo la direzione x e

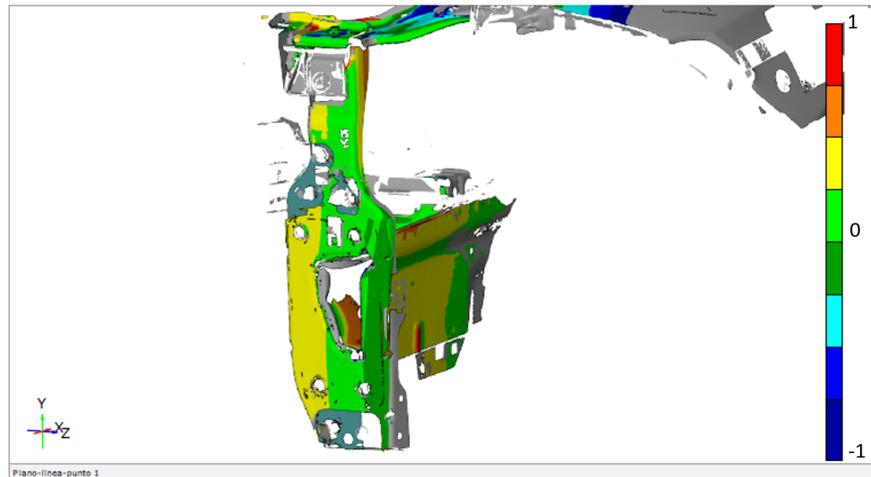


Figura 4.16: Analisi delle deviazioni lungo l'asse x longitudinale al puntone, risultante dal confronto tra la scansione precedente all'urto e quella successiva.

dell'ordine di qualche mm. In figura 4.17b è riportata la mappa cromatica delle deviazioni sul pavimento del bagagliaio. Nelle zone cerchiato in rosso sono state evidenziate delle fessurazioni sul pavimento dovute all'urto. All'interno della vasca della ruota di scorta si rilevano deviazioni negative dell'ordine di qualche mm, compatibili con la dinamica dell'urto. I picchi di spostamento sui bordi più esterni in figura 4.17b, inesistenti nella realtà, potrebbero attribuirsi ad errori del software. In entrambe le prove eseguite sul Modello 1, le deviazioni rispetto alla geometria CAD osservate lungo la direzione x sono coerenti con gli spostamenti reali rilevati.

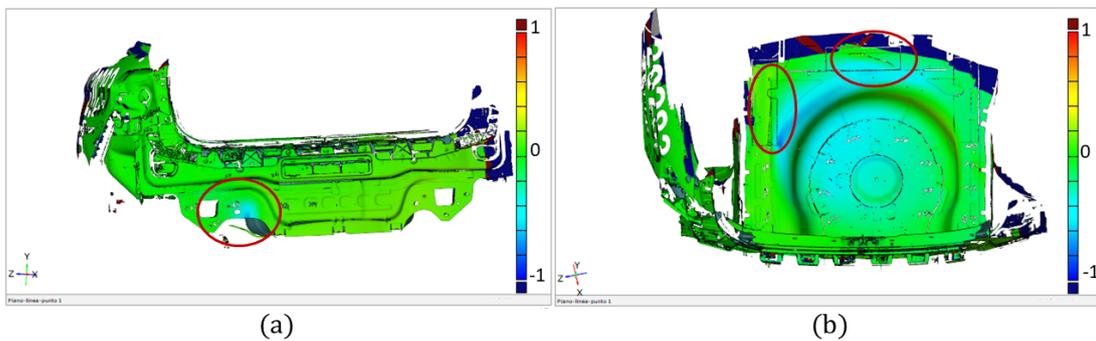


Figura 4.17: Analisi delle deviazioni risultanti a seguito della prova della dorsale posteriore (a) e della vasca del portabagagli (b).

## 4.2 Modello 2

La prova a bassa velocità frontale descritta nel paragrafo 3.1.1 è stata ripetuta su un veicolo di Modello 2. Sul veicolo in questione si considerano il puntone della prima linea

di carico e il puntone della terza linea di carico posto in basso (figura 4.18). Il puntone della terza linea di carico non è presente in tutti i modelli di vetture e a differenza dei puntoni della prima e della seconda linea (cerchio 2 in figura 4.1a) è avvitato al telaio del veicolo e non è parte della scocca.

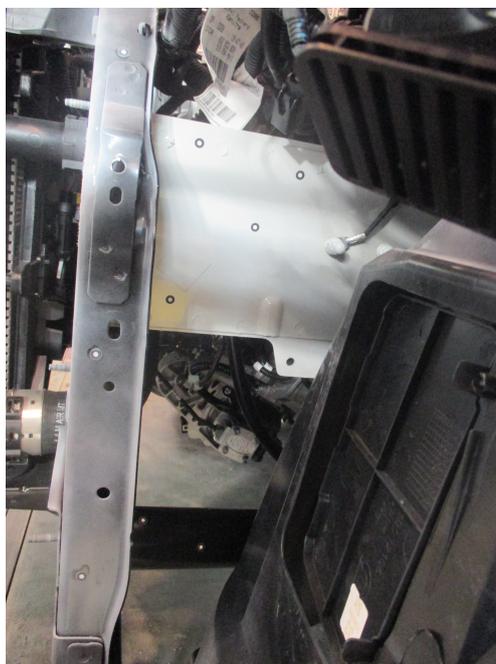


Figura 4.18: Puntone della prima linea di carico (bianco) e puntone della terza linea di carico (nero).

In questo caso, a differenza del Modello 1, l'accessibilità dello scanner ai due puntoni è molto più ridotta per la presenza del parafrangente e di una serie di cavi che non è stato possibile rimuovere. Pertanto non si è riusciti ad ottenere una scansione soddisfacente della parte posteriore della flangia e dei due puntoni. La superficie posteriore della flangia manca del tutto, perciò l'analisi dei risultati riguarda solo la sua parte anteriore. La traversa della prima linea di carico non è presente sulla vettura. Anche in questo caso la scansione parte dal montante "A" del veicolo e tramite il piccolo puntone della seconda linea di carico e il parafrangente si ricongiunge alla flangia del puntone della prima linea di carico. In figura 4.19 si vede la vettura reale preparata per la scansione: i marker adesivi sono posizionati sulla superficie del montante, dal parafrangente (a) fino ad arrivare alla flangia del puntone della prima linea di carico (b) passando anche per il puntone della seconda linea di carico.

Una volta posizionati i marker è stata eseguita la scansione con *ATOS Core 500* ottenendo il modello riportato in figura 4.20.

È stata eseguita la prova di urto a bassa velocità descritta nel paragrafo 3.1.1 ed è stata ripetuta la scansione degli stessi elementi osservati precedentemente. In figura 4.21 è riportato il confronto tra il veicolo reale e il risultato della scansione del parafrangente



Figura 4.19: Posizionamento dei marker adesivi dal montante "A", passando sul parafrango (a) e arrivando alla flangia frontale del puntone della prima e della terza linea di carico (b).

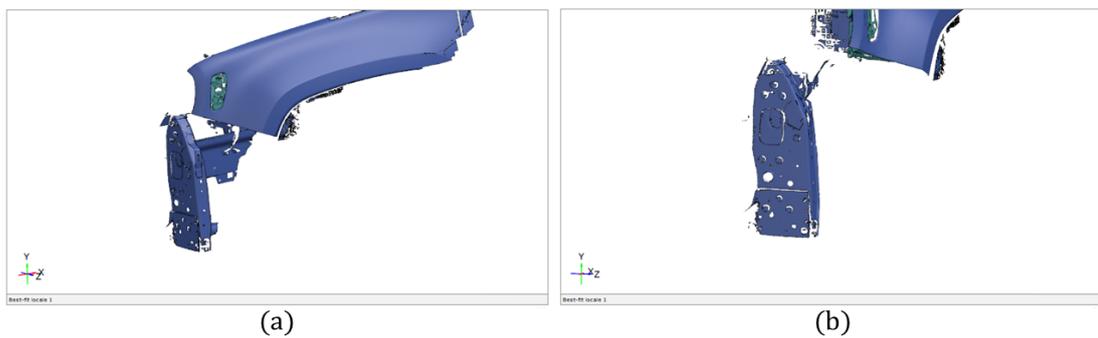


Figura 4.20: Risultato dell'acquisizione del parafrango e del puntone in (a) e dettaglio della flangia del puntone della prima linea di carico in (b).

e della parte laterale del puntone della prima linea di carico dopo la prova. In figura 4.22 la foto della flangia del puntone a confronto con l'immagine acquisita.

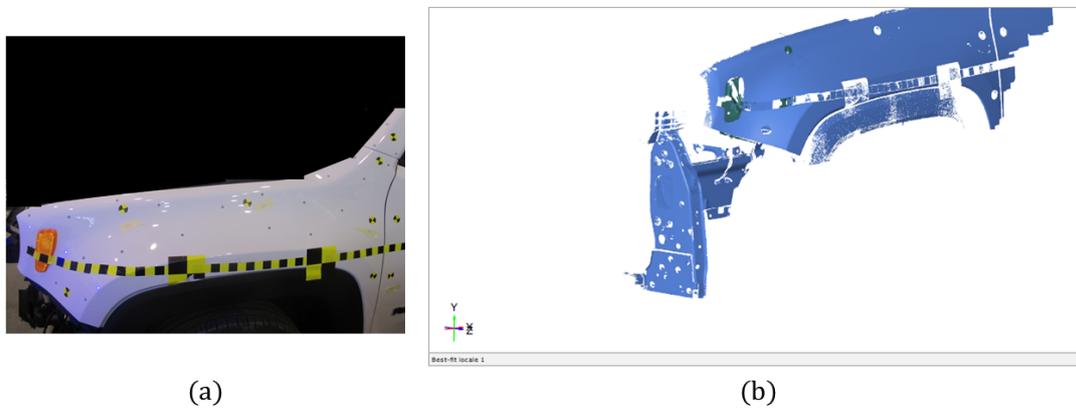


Figura 4.21: Confronto tra la foto reale del parafrangente e della parte laterale del puntone (a) e l'acquisizione ottenuta con *ATOS Core 500* (b).

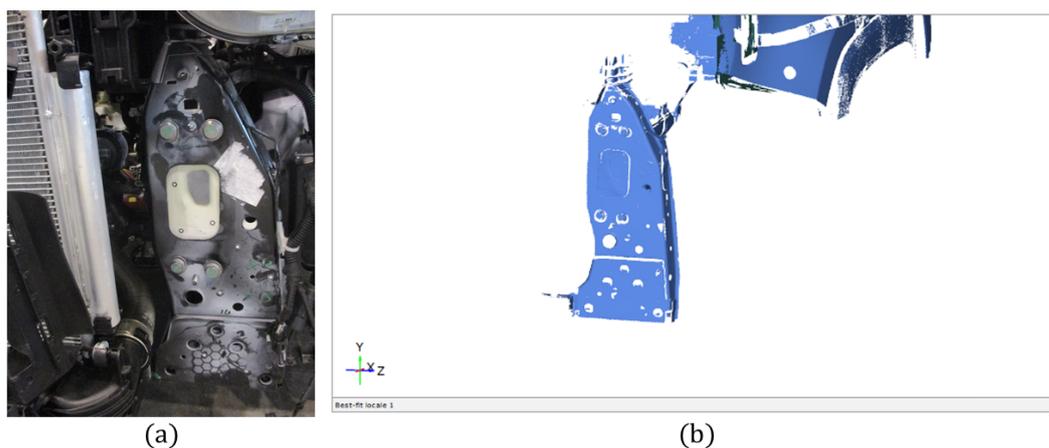


Figura 4.22: Confronto tra la foto reale della parte anteriore della flangia del puntone della prima linea di carico (a) e l'acquisizione ottenuta con *ATOS Core 500* (b).

Una volta ottenute le scansioni precedenti e successive alla prova si trasforma quella della vettura prima della prova in modello CAD e quella della vettura dopo la prova in *mesh effettiva* sovrapponendole, allineandole e salvandole in un unico file.

### Qualità dell'allineamento

L'allineamento è stato eseguito in modo iterativo utilizzando il metodo "Piano-linea-punto" con la seguente sequenza di comandi:

**OPERAZIONI → Allineamento → Allineamento principale → Piano-linea-punto.**

Per poter utilizzare questa procedura occorre definire un piano, una linea e un punto

sia sulla mesh effettiva che sul modello CAD. Una volta costruiti tali elementi si indicano nella finestra di dialogo le corrispondenze tra le entità create. È conveniente costruire gli elementi richiesti su zone facilmente individuabili approssimativamente sul modello CAD e sulla mesh, per esempio lungo un bordo o in corrispondenza di un particolare geometrico. La qualità dell'allineamento è inizialmente grossolana, perciò è stata migliorata mediante la modalità per *best-fit* in corrispondenza del montante "A". Per verificare la qualità ottenuta è stata effettuata l'analisi delle deviazioni rispetto al modello CAD nella zona corrispondente al montante "A" che negli urti assicuratori a bassa velocità resta indeformato. La mappa cromatica risultante è riportata in figura 4.23.

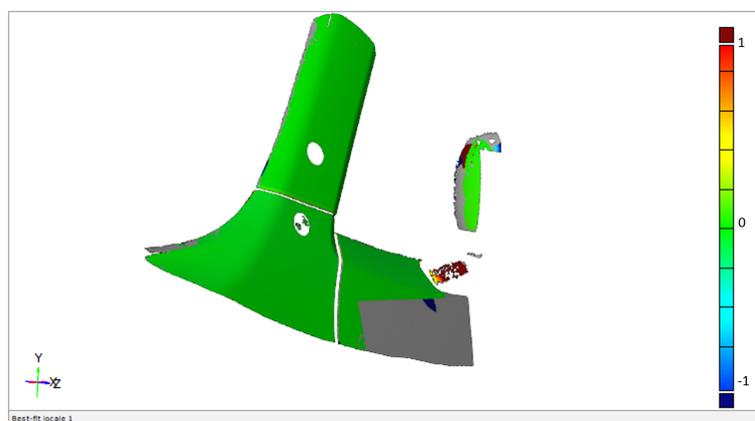


Figura 4.23: Analisi delle deviazioni rispetto al modello CAD del montante "A" della vettura per la verifica della qualità dell'allineamento.

Gli spostamenti sul montante "A" sono nulli perciò l'allineamento ottenuto è corretto.

### Analisi degli spostamenti

Sono state misurate le deviazioni sulla parte anteriore della flangia del puntone della prima linea di carico ottenendo la mappa cromatica in figura 4.24.



Figura 4.24: Mappa cromatica delle deviazioni lungo l'asse x provocate dall'urto sulla parte anteriore della flangia del puntone della prima linea di carico e sul *vertical link*.

La deviazione è approssimativamente nulla lungo l'asse x verso la parte posteriore del veicolo. A seguito della prova il puntone non si è deformato in modo significativo. Sulla flangia del puntone è avvitato un elemento chiamato *vertical link*.

Per ottenere una scansione più accurata del puntone e della parte posteriore della flangia per l'analisi degli spostamenti occorre che i componenti da scansionare siano accessibili otticamente alle telecamere dello strumento.



## Capitolo 5

# Procedure operative per l'urto pedone

Lo scanner *ATOS Core 500* trova applicazione anche nelle prove di urto pedone che si svolgono all'interno di un laboratorio apposito secondo la norma ECE R. 127 [3] e la "Pedestrian testing protocol" [4] di European New Car Assessment Program (Euro NCAP).

### 5.1 Modelli di segmenti corporei impattanti

Le prove prevedono l'impatto contro la vettura di tre segmenti corporei (figura 5.1):

1. testa (*headform*);
2. bacino (*upper legform*);
3. gamba (*lower legform*).

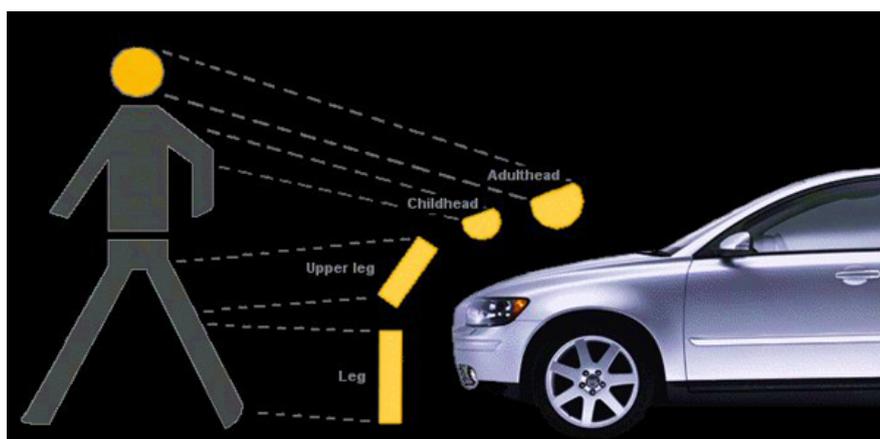


Figura 5.1: Corrispondenza tra impattori Euro NCAP e segmenti corporei [24].

Gli impattori (elementi impattanti) utilizzati nelle prove hanno caratteristiche definite in "Annex 4" nelle norme [3] e [25].

### 5.1.1 Impattore testa

La normativa prevede due tipi di impattori testa: per bambino e per adulto. Nella tabella 5.1 sono descritte le caratteristiche dei due impattori (figura 5.2) che differiscono solo per la massa.

Tabella 5.1: Caratteristiche dell'impattore testa bambino e adulto ("Annex 4", paragrafo 5 di [3]).

|                  | Child  | Adult        |
|------------------|--|--------------|
| <b>Materiale</b> | Alluminio  |              |
| <b>Forma</b>     | Sferica  |              |
| <b>Diametro</b>  | 165 ± 1 mm   |              |
| <b>Massa</b>     | 3,5 ± 0,07 kg  | 4,5 ± 0,1 kg |
| <b>Sensori</b>   | 1 accelerometro triassiale/ 3 accelerometri uniassiali |              |

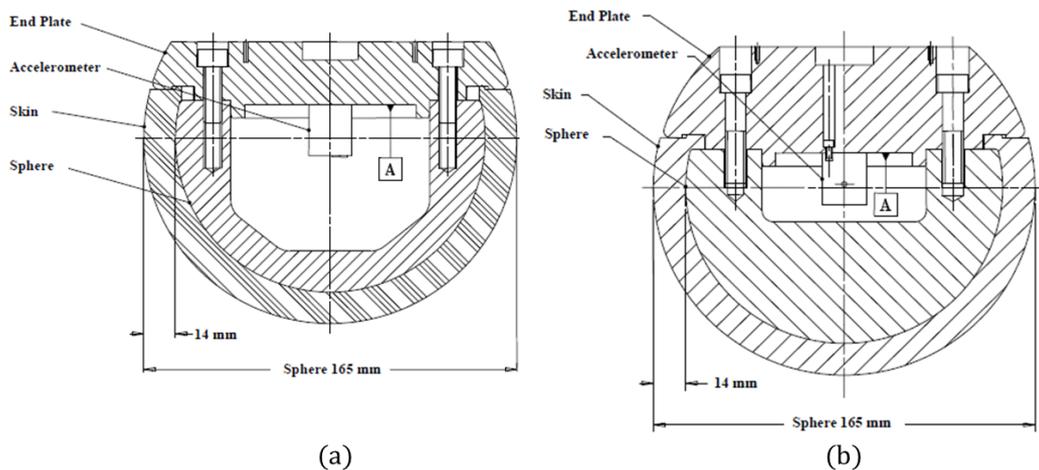


Figura 5.2: Impattore testa child (a), impattore testa adult (b) ("Annex 4", paragrafo 5 di [3]).

Dal confronto delle figure 5.2 a e b si rileva che la forma è pressoché sferica variando la dimensione della cavità interna che influisce sulla massa del dispositivo.

### 5.1.2 Impattore bacino

L'impattore bacino è costituito da un tubolare metallico munito di un rivestimento imbottito in schiuma a memoria di forma (che simula la massa muscolare) rivestita da uno strato in gomma (che simula la pelle) fissato ad un supporto rigido posteriore. Le dimensioni sono riportate in figura 5.3 e la massa totale è pari a 9,5 ± 0,1 kg. Sull'elemento tubolare sono posizionati i trasduttori di forza e gli estensimetri. Per i

test su paraurti il dispositivo garantisce che il movimento avvenga solo nella direzione di impatto prefissata che rimane invariata anche dopo il contatto.

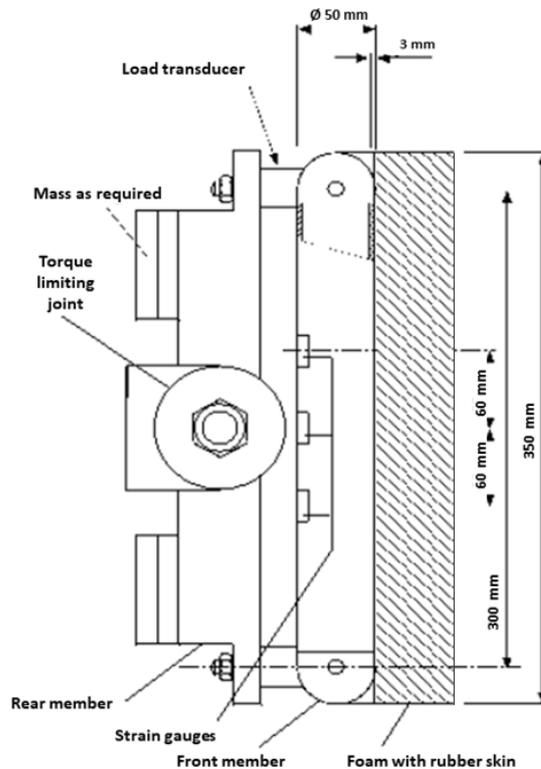


Figura 5.3: Impattore bacino ("Annex 4", paragrafi 3-4 di [3]).

Gli estensimetri rilevano la deformazione della parte posteriore dell'elemento tubolare da cui è possibile risalire al momento agente sull'impattore. Inoltre due celle di carico misurano le forze applicate a ciascuna estremità dell'impattore ("Annex 4", paragrafo 4 di [3]).

Facendo riferimento alle figure 5.1 e 5.3 si osserva che l'elemento tubolare anteriore simula il femore, ma l'articolazione dell'anca non viene considerata.

### 5.1.3 Impattore gamba di tipo TRL

L'impattore gamba di tipo TRL (Transportation Research Lab) è costituito da due segmenti rigidi, uno rappresenta il femore, l'altro la tibia, articolati tra loro con un giunto che simula il ginocchio. Le dimensioni sono rappresentate in figura 5.4 e la massa è pari a  $13,4 \pm 0,2 \text{ kg}$ . Tale impattore è usato solamente nelle prove previste dalla normativa ECE R. 127 e non viene più usato nelle prove Euro NCAP. Entrambi i segmenti sono rivestiti da uno strato imbottito in schiuma a memoria di forma rivestita da uno strato in neoprene. Anche in questo caso i materiali simulano la massa muscolare e la pelle. Sul lato della tibia non soggetto all'impatto è montato un accelerometro

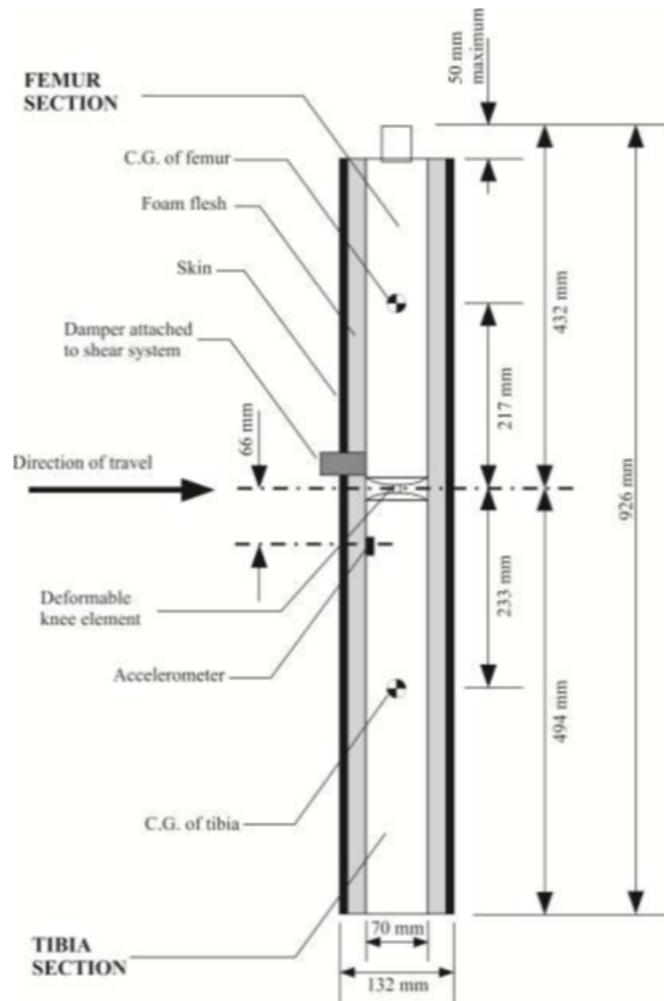


Figura 5.4: Impattore gamba TRL ("Annex 4", paragrafi 1-2 di [3]).

uniassiale con uno smorzatore che limita e previene le vibrazioni eccessive. Vi sono anche due potenziometri per misurare la flessione e il taglio sul ginocchio.

### 5.1.4 Impattore gamba di tipo FlexPLI

In una versione successiva, la norma ha introdotto un nuovo tipo di impattore gamba *flessibile* ("Annex 4", paragrafi 1-2 di [25]). Esso simula la carne, la pelle e i segmenti flessibili delle ossa lunghe (femore e tibia) e l'articolazione del ginocchio (figura 5.5).

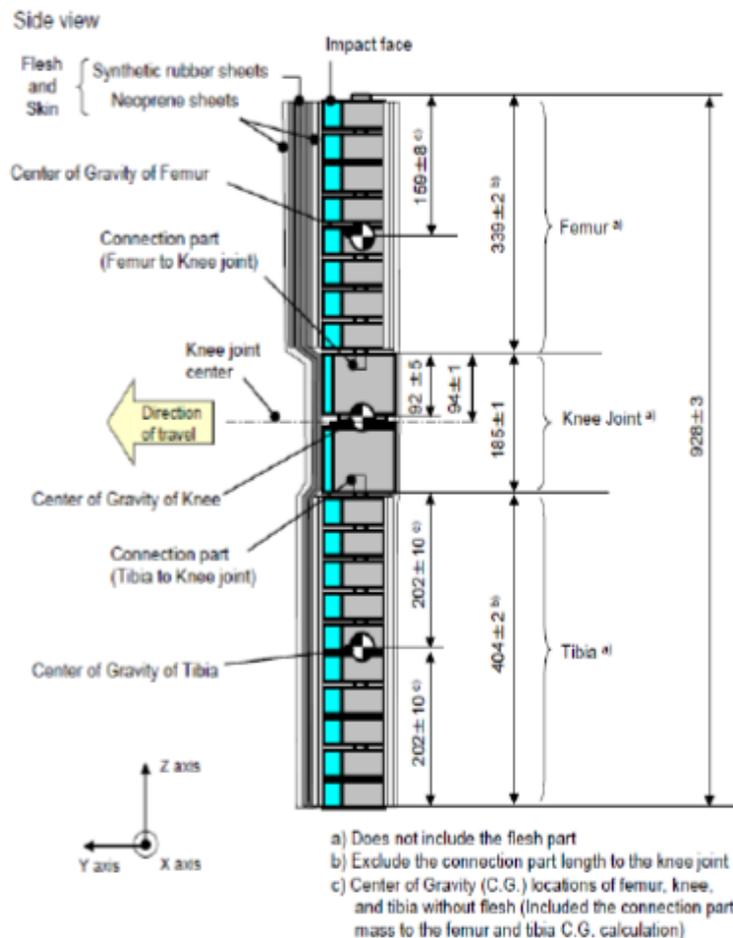


Figura 5.5: Impattore gamba FlexPLI ("Annex 4", paragrafi 1-2 di [25]).

La massa totale di questo impattore è pari a  $13,2 \pm 0,4$  kg. Sulla tibia sono installati quattro trasduttori per misurare il momento flettente, mentre sul femore ne sono installati tre. Nell'articolazione di ginocchio sono posizionati tre estensimetri per misurare l'elongazione rispettivamente del Legamento Mediale Collaterale (MCL), del Legamento Crociato Anteriore (ACL) e del Legamento Crociato Posteriore (PCL) rappresentati in figura 5.6.

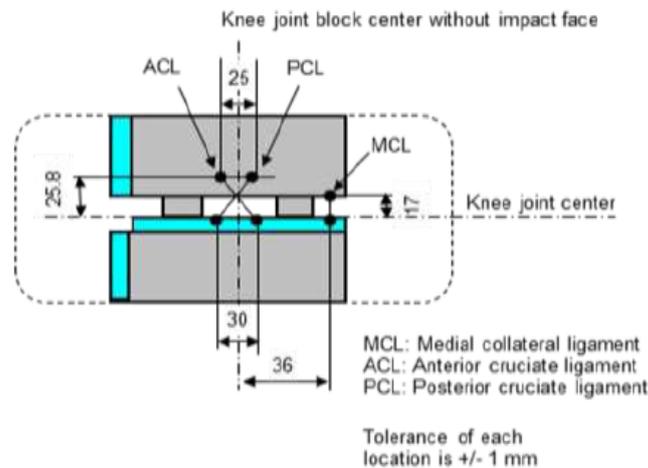


Figura 5.6: Dettagli sulla rappresentazione dei legamenti nel modello di ginocchio dell'impattore gamba FlexPLI ("Annex 4", paragrafi 1-2 di [25]).

### 5.1.5 Confronto tra impattore di tipo TRL e di tipo FlexPLI

In figura 5.7 è riportato il confronto tra i due modelli di impattore del segmento gamba. In particolare si osserva che l'impattore FlexPLI è più biofedele di quello di tipo TRL. In quest'ultimo il femore e la tibia sono rappresentati da due segmenti rigidi articolati tra loro con delle piastre in acciaio che semplificano l'articolazione di ginocchio. Nell'impattore FlexPLI invece il femore e la tibia sono rappresentati da segmenti flessibili come l'osso umano. Nel modello del ginocchio sono ricreati i legamenti dell'articolazione (legamento mediale collaterale, crociato anteriore e posteriore e laterale collaterale).

Relativamente alla strumentazione dei due impattori, in figura 5.8 sono rappresentati tutti i sensori presenti e nei riquadri in rosso sono evidenziati i criteri di lesione, ovvero i dati dei sensori attraverso i quali si valuta la validità della prova.

Per il modello TRL si valutano due parametri caratteristici del ginocchio (spostamento relativo allo sforzo di taglio del ginocchio e l'angolo di flessione) e un parametro relativo all'estremità superiore della tibia (l'accelerazione). Il resto dell'impattore non è strumentato. Invece nel caso del modello FlexPLI si valutano le elongazioni di tre legamenti del ginocchio (ACL, PCL e MCL) e quattro diversi momenti flettenti in punti situati a diverse quote sulla tibia. Vengono rilevati anche dati sul femore e sul legamento LCL del ginocchio che però non rientrano nei criteri di lesione per la gamba.

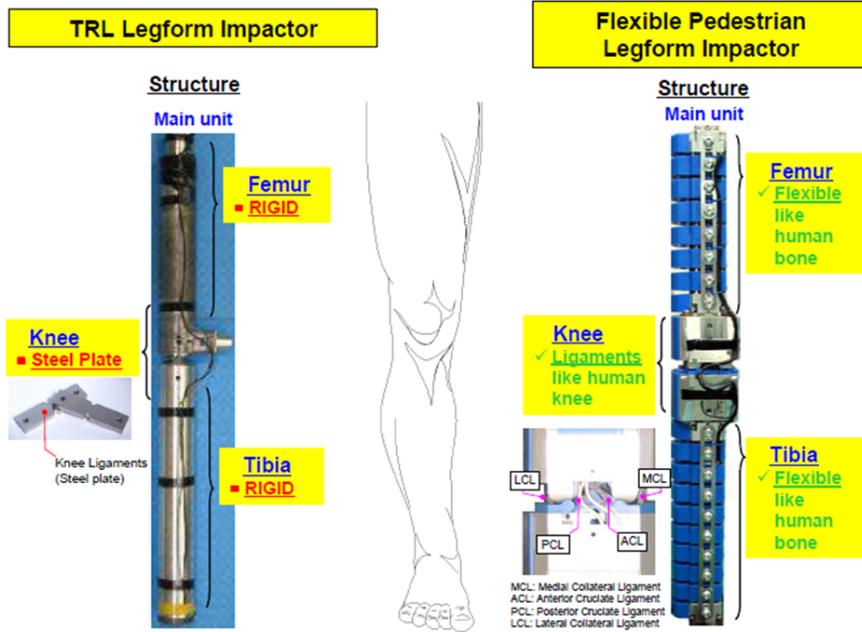


Figura 5.7: Confronto tra l'impattore gamba TRL e il FlexPLI [26].

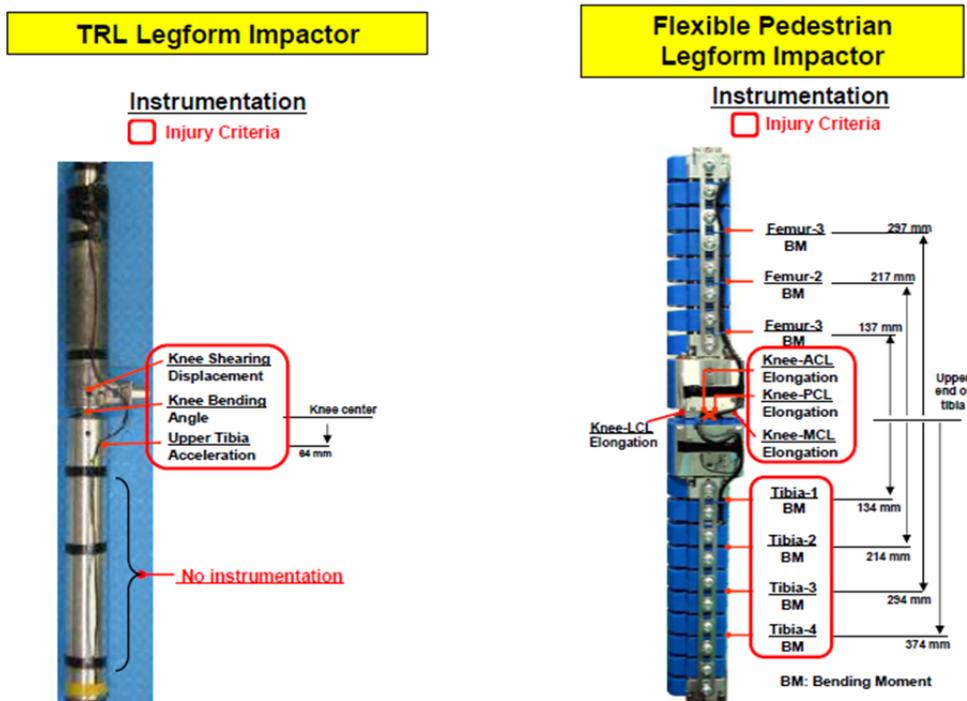


Figura 5.8: Confronto tra l'impattore gamba TRL e il FlexPLI [26].

## 5.2 Tracciatura del veicolo

Secondo la normativa definita da Euro NCAP per la valutazione degli urti di testa, bacino e gamba sul cofano e sul paraurti della vettura bisogna tracciare i punti per definire le aree di impatto [4]. I principali elementi che definiscono le aree di impatto sono elencati di seguito:

- Bonnet Side Reference Line (BSRL) (figura 5.9b);
- Bonnet Leading Edge Reference Line (BLERL) (figura 5.10b);
- Wrap Around Distance (WAD) (figura 5.9);
- Corner Reference Point (CRP) (figura 5.10b);
- Internal Bumper Reference Line (IBRL) (figura 5.10b).

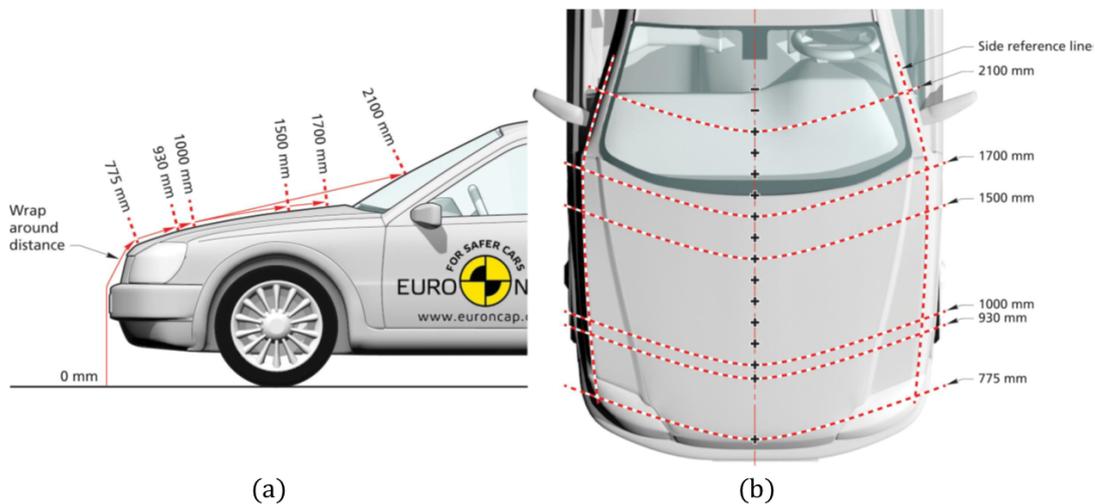


Figura 5.9: Tracciatura della Bonnet Side Reference Line (b) e delle Wrap Around Distance (a, b) (paragrafi 3.5.3 e 3.5.8 di [4]).

In figura 5.10a è rappresentata una griglia in cui si distinguono l'area di impatto testa bambino e l'area di impatto testa adulto. I punti caratteristici dell'area bambino sono identificati dalla lettera C, quelli dell'area adulto dalla lettera A. La prima coordinata indica la riga, la seconda la colonna. Le righe si cominciano a contare dalla WAD 1000, le colonne dalla *centerline*. A destra della *centerline* hanno valore negativo, a sinistra positivo. In figura 5.10b è riportata l'area di impatto bacino, i cui punti sono contrassegnati dalla lettera U (*upper legform impact area*) e l'area di impatto della gamba, i cui punti sono contrassegnati dalla lettera L (*lower legform impact area*). Il sistema di riferimento definito rispetto al veicolo è riportato in figura 5.11.

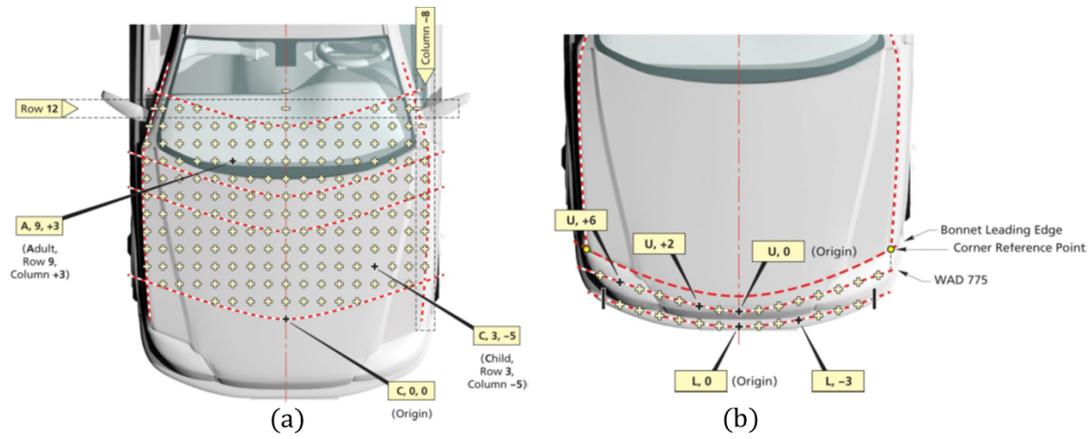


Figura 5.10: Tracciatura delle aree di impatto testa (a) e gamba (b) (paragrafi 3.9.4 e 3.13.5 di [4]).

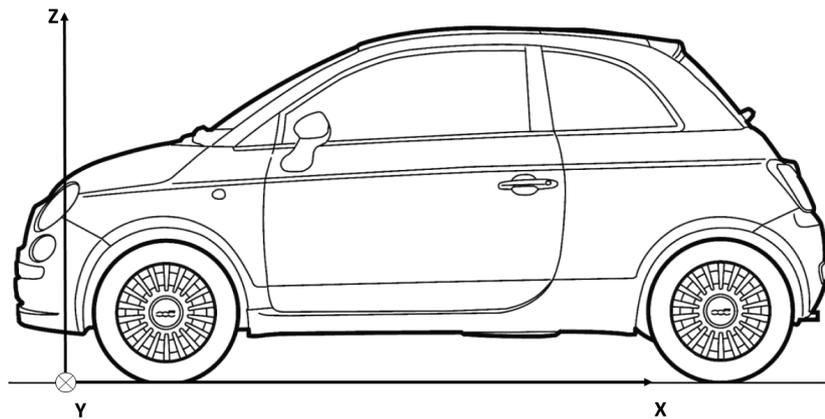


Figura 5.11: Sistema di riferimento utilizzato per le vetture.

## 5.3 Valutazione dei punti di impatto

Esistono diversi criteri di valutazione delle aree di impatto dei tre segmenti corporei analizzati. A ogni area si assegna un punteggio che concorre a quello totale attribuito all'urto pedone. Tale valore complessivo è uno dei parametri che contribuisce alla valutazione espressa dal numero di "stelle" Euro NCAP.

### 5.3.1 Area di impatto testa

Per valutare la lesione al segmento testa si utilizza l'*Head Injury Criterion* (HIC) così definito:

$$HIC = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1), \quad (5.1)$$

dove

- $a$  accelerazione risultante misurata con gli accelerometri, in unità di gravità ( $1g = 9,81 \, m/s^2$ );
- $t_1, t_2$  i due istanti di tempo (espressi in secondi) durante l'impatto, che definiscono l'intervallo tra l'inizio e la fine del periodo di registrazione per cui il valore di HIC sia massimo ( $t_2 - t_1 \leq 15 \, ms$ ).

Calcolato l'indice HIC in un punto della griglia di tracciatura precedentemente descritta, si assegnano un colore ed un punteggio a seconda dell'intervallo in cui il valore è compreso (paragrafo 1.1.1 di [27]):

- $HIC < 650 = verde = 1 \, punto$ ;
- $650 \leq HIC < 1000 = giallo = 0,75 \, punti$ ;
- $1000 \leq HIC < 1350 = arancione = 0,50 \, punti$ ;
- $1350 \leq HIC < 1700 = marrone = 0,25 \, punti$ ;
- $1700 \leq HIC = rosso = 0 \, punti$ .

Alcuni punti sulla griglia sono classificati rossi o verdi di *default* secondo le indicazioni del paragrafo 4.1.4 della normativa [28]. Le aree con colore preassegnato sono:

- i montanti "A" che risultano rossi di default;
- alcune zone del parabrezza che risultano verdi di default.

La mappa colore dell'HIC sull'intera area di impatto testa del cofano viene ricavata utilizzando in modo combinato i risultati sperimentali dei punti testati e quelli calcolati con il metodo agli elementi finiti.

L'Euro NCAP esegue delle prove di verifica su alcuni punti selezionati casualmente assegnando un fattore di correzione al punteggio totale, dichiarato dal costruttore, se questo non corrisponde a quello ottenuto dalla verifica. Il fattore di correzione è così determinato (paragrafo 1.3.2 di [27]):

$$\text{Fattore di correzione} = \frac{\text{Punteggio reale testato}}{\text{Punteggio previsto}}. \quad (5.2)$$

Il punteggio di ogni punto della griglia (esclusi quelli appartenenti alle aree di default) viene moltiplicato per il fattore di correzione calcolato che può essere maggiore o minore di 1. Il punteggio così corretto è diviso per il numero di punti presenti nella griglia e poi moltiplicato per il massimo punteggio ottenibile fissato dalla norma che, per l'area di impatto testa, è pari a 24.

### 5.3.2 Area di impatto bacino

Per quanto riguarda il bacino si valutano i parametri riportati in tabella 5.2, in particolare il momento flettente e la somma delle forze agenti.

Tabella 5.2: Criteri di valutazione dei punti nell'area di impatto bacino (paragrafo 1.1.2 di [27]).

|                          | Limite di performance superiore | Limite di performance inferiore |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Momento flettente</b> | 285 Nm                          | 350 Nm                          |
| <b>Somma delle forze</b> | 5 kN                            | 6 kN                            |

I limiti di performance si riferiscono al rischio percentuale di frattura del femore o della pelvi. Se un parametro in tabella risulta minore del limite di performance superiore (condizione più favorevole), al punto di misura si assegna un punteggio unitario; se è maggiore o uguale del limite di performance inferiore il punto ha un punteggio nullo. Se il parametro misurato cade nel range compreso tra i due limiti viene interpolato linearmente e il punteggio sarà minore dell'unità. Ai punti non testati si assegna il punteggio peggiore ottenuto fra quelli adiacenti. Ai restanti punti non testati si assegna il punteggio del corrispondente simmetrico.

Il punteggio totale è diviso per il numero di punti presenti nella griglia e poi moltiplicato per il massimo punteggio ottenibile fissato dalla norma che, per l'area di impatto bacino, è pari a 6.

Se almeno uno dei due parametri supera il limite di performance inferiore, l'esito della prova è negativo e il punteggio totale assegnato è nullo.

### 5.3.3 Area di impatto gamba

I criteri per la valutazione dei punti dell'area di impatto della gamba sono sintetizzati in tabella 5.3.

Tabella 5.3: Criteri di valutazione dei punti nell'area di impatto gamba (paragrafo 1.1.3 di [27]).

|                                      | Limite di performance superiore | Limite di performance inferiore |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Momento flettente sulla tibia</b> | 282 Nm                          | 340 Nm                          |
| <b>Elongazione di MCL</b>            | 19 mm                           | 22 mm                           |
| <b>Elongazione di ACL/PCL</b>        | 10 mm                           | 10 mm                           |

Nel caso della gamba, se uno dei parametri in tabella è minore del limite di performance superiore (condizione più favorevole), al punto testato si assegna un punteggio massimo pari a 0,5. Se il momento flettente sulla tibia supera il limite migliore di performance (superiore), ma è minore del limite di performance inferiore al punto testato si assegna un punteggio interpolato linearmente, minore di 0,5 altrimenti per valori superiori al limite di performance inferiore assume un punteggio pari a 0. Per quanto riguarda l'elongazione dei legamenti del ginocchio si considera solo il punteggio legato alla condizione peggiore: basta che uno dei due parametri riguardanti i legamenti superi i limiti fissati per assumere punteggio nullo. Ai punti non testati si assegna il punteggio peggiore ottenuto fra quelli adiacenti. Ai restanti punti non testati si assegna il punteggio del corrispondente simmetrico.

Il punteggio totale è diviso per il numero di punti presenti nella griglia e poi moltiplicato per il massimo punteggio ottenibile fissato dalla norma che, per l'area di impatto bacino, è pari a 6.

## Capitolo 6

# Urto pedone: prove sperimentali eseguite

### 6.1 Tracciatura Euro NCAP con lo scanner *ATOS Core 500*

L'operazione di tracciatura del veicolo descritta nel paragrafo 5.2 può essere ottenuta con l'aiuto dello scanner *ATOS Core 500* e della sonda di posizionamento in dotazione. Le prove eseguite sono state le seguenti:

1. tracciatura dell'area di impatto di bacino e gamba sulla vettura (Modello 3);
2. proiezione della griglia per la tracciatura dell'area di impatto testa sul cofano del veicolo (Modello 3);
3. calcolo della percentuale di aree interferenti tra il cofano e il vano motore per i Modelli 4 e 5.

#### 6.1.1 Tracciatura dell'area di impatto bacino e gamba

Utilizzando la sonda in dotazione con lo scanner (figura 2.20) sono stati tracciati i punti necessari per definire le linee che delimitano l'area di impatto del bacino e della gamba, descritte nel paragrafo 5.2. Dapprima è stata scansionata la parte frontale del veicolo (Modello 3), in particolare la porzione che comprende il paraurti e parte del cofano. Il veicolo era stato tracciato manualmente dall'operatore e nell'acquisizione sono visibili:

- la Bonnet Leading Edge Reference Line;
- la WAD 775;
- la IBRL.

La IBRL non è visibile in modo chiaro perché era stata segnata con un pennarello la cui traccia non è stata rilevata dallo scanner, invece le altre due linee sono segnate con del nastro adesivo nero la cui traccia appare nitida sulla scansione (figura 6.1).

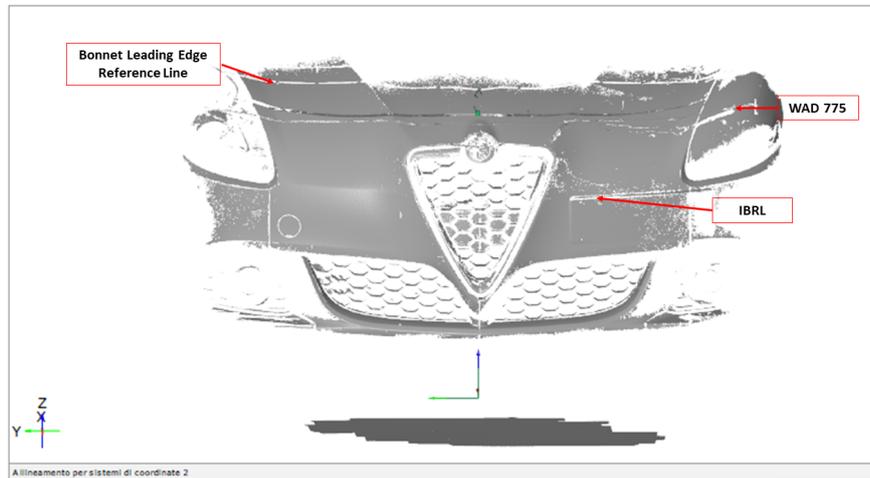


Figura 6.1: Scansione della parte frontale della vettura (Modello 3) su cui sono visibili le tracce della Bonnet Leading Edge Reference Line, della WAD 775 e della IBRL. In basso è riportato il sistema di riferimento della vettura.

Il sistema di riferimento della vettura è riportato in figura 5.11 ed è coerente con quello globale utilizzato dal software. Con la Touch Probe in dotazione allo strumento, nell'ambiente di lavoro LIVE, sono stati acquisiti tredici punti lungo la WAD 775 e tredici punti lungo la IBRL a distanza di 100 mm l'uno dall'altro, lungo la direzione y. In entrambi i casi si è partiti dalla linea di mezzzeria della vettura, con coordinata 0, spostandosi prima a destra (direzione Y-) e poi a sinistra (direzione Y+). In figura 6.2 sono riportati i punti acquisiti con la sonda sulla WAD 775 che costituiscono i target per l'impatto del modello bacino contro la vettura (contrassegnati dalla lettera U). Nella stessa figura sono riportati i punti acquisiti sulla IBRL che rappresentano il target per l'impatto della gamba contro il paraurti (contrassegnati con la lettera L).

Grazie alla sonda che restituisce in tempo reale le coordinate nello spazio di ogni punto nel volume di misura dello scanner, la tracciatura della griglia delle aree di impatto per l'urto pedone è stata ottenuta più rapidamente, in modo più preciso e ripetibile rispetto alla procedura manuale definita nei paragrafi 3.2-3.13 della normativa [4]. I punti rilevati sono stati contrassegnati sul paraurti con un pennarello. Le coordinate dei punti acquisiti possono essere esportate anche in formato CSV.

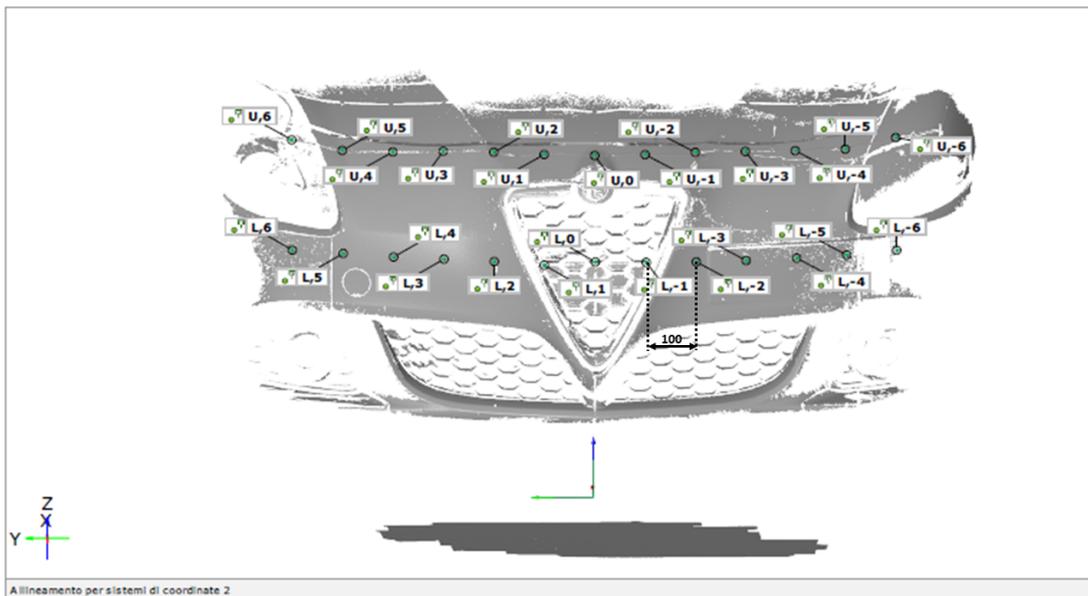


Figura 6.2: Rappresentazione dei punti acquisiti con la sonda sulla WAD 775 (lettera U) e sulla IBRL (lettera L) con le corrispondenti etichette.

### 6.1.2 Proiezione della griglia per la tracciatura dell'area di impatto testa

In generale l'operatore traccia manualmente la griglia dell'area di impatto testa sul cofano seguendo la procedura prescritta dalla normativa [4]. Una volta tracciati, i punti sono riportati su un foglio semitrasparente in modo da poterli facilmente replicare sul cofano di un'altra vettura dello stesso modello. Oppure è così possibile ripetere la prova su cofani differenti, da sostituire sulla stessa vettura, considerato che ogni prova non permette di testare tutti i punti necessari sullo stesso componente.

Utilizzando lo scanner *ATOS Core 500* è stata proiettata sul cofano la griglia di tracciatura creata in precedenza via software. Sono state definite delle sezioni longitudinali a distanza di 100 mm l'una dall'altra e delle analoghe sezioni trasversali con lo stesso interasse. Poiché parte dell'area interessata dall'urto testa comprende anche il parabrezza, che in generale non è complanare con il cofano, occorre fissare su di esso i punti della griglia di tracciatura anche se questi ricadono nell'avvallamento fra i due componenti. In questo caso la normativa [4] (paragrafo 3.9.8) prevede l'utilizzo di nastro su cui segnare i punti che ricadono nell'avvallamento (figura 6.3). Per ripristinare la continuità delle superfici si utilizza una fascia di cartone sagomata fissata con il nastro.

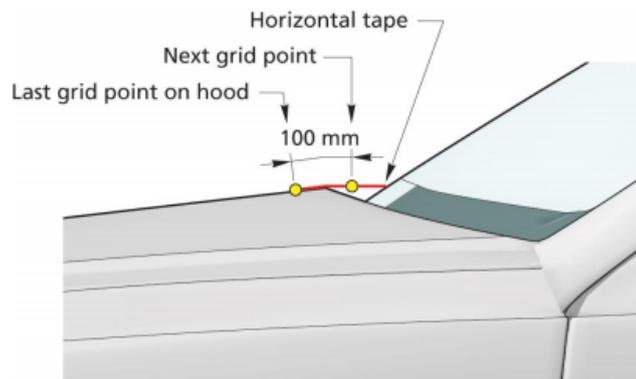


Figura 6.3: Nastro adesivo per i punti della griglia posti oltre il contorno esterno del cofano (paragrafo 3.9.8 di [4]).

È stata eseguita la scansione della parte anteriore (cofano e parte del paraurti) di una vettura (Modello 6) e del piano di terra sia in presenza di cartoncino (figura 6.4) sia senza.

Per entrambe le scansioni, una volta trasformate in mesh, è stato definito il sistema di riferimento come in figura 5.11. In seguito sono state segnate le sezioni longitudinali e trasversali che definiscono la griglia di tracciatura per l'area di impatto testa (figure 6.5 e 6.6).

Tali elementi geometrici sono stati proiettati direttamente sul cofano. Una volta selezionate le sezioni create, la proiezione è stata eseguita nell'ambiente di lavoro LIVE con la sequenza di comandi:



Figura 6.4: Configurazione della vettura (Modello 6) in presenza della fascia di cartoncino.

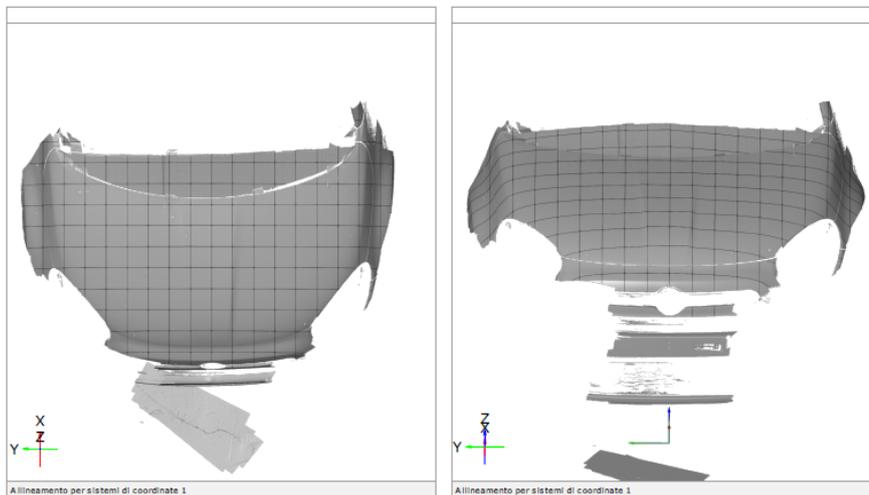


Figura 6.5: Griglia di tracciatura per la vettura con cartoncino.

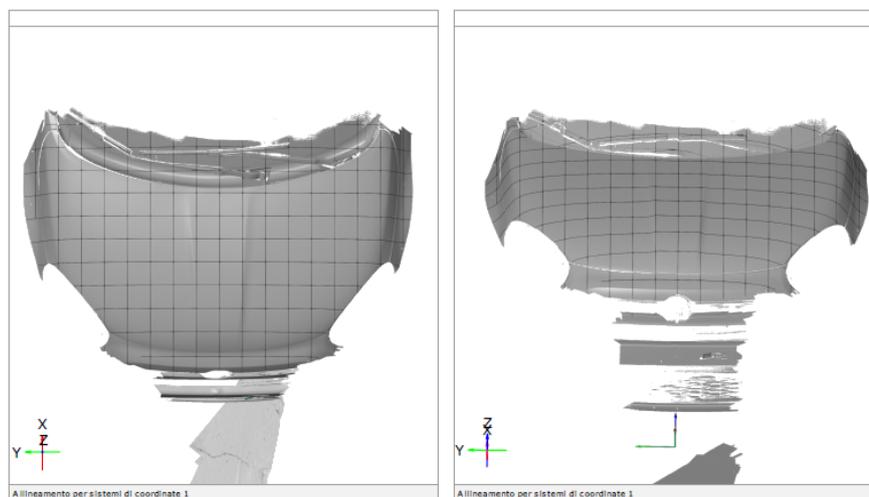


Figura 6.6: Griglia di tracciatura per la vettura senza cartoncino.

**LIVE → Proietta elementi sull'oggetto di misura.**

Sulle porzioni inquadrare dallo scanner sufficientemente distanti dall'avvallamento verso il parabrezza la proiezione è risultata corretta e le sezioni non sono state distorte (figura 6.7).

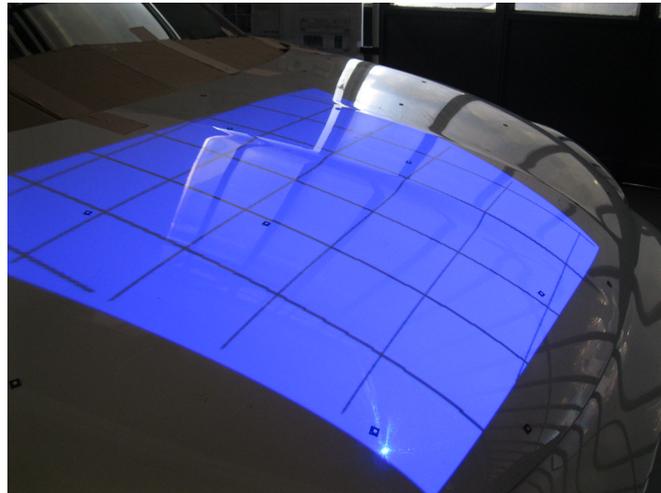


Figura 6.7: Proiezione della griglia di tracciatura su aree distanti dall'avvallamento verso il parabrezza.

In corrispondenza dell'avvallamento tra cofano e parabrezza in presenza della fascia di cartoncino le sezioni sono state proiettate senza alcuna distorsione (figura 6.8a), mentre in assenza della fascia sono state distorte (figura 6.8b).

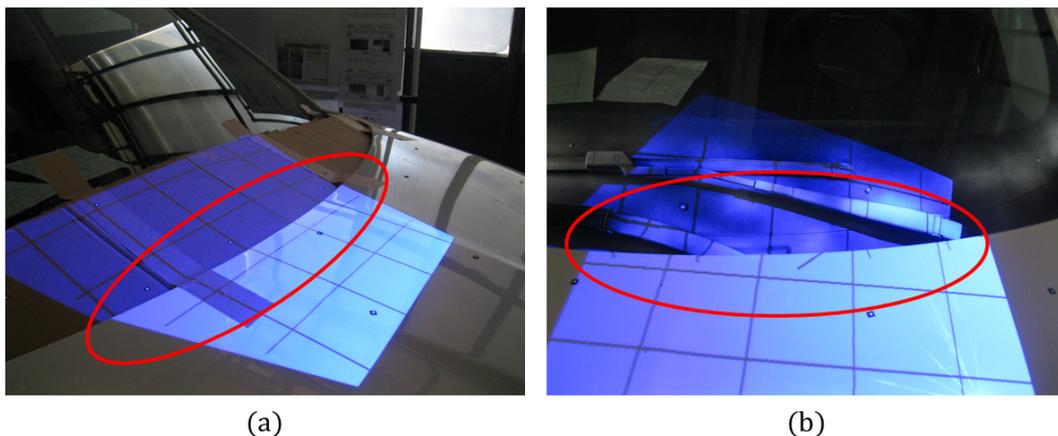


Figura 6.8: Proiezione della griglia di tracciatura in corrispondenza dell'avvallamento tra cofano e parabrezza con la fascia di cartoncino (a) e senza (b).

La fascia di cartoncino, ripristinando la continuità delle superfici, ha facilitato la proiezione non creando distorsioni. Invece in assenza della fascia parte dell'avvallamento, ricadendo su un piano sottostante al cofano, in prossimità del bordo soprastante, ha

dato origine a sezioni sovrapposte. Le sezioni create dal software seguono il profilo delle superfici e nel caso esse si trovino su piani a quote diverse (in direzione z) durante la proiezione, a seconda dell'inquadratura dello strumento, le geometrie sottostanti sono proiettate sul piano superiore e viceversa, generando distorsioni e discontinuità (figura 6.9).

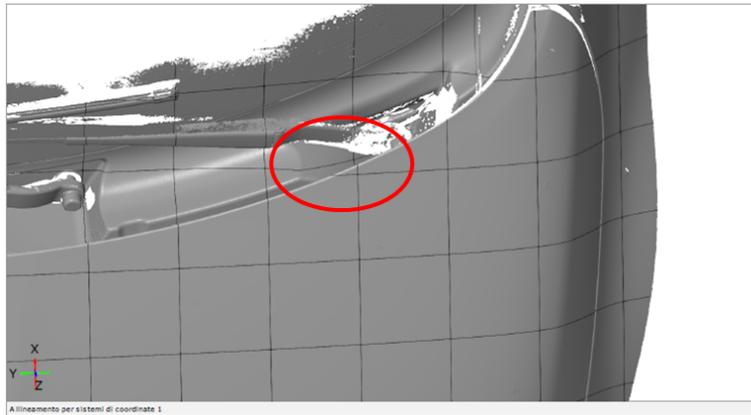


Figura 6.9: Sezioni sovrapposte sul cofano e sull'avvallamento sottostante.

Proiettando le sezioni, l'operatore segna i punti di tracciatura in modo sufficientemente accurato in presenza della fascia di cartone. La tracciatura può essere così replicata su un nuovo cofano dello stesso modello. Per contro in assenza della fascia di cartone, a causa delle distorsioni, l'accuratezza dell'operazione è ridotta.

## 6.2 Calcolo della distribuzione delle aree di impatto testa (ECE R. 127)

Prima di eseguire le prove di urto pedone del segmento testa, al fine di valutare in maniera approssimata la possibilità di deformazione del cofano senza l'impedimento di componenti sottostanti, si procede a rilevare, in corrispondenza delle diverse aree di impatto (per bambino e per adulto), l'ampiezza dello spazio libero al di sotto del cofano misurando la distanza tra l'estradosso di questo e il punto più vicino del blocco motore. Questa operazione può essere eseguita o direttamente sul modello CAD o tramite *reverse engineering* utilizzando lo scanner *ATOS Core 500*. Quest'ultimo è il caso di *benchmarking*<sup>1</sup> su veicoli di concorrenza o veicoli speciali, come nel presente studio.

Se la distanza rilevata è limitata, lo spazio esistente tra il cofano e il blocco motore non è sufficiente a permettere la deformazione necessaria ad assorbire l'energia generata dall'impatto testa-cofano. In questa parte di cofano l'HIC risulterà elevato ricadendo nel

<sup>1</sup>Test di controllo comparativo [29].

range di colore rosso.

È stato utilizzato lo scanner *ATOS Core 500* per acquisire la geometria della vettura di interesse, per misurare le distanze richieste e calcolare la percentuale di area del cofano interferente con il vano motore imponendo particolari livelli di affondamento.

Per la definizione delle aree di impatto relative all'adulto e al bambino, nelle prove eseguite sono state considerate le rispettive aree come segue secondo la norma [3] ("Annex 5", paragrafi 4.3 e 5.3):

- *Child*: l'area di impatto è stata estesa di 82,5 mm (metà del diametro del modello testa) oltre la WAD 1700, verso il parabrezza;
- *Adult*: l'area di impatto è stata estesa di 82,5 mm oltre la WAD 1700 (verso la parte frontale del veicolo).

I paragrafi 5.2.1 e 5.2.2 della norma [3] stabiliscono le seguenti due condizioni limite per le aree in cui è valutato l'HIC nel caso *Child* e *Adult*:

$$A_{HIC1000} \leq \frac{2}{3}(A_C + A_A);$$
$$A_{HIC1700} \leq \frac{1}{3}(A_C + A_A). \quad (6.1)$$

dove:

- $A_C$  area di impatto *Child*;
- $A_A$  area di impatto *Adult*;
- $A_{HIC1000}$  zona con  $HIC \leq 1000$ ;
- $A_{HIC1700}$  zona con  $HIC \leq 1700$ .

La norma [3] ("Annex 5", paragrafi 4.7 e 5.7) stabilisce la direzione di impatto pari a  $50^\circ \pm 2^\circ$  nel caso *Child* e  $65^\circ \pm 2^\circ$  nel caso *Adult* definita nel piano verticale longitudinale del veicolo, verso il basso e dalla fronte al retro.

L'obiettivo delle seguenti prove è determinare la distribuzione delle aree appena descritte mediante il software *ATOS Professional 2016*. L'affondamento dovuto all'urto testa è stato simulato sul cofano indeformato, acquisito con lo scanner, traslandolo lungo le direzioni di urto previste dalla normativa e descritte precedentemente. In particolare l'area *Child* del cofano è stata traslata verso il basso di due quantità  $a$  e  $b$  ( $a < b$ ) lungo la direzione inclinata di  $50^\circ$  rispetto all'asse x, mentre l'area *Adult* prima di una quantità  $c$  e poi  $d$  ( $c < d$ ) lungo la direzione inclinata di  $65^\circ$  rispetto all'asse

x. A seguito delle traslazioni sono state determinate le intersezioni tra la superficie rappresentativa del cofano e i volumi del sottostante vano motore. Il perimetro di tali intersezioni racchiude l'area cosiddetta *interferente* rappresentativa delle porzioni di cofano in cui i punti assumono valore di HIC elevato, ma inferiore a 1700. L'estensione di tali aree non deve superare i limiti di norma pari a 1/3 dell'area totale (condizione 6.1). Nel caso in esame si ha:

$$\frac{A_{intC} + A_{intA}}{A_{tot}} < \frac{1}{3}, \quad (6.2)$$

dove:

- $A_{intC}$  è l'area bambino interferente con il vano motore;
- $A_{intA}$  è l'area adulto interferente con il vano motore;
- $A_{tot}$  è l'area totale del cofano.

Queste aree sono state calcolate utilizzando il software *ATOS Professional 2016* con la sequenza di comandi:

**ANALISI → Controlla dimensioni → Altro → Area .**

Nel caso in cui il veicolo abbia una configurazione tale da presentare solo l'area di impatto testa *Cbild* la condizione 6.2 si modifica nel seguente modo:

$$\frac{A_{intC}}{A_{tot}} < \frac{1}{3}. \quad (6.3)$$

Di seguito si descrive la procedura sperimentale utilizzata per due tipi di veicolo: il modello 4 e il modello 5.

### 6.2.1 Distribuzione delle aree sul Modello 4

In questo caso lo scanner si è rivelato utile per l'acquisizione della geometria strutturale mediante *reverse engineering*. Una volta eseguita la scansione<sup>2</sup> della parte frontale del veicolo, in particolare del cofano e del vano motore, su questa è stata riportata una tracciatura di massima. È stata tracciata la Bonnet Leading Edge Reference Line (figura 6.10a) con la procedura descritta nella normativa [4]. È stato utilizzato un regolo rigido lungo 1 m, inclinato di 50° rispetto alla verticale, controllandone l'inclinazione con una livella sferica elettronica e segnando i punti di contatto tra il regolo stesso e il cofano ogni 100 mm circa. La congiungente dei punti così tracciati costituisce la BLERL (figura 6.10b).

<sup>2</sup>La scansione non riporta il piano di terra, perciò l'origine del sistema di riferimento della vettura è stata posizionata sul piano degli alloggiamenti dei tamponi di battuta del cofano, a metà tra i due.

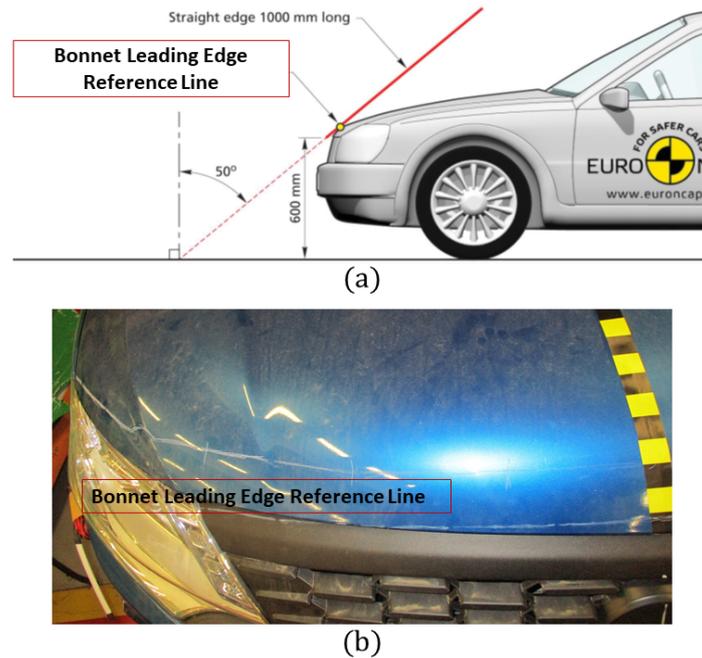


Figura 6.10: Schema per la tracciatura della Bonnet Leading Edge Reference Line (a) e tracciatura reale sulla vettura con tratteggio bianco (b).

È stata tracciata la WAD 1700 (figura 5.9a) mediante un filo disteso sul cofano munito di contrappeso all'estremità verso terra e di contrassegni a distanze prefissate. Partendo dalla mezzeria del veicolo il filo è stato disposto ad interassi successivi di 100 mm circa in direzione  $Y_+$ , congiungendo tutti i punti con la medesima distanza di 1700 mm dall'estremo a terra (figura 6.11b).

Infine è stata tracciata la Bonnet Side Reference Line secondo lo schema rappresentato in figura 6.11a. Sono stati segnati e congiunti i punti ogni 100 mm circa (figura 6.11b).



Figura 6.11: Schema per la tracciatura della Bonnet Side Reference Line (a) e tracciatura reale sulla vettura con tratteggi bianchi (b).

Il completamento della tracciatura della WAD 1700, della BSRL e della BLERL, in direzione Y- è stato ottenuto via software per simmetria.

L'area delimitata dalla Bonnet Leading Edge Reference Line, dalla WAD 1700 e dalle due porzioni della Bonnet Side Reference Line (destra e sinistra) rappresenta l'area di impatto testa per il bambino. L'area compresa tra la WAD 1700, la curva di bordo posteriore del cofano e le porzioni restanti di Bonnet Side Reference Line rappresenta l'area di impatto per l'adulto.

Per trasferire sul software le linee tracciate sul cofano, sono state misurate con un metro a nastro le posizioni dei singoli punti di ciascuna linea riportandoli sulla mesh effettiva. I punti appartenenti alla WAD 1700 e alla BLERL sono stati riferiti al bordo posteriore del cofano, mentre i punti sulla BSRL al bordo del parafrangente. Le singole linee sono state ottenute congiungendo i corrispondenti punti così riportati (figura 6.12).

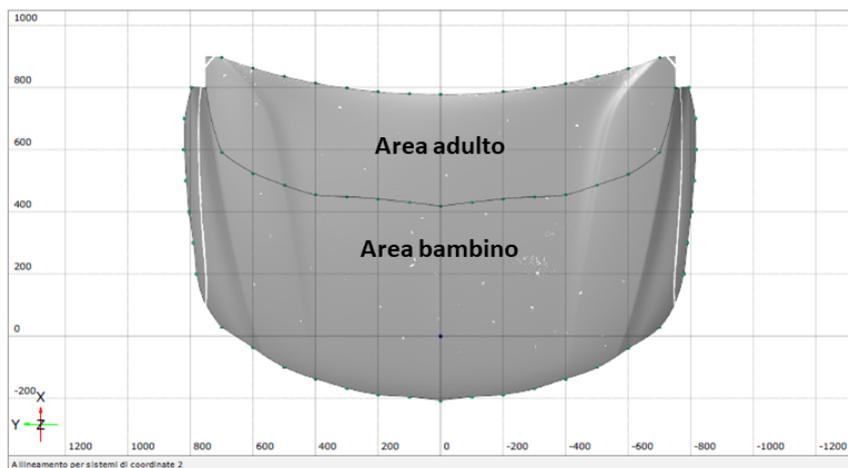


Figura 6.12: Tracciatura via software delle aree di impatto testa bambino e adulto.

Per le due aree così definite è stato considerato l'offset pari a 82,5 mm, come descritto nel paragrafo 6.2. Tale offset è necessario in quanto potrebbe accadere che l'impattore testa colpisca la linea di separazione tra le due aree, sconfinando in quello che non è il target dell'urto.

La percentuale di area interferente è stata calcolata separando le due aree (*Child* e *Adult*) ed è stata verificata la validità della condizione 6.2.

### Area bambino

Per l'area bambino sono state calcolate le aree interferenti del cofano con il vano motore per valori di affondamento  $a$  (figura 6.13) e  $b$  (figura 6.14), con  $a < b$ .

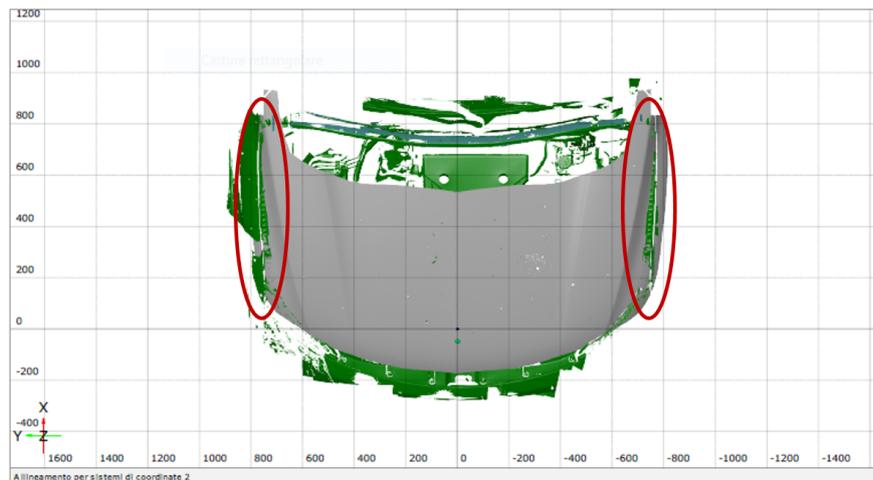


Figura 6.13: Area bambino del cofano traslato di  $a$  lungo la direzione inclinata di  $50^\circ$  rispetto all'asse  $x$ .

Nelle figure 6.13 e 6.14 sono evidenziate nei cerchi in rosso le porzioni del cofano interferenti con il vano motore.

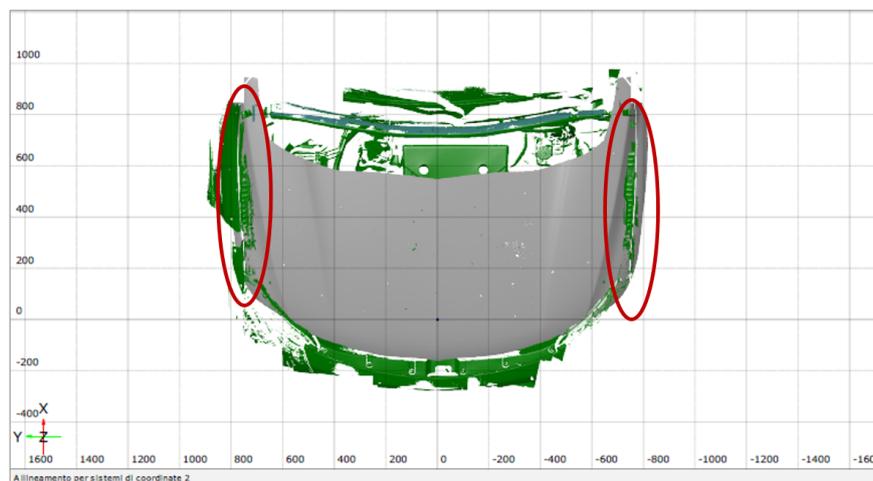


Figura 6.14: Area bambino del cofano traslato di  $b$  lungo la direzione inclinata di  $50^\circ$  rispetto all'asse  $x$ .

### Area adulto

Per l'area adulto sono state calcolate le aree interferenti del cofano con il vano motore per valori di affondamento pari a  $c$  (figura 6.15) e  $d$  (figura 6.16), con  $c < d$ .

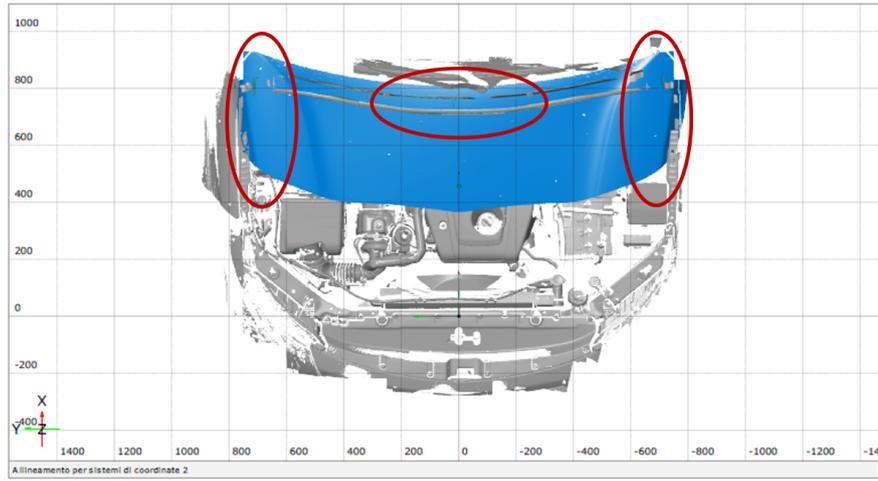


Figura 6.15: Area adulto del cofano traslato di  $c$  lungo la direzione inclinata di  $65^\circ$  rispetto all'asse  $x$ .

Nelle figure 6.15 e 6.16 sono evidenziate con i cerchi in rosso le porzioni del cofano interferenti con il vano motore.

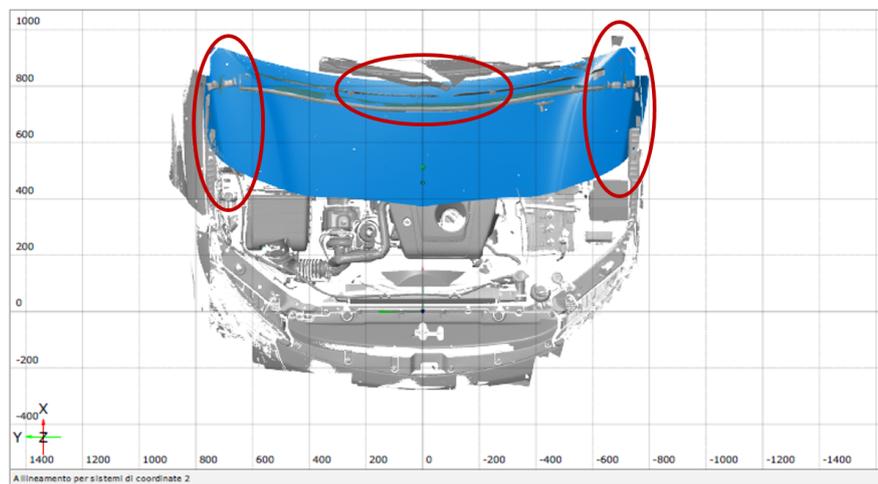


Figura 6.16: Area bambino del cofano traslato di  $d$  lungo la direzione inclinata di  $65^\circ$  rispetto all'asse  $x$ .

In tabella 6.1 sono riportate per ogni tipo di area di impatto (*Child* e *Adult*), la rispettiva estensione  $e$ , per ogni affondamento, l'area interferente del cofano con il vano motore. È stata calcolata e riportata in percentuale anche l'area interferente specifica ottenuta dal rapporto tra l'area interferente e l'estensione dell'area di impatto corrispondente. Le aree interferenti evidenziate in arancio (quelle più critiche) sono state confrontate con l'area totale ( $A_C + A_A$ ) secondo l'espressione 6.2.

Tabella 6.1: Aree interferenti calcolate via software per l'impatto di adulto e bambino per diversi valori di affondamento (Modello 4).

| Tipo area                       | Area di impatto ( $mm^2$ ) | Affondamento | Area interferente ( $mm^2$ ) | % Area interferente specifica |
|---------------------------------|----------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------|
| Child                           | $1,19 \cdot 10^6$          | $a$          | $1,42 \cdot 10^5$            | 11,93%                        |
|                                 |                            | $b$          | $2,88 \cdot 10^5$            | 24,20%                        |
| Adult                           | $6,76 \cdot 10^5$          | $c$          | $1,66 \cdot 10^5$            | 24,56%                        |
|                                 |                            | $d$          | $2,12 \cdot 10^5$            | 31,36%                        |
| Area totale ( $mm^2$ )          |                            |              | $1,87 \cdot 10^6$            |                               |
| % Area interferente complessiva |                            |              |                              | 26,74% (< 33,33%)             |

L'ultima riga è evidenziata in verde perché la percentuale di area interferente totale, ottenuta considerando sia l'area bambino che l'area adulto, è minore del 33,33%, richiesto dalla normativa [3].

## 6.2.2 Distribuzione delle aree sul Modello 5

A differenza del caso precedente (Modello 4) è stata considerata solo l'area di impatto bambino a causa della conformazione del veicolo la cui geometria del cofano non ha consentito di individuare una possibile area di impatto adulto. È stato scansionato il veicolo per ricavarne la geometria CAD acquisendo il cofano, parte dei parafranghi, il vano motore e parte del paraurti (figura 6.17). Il sistema di riferimento adottato ha l'origine nel punto medio della distanza tra i centri dei tamponi di battuta del vano motore proiettato sul piano di terra.

Sul cofano in figura 6.17 è tracciata l'area per l'impatto testa del bambino allargata di 82,5 mm (traccia bianca) per coprire anche il caso di impatto del modello di testa in corrispondenza del limite della stessa area.

Esistendo solo l'area di impatto testa bambino la percentuale di area interferente con il vano motore si calcola con la relazione 6.3. Sono stati considerati sia l'affondamento pari alla quantità  $a$  (figura 6.18), che quello pari a  $b$  (figura 6.19), con  $a < b$ .

Le porzioni di cofano interferenti con il vano motore sottostante a seguito delle traslazioni sono evidenziate nei cerchi rossi delle figure 6.18 e 6.19.

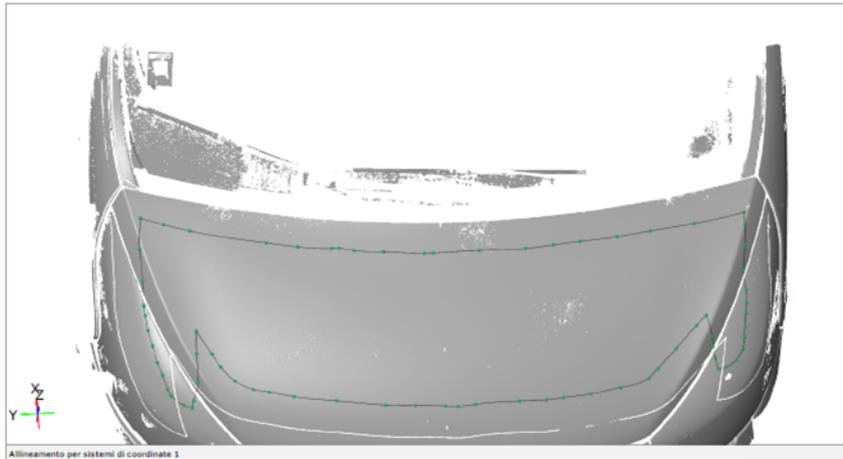


Figura 6.17: Scansione del veicolo di Modello 5: cofano e vano motore. Sul cofano è tracciata l'area di impatto testa per il bambino (traccia nera) e la stessa allargata di 82,5 mm (traccia bianca).

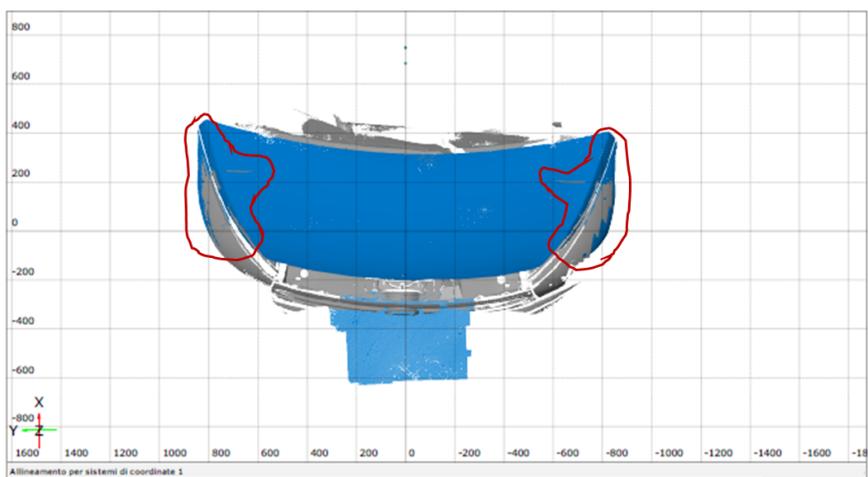


Figura 6.18: Aree interferenti con il vano motore (nei cerchi in rosso) del cofano del veicolo di Modello 5 traslato di  $a$ .

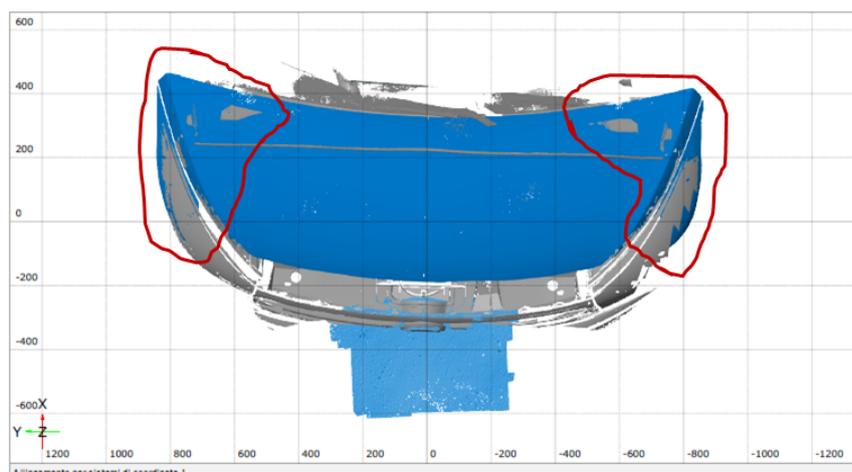


Figura 6.19: Aree interferenti con il vano motore (nelle curve in rosso) del cofano del veicolo di Modello 5 traslato di  $b$ .

In tabella 6.2, sono riportati l'area della porzione di cofano di interesse (in  $mm^2$ ) e, per ogni affondamento, l'area interferente con il corrispondente valore percentuale rispetto all'area di impatto che deve rispettare la condizione 6.1.

Tabella 6.2: Aree interferenti calcolate via software per l'impatto di bambino per diversi valori di affondamento (Modello 5).

| Tipo di area | Area di impatto ( $mm^2$ ) | Affondamento | Area interferente ( $mm^2$ ) | % Area interferente |
|--------------|----------------------------|--------------|------------------------------|---------------------|
| Child        | $9,39 \cdot 10^5$          | $a$          | $1,78 \cdot 10^5$            | 18,92%              |
|              |                            | $b$          | $2,79 \cdot 10^5$            | 29,71% (< 33,33%)   |

La situazione più critica riguarda l'affondamento pari a  $b$  il cui valore percentuale di 29,71% (< 33,33%) rispetta comunque il limite di normativa [3].

### 6.3 Analisi degli affondamenti sul cofano

Lo scanner oggetto del presente studio è stato utilizzato per analizzare gli affondamenti sul cofano anteriore di un'auto (Modello 3) a seguito di una serie di impatti testa-cofano. L'analisi è stata ripetuta su due cofani dello stesso modello, considerando punti di impatto differenti per ciascuno di essi.

Nelle figure 6.20a e 6.20b sono riportati, rispettivamente per il primo (in numero di due) e secondo cofano (in numero di tre), i punti di impatto testa-cofano contrassegnati con marker di colore giallo e nero.

In particolare sono elencate le coordinate dei punti testati sulla griglia Euro NCAP (figura 5.10a):

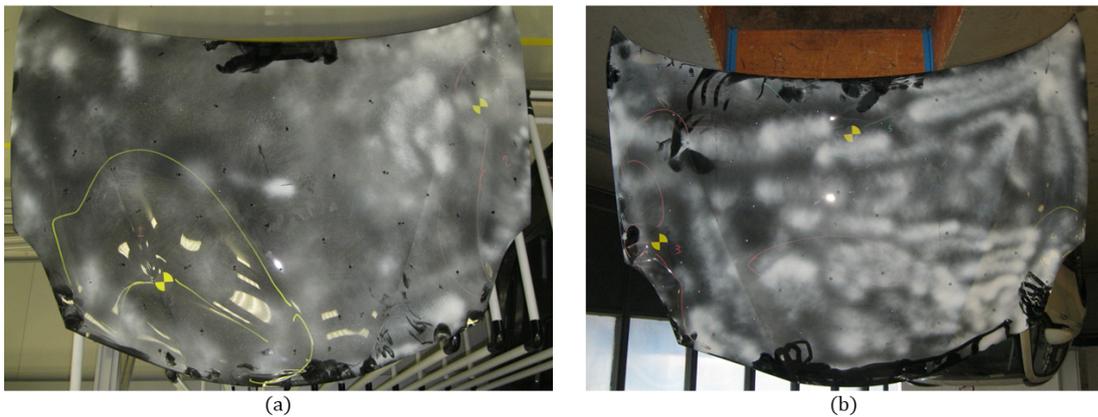


Figura 6.20: Cofano 1 con due punti di impatto (a) e cofano 2 con tre punti di impatto (b).

- *punto 1* (cofano 1): 1,3;
- *punto 2* (cofano 1): 6,-6;
- *punto 3* (cofano 2): 3,6;
- *punto 4* (cofano 2): 2,-6;
- *punto 5* (cofano 2): 6,0.

È stata eseguita la scansione dei due cofani deformati disponendo i marker dello scanner ATOS in maniera uniforme sulla superficie. Poiché i cofani erano di colore nero e lo scanner non acquisisce correttamente in tali condizioni si è reso necessario applicare uno strato di spray anti-riflesso (visibile in figura 6.20 come aloni chiari).

### 6.3.1 Cofano 1

Il primo cofano esaminato era montato sulla vettura di prova e il risultato dell'acquisizione comprende anche parte dei parafranghi e del paraurti frontale (figura 6.21).

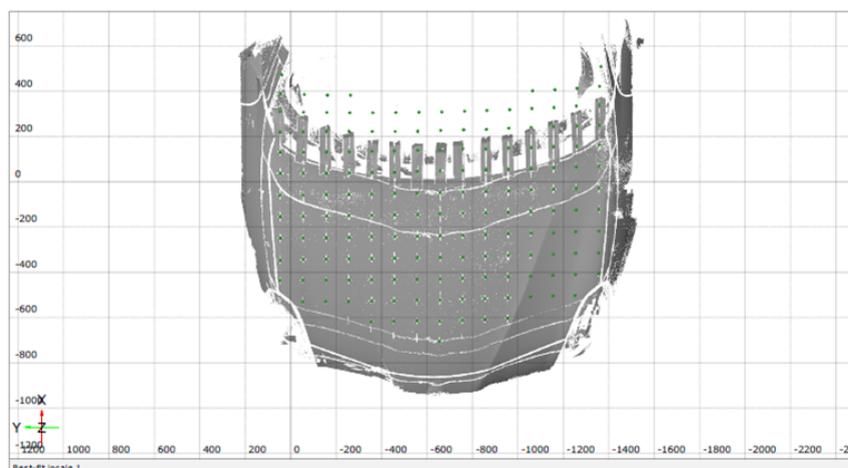


Figura 6.21: Risultato della scansione del cofano 1 montato sulla vettura.

È stata ottenuta la mesh solo per la porzione comprendente il cofano che è stata allineata al modello CAD di progetto della vettura. In questo caso, come riferimento per l'allineamento, è stato utilizzato il bordo posteriore del cofano e il suo angolo posteriore sinistro in quanto più distante dai punti di impatto che hanno subito deformazioni. L'allineamento è stato ottenuto con la seguente sequenza di comandi:

**OPERAZIONI → Allineamento → Allineamento principale → Allineamento per elementi geometrici.**

Sono stati costruiti tre elementi geometrici fra loro corrispondenti sia sul CAD di riferimento che sulla mesh deformata: il primo è un punto posto allo spigolo del cofano, il secondo è una linea sul bordo sinistro del cofano e il terzo un piano in corrispondenza dell'angolo posteriore sinistro indeformato. Effettuato un primo allineamento di massima fra la mesh e il modello CAD si è affinato il risultato nelle zone non soggette a deformazione con i seguenti comandi:

**OPERAZIONI → Allineamento → Allineamento principale → Best-fit locale.**

L'allineamento per il cofano 1 è riportato in figura 6.22 dove la mesh è rappresentata in verde e il modello CAD in grigio.

È stata eseguita l'analisi delle deviazioni rispetto al modello indeformato CAD ottenendo la mappa cromatica in figura 6.23. La scala numerica è stata normalizzata nel range compreso tra -1 e 1 e adimensionalizzata per ragioni di riservatezza.

Gli affondamenti lungo l'asse z riportati nella mappa sono coerenti con la modalità di impatto. Nei punti target dell'impattore di testa si formano delle depressioni lungo

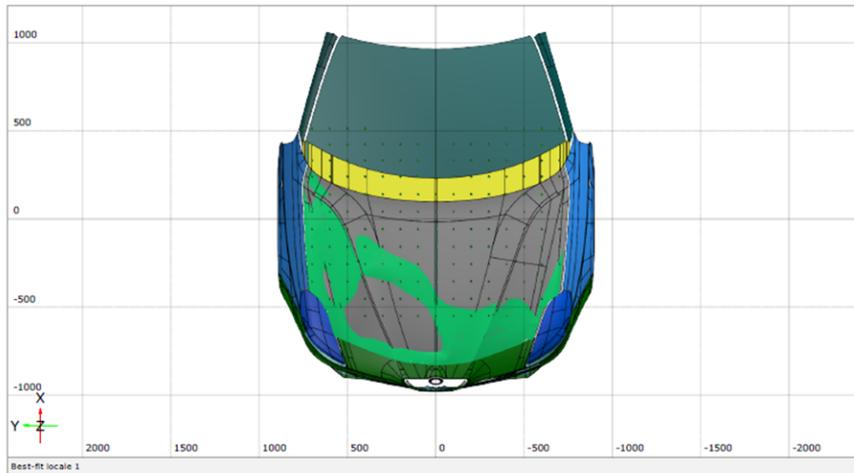


Figura 6.22: Risultato dell'allineamento della mesh del cofano 1 rispetto al modello CAD della vettura.

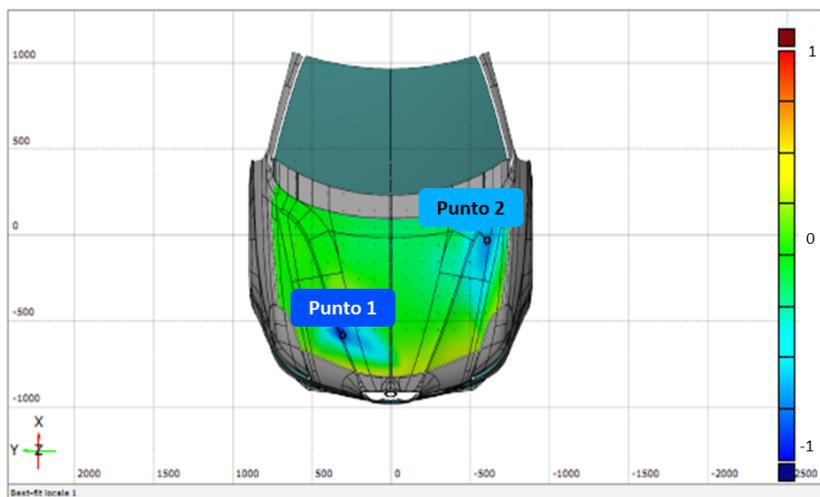


Figura 6.23: Rappresentazione degli affondamenti lungo z sul cofano 1 (due punti di impatto).

la direzione negativa dell'asse z. Gli affondamenti normalizzati e adimensionalizzati rispettivamente per il punto 1 e il punto 2 sono i seguenti:

- $z_1 = -0,83$ ;
- $z_2 = -0,65$ .

L'allineamento è accettabile perché sul bordo posteriore sinistro, sufficientemente lontano dai punti di impatto, la deviazione è nulla.

### 6.3.2 Cofano 2

Il secondo cofano, deformato in seguito all'urto, è stato esaminato dopo averlo smontato dal veicolo di prova (figura 6.20b). La scansione ottenuta è rappresentata in figura 6.24.

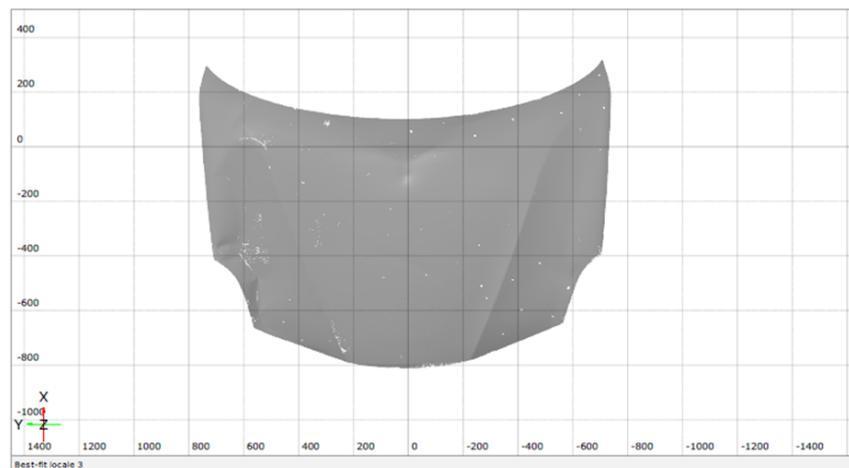


Figura 6.24: Risultato della scansione del cofano 2 smontato dalla vettura.

Dalla scansione è stata ottenuta la mesh effettiva che è stata allineata al modello CAD della vettura completa con la stessa procedura utilizzata per il cofano 1. In figura 6.25 si riporta il risultato dell'allineamento ottenuto dove la mesh è rappresentata in verde e il modello CAD in grigio.

È stata eseguita l'analisi delle deviazioni rispetto al modello CAD ottenendo la mappa cromatica in figura 6.26.

Analogamente al primo cofano testato, gli affondamenti lungo l'asse z visibili sulla mappa sono coerenti con la configurazione fisica reale dei pezzi sottoposti alla prova. In questo caso sono stati considerati tre punti target, uno in prossimità del proiettore sinistro (punto 3), l'altro in prossimità del proiettore destro (punto 4) e il terzo sulla parte centrale del cofano prossima al parabrezza (punto 5). In tutti i punti lo spostamento è negativo lungo z e assume i seguenti valori massimi normalizzati e adimensionalizzati per ragioni di riservatezza per ogni punto testato:

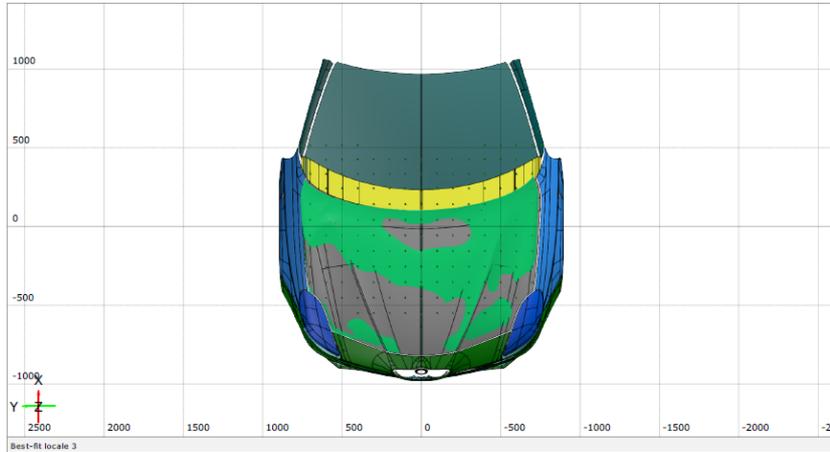


Figura 6.25: Risultato dell'allineamento della mesh del cofano 2 rispetto al modello CAD della vettura.

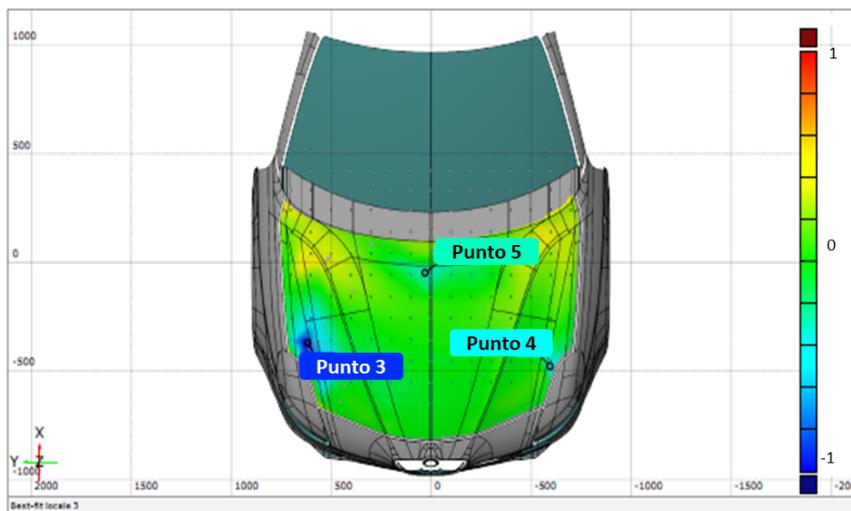


Figura 6.26: Rappresentazione degli affondamenti lungo z sul cofano 2 (tre punti di impatto).

- $z_3 = -0,88$ ;
- $z_4 = -0,43$ ;
- $z_5 = -0,28$ .

L'affondamento maggiore corrisponde al punto 3 posto sulla parte centrale del cofano, il minore corrisponde al punto 5 prossimo al parabrezza. La qualità dell'allineamento è confermata perché il bordo anteriore del cofano, rispetto al quale si esegue l'allineamento, resta indeformato rispetto al CAD sottostante.

### 6.3.3 Correlazione tra gli affondamenti reali e il risultato FEM

I due cofani testati sono stati scansionati a seguito della prova rilevandone gli affondamenti dovuti alle deformazioni plastiche residue. Non è stato possibile individuare una relazione tra il valore di HIC ottenuto nei diversi punti soggetti all'urto e lo spostamento misurato dallo scanner perché lo strumento non rileva l'affondamento massimo complessivo che comprende anche la componente elastica. Infatti, spesso si verifica un completo ritorno elastico a seguito dell'urto e il cofano appare indeformato indipendentemente dal valore di HIC misurato sull'impattore di testa.

Sono stati confrontati gli affondamenti finali dovuti alle deformazioni plastiche residue misurate sperimentalmente e quelli ottenuti dal corrispondente modello di calcolo agli elementi finiti. Di seguito sono riportate le mappe cromatiche ricavate con il software *ATOS Professionale 2016* del cofano 1 e del cofano 2 a confronto con i corrispondenti *contour plot* ottenuti dal *Laboratorio di CAE (Computer Aided Engineering)* del Centro Sicurezza FCA. Per ogni punto è stato confrontato l'affondamento massimo residuo ed è stato calcolato lo scostamento percentuale tra i due risultati. Se lo scostamento percentuale ha segno positivo si intende che l'affondamento calcolato con il modello FEM è maggiore di quello misurato con lo scanner. Per ragioni di riservatezza è stata omessa l'unità di misura e le scale sono state normalizzate. In particolare gli affondamenti normalizzati ottenuti con la simulazione FEM per ogni punto testato sono i seguenti:

- $z_1 = -1,48$ ;
- $z_2 = -0,55$ ;
- $z_3 = -0,96$ ;
- $z_4 = -0,42$ ;
- $z_5 = -0,28$ .

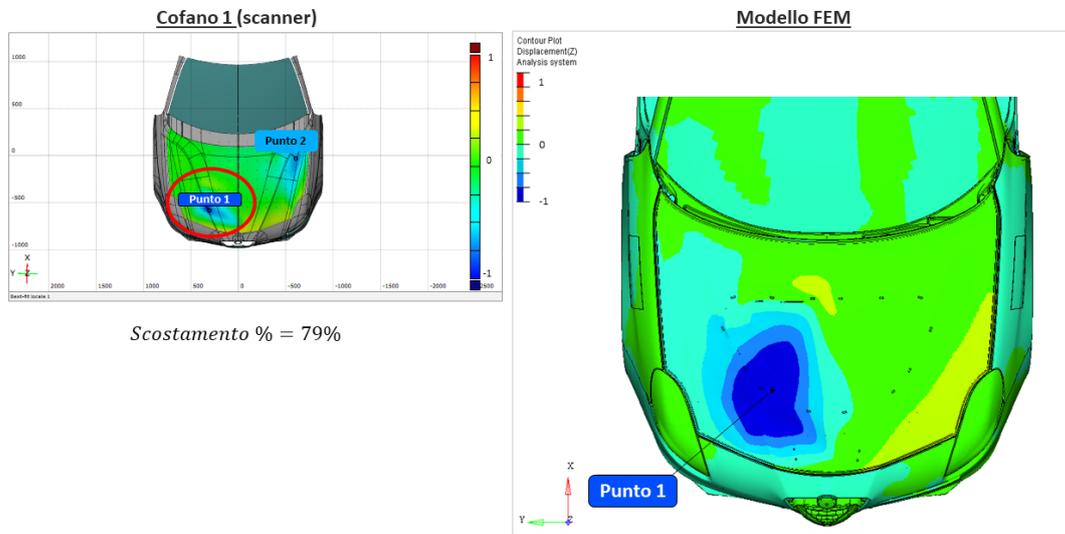


Figura 6.27: Mappe cromatiche a confronto per il punto 1 e scostamento percentuale dell'affondamento sullo stesso punto testato sul cofano 1.

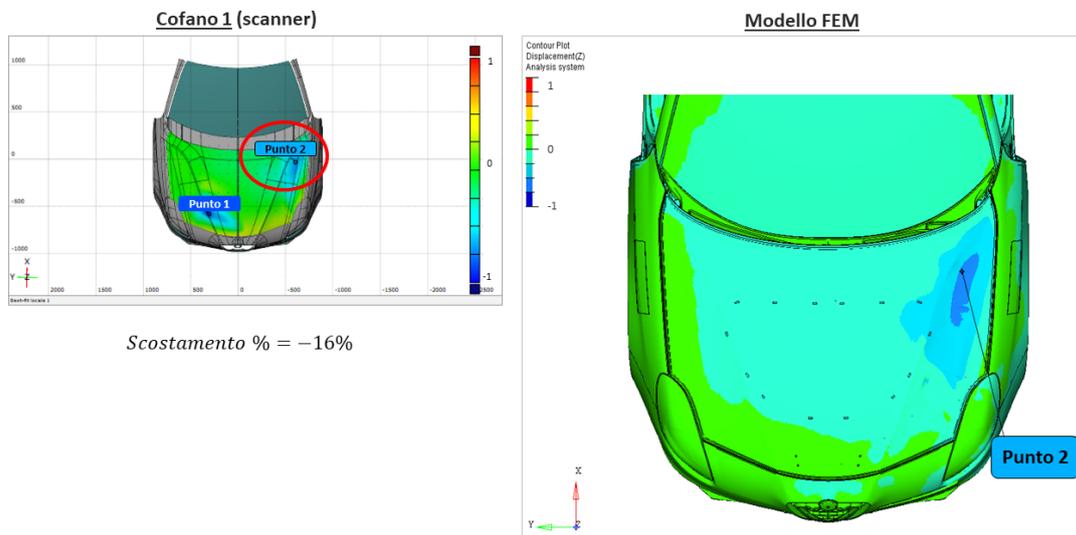


Figura 6.28: Mappe cromatiche a confronto per il punto 2 e scostamento percentuale dell'affondamento sullo stesso punto testato sul cofano 1.

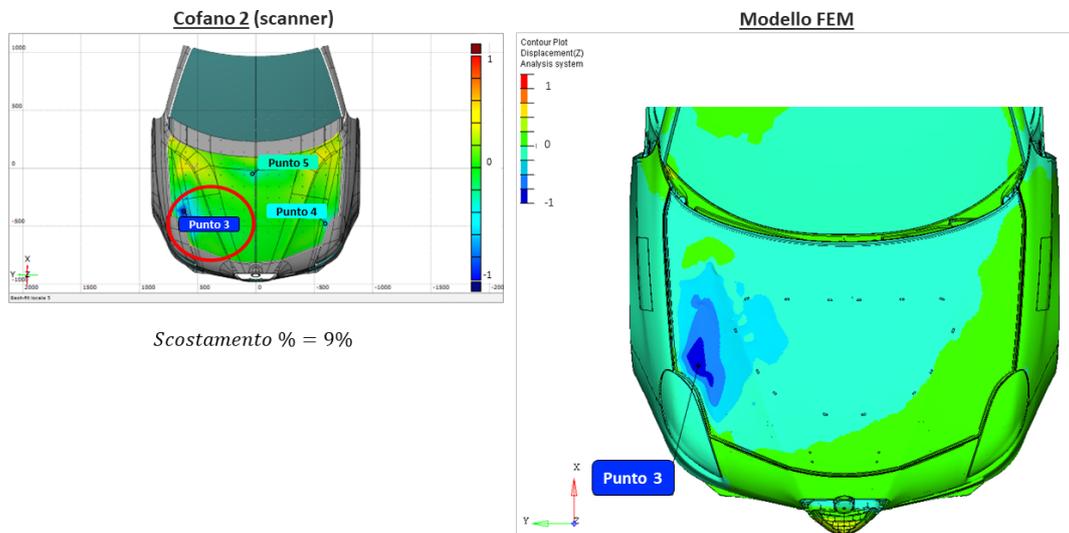


Figura 6.29: Mappe cromatiche a confronto per il punto 3 e scostamento percentuale dell'affondamento sullo stesso punto testato sul cofano 2.

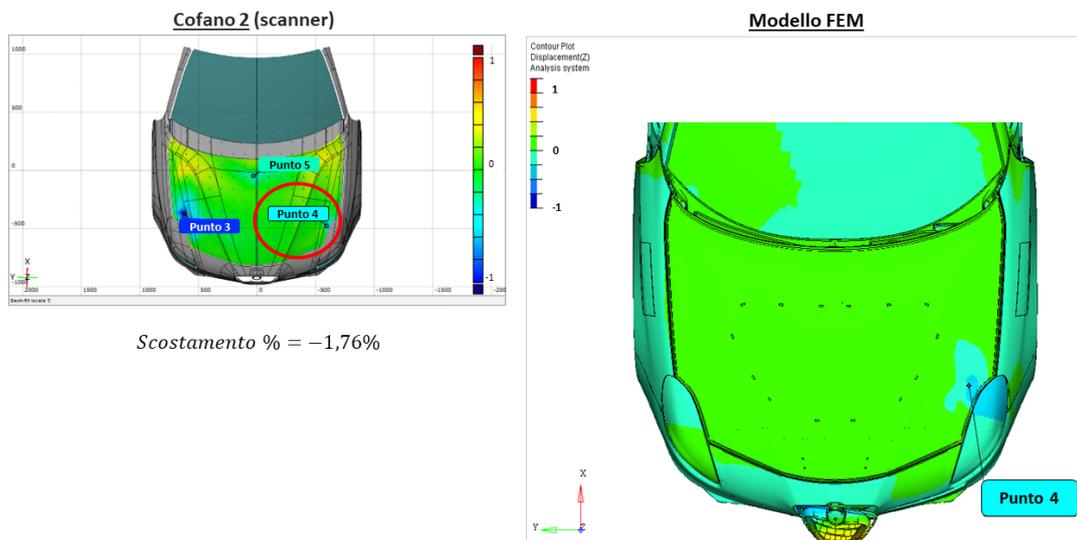


Figura 6.30: Mappe cromatiche a confronto per il punto 4 e scostamento percentuale dell'affondamento sullo stesso punto testato sul cofano 2.

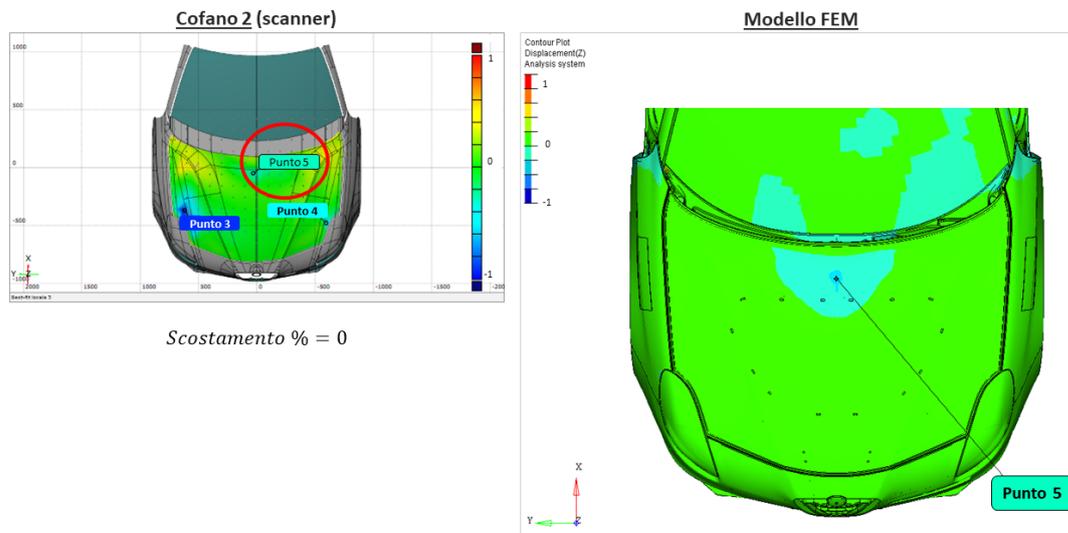


Figura 6.31: Mappe cromatiche a confronto per il punto 5 e scostamento percentuale dell'affondamento sullo stesso punto testato sul cofano 2.

Riferendosi alla figura 6.27 si rileva che lo spostamento rispetto al CAD relativo al punto 1 calcolato con metodo FEM è maggiore del 79% rispetto a quello reale misurato con lo scanner. Tale fenomeno è dovuto a differenze tra il modello FEM e il setup sperimentale. In particolare il modello FEM è costruito per prevedere accuratamente il fenomeno dell'urto testa nelle fasi di urto vero e proprio fino al massimo affondamento dell'impattore sulla *pelle*<sup>3</sup> del cofano. La simulazione FEM relativa alla fase in cui l'impattore rimbalza e si allontana dal cofano è meno precisa e il comportamento del materiale, il relativo ritorno elastico e gli affondamenti dovuti alle deformazioni residue presentano scostamenti consistenti da quanto avviene in realtà. Vi sono alcuni componenti che nel modello di calcolo FEM vengono semplificati. È il caso dei tamponi del cofano che sono costruiti per lavorare bene se sottoposti a sollecitazioni a compressione. Durante la fase di ritorno elastico non si comportano come avviene realmente. Inoltre i giochi profilo nella simulazione FEM sono nominali e perfetti, ma in realtà ciò non si verifica. Tali considerazioni sono valide in generale, anche per gli altri punti analizzati. Tuttavia nel caso del punto 1 lo scostamento è molto più evidente che negli altri casi perché il punto testato si trova in prossimità della zona di pelle sotto cui è fissata l'*ossatura*<sup>4</sup> con delle cosiddette *colle*. Nella simulazione FEM le *colle* sono progettate in modo che l'*ossatura* non si distacchi mai dalla *pelle*, ma ciò sperimentalmente può accadere. In figura 6.32 è riportato il confronto tra l'*ossatura* del modello FEM e quella del pezzo reale a seguito dell'urto.

Dopo l'urto sul modello reale la *pelle* ha subito un maggiore ritorno elastico produ-

<sup>3</sup>La superficie esterna del cofano.

<sup>4</sup>Elemento di irrigidimento.

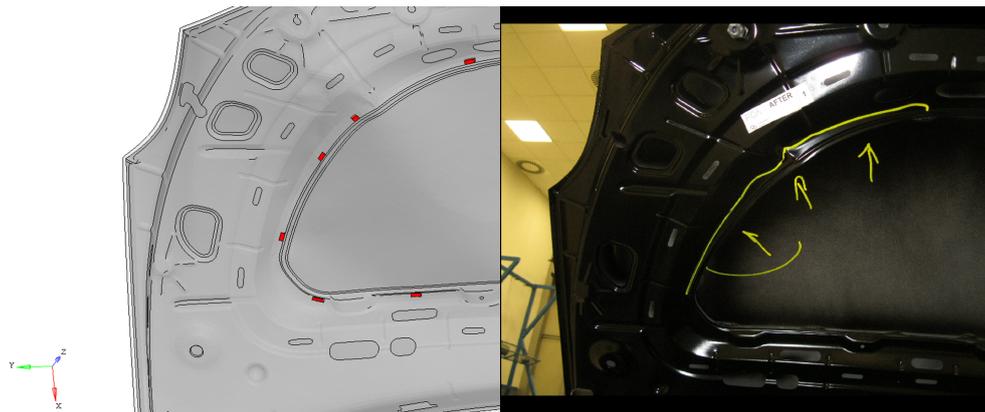


Figura 6.32: Confronto tra l'ossatura del modello FEM (le colle sono rappresentate dagli elementini in rosso) e quella del cofano reale.

cedo un affondamento residuo minore rispetto al calcolo. Nella simulazione l'ossatura, consentendo un minore ritorno elastico, trattiene anche la pelle generando un affondamento maggiore.

Nel grafico in figura 6.33 sono riportati, per ogni punto testato, gli scostamenti percentuali in valore assoluto. Allontanandosi dalla zona di cofano influenzata dall'effetto delle colle tra pelle e ossatura (figura 6.34) lo scostamento diminuisce e la corrispondenza dei risultati diventa più accurata. Nel punto 5 l'affondamento massimo reale coincide con quello della simulazione.

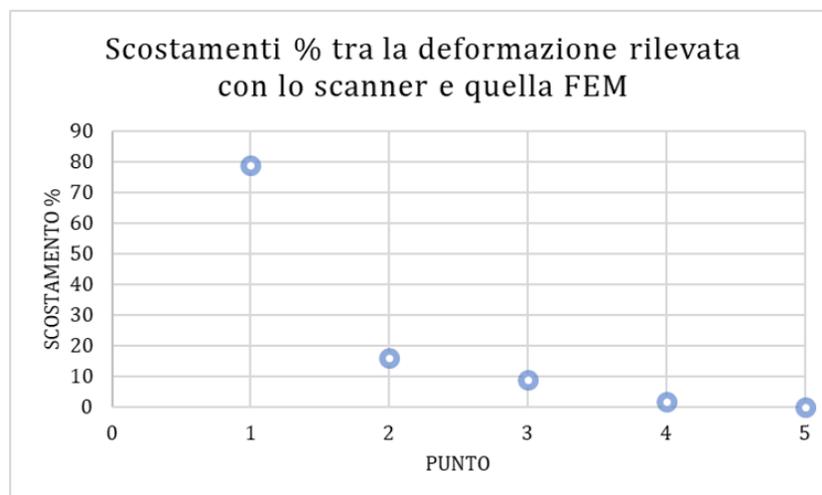


Figura 6.33: Scostamenti percentuali per ogni punto testato tra l'affondamento reale misurato con lo scanner e quello calcolato dal modello FEM.

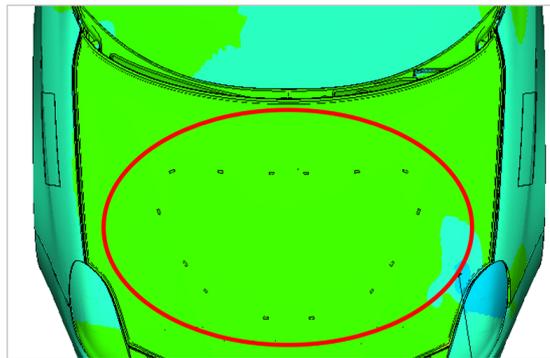


Figura 6.34: Area di cofano influenzata dall'effetto delle *colle* tra *pelle* e *ossatura*.



## Capitolo 7

# *ATOS Core 500 per reverse engineering su componenti*

Lo scanner *ATOS Core 500* è risultato efficace per eseguire operazioni di *reverse engineering* nel caso in cui non si disponga del modello CAD dell'oggetto. Di seguito si riportano alcuni esempi di *reverse engineering* su oggetti di diversa natura e per scopi differenti.

### 7.1 Bombole di GPL per autoveicolo

Su richiesta del *Laboratorio di layout* del Centro Sicurezza FCA sono state eseguite le scansioni di due bombole simili di GPL per autoveicolo (bombola 1 e bombola 2) differenti solo per le modalità di esecuzione delle saldature. Occorreva confrontare gli effetti di un urto eseguito con un maglio su ciascuna di esse in punti corrispondenti e con modalità analoghe al fine di confrontarne gli effetti deformativi. La zona misurata è stata limitata, in particolare, a quella interessata dall'urto. Per effettuare il confronto, per la bombola 1 è stata calcolata la mesh rappresentativa della superficie, mentre per la bombola 2 è stato ottenuto il modello CAD (figure 7.1).

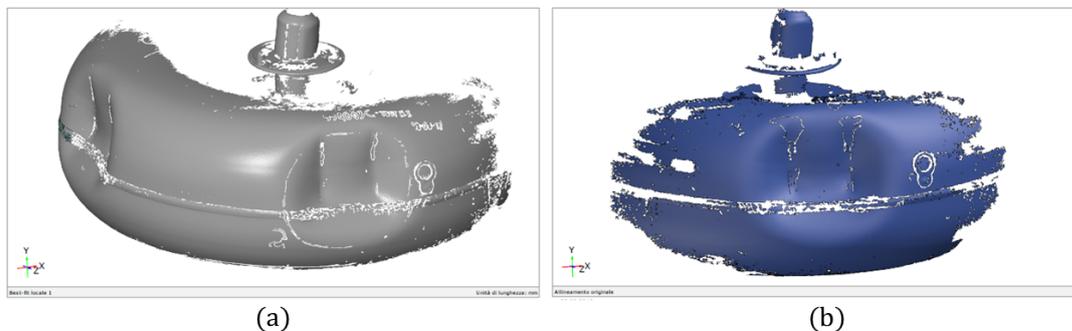


Figura 7.1: Mesh della bombola 1 (a) e modello CAD della bombola 2 (b).

Il software ha calcolato, nello stesso sistema di riferimento, gli spostamenti relativi fra i due modelli attribuendo valore positivo quando la mesh (bombola 1) è soprastante il modello CAD (bombola 2) e negativo viceversa. Dalla mappa in falsi colori di figura 7.2 si può osservare che nelle zone in rosso (deviazioni relative positive) la bombola 2 si è deformata più della bombola 1. Viceversa nelle zone blu (deviazioni relative negative) la bombola 1 si è deformata più della bombola 2.

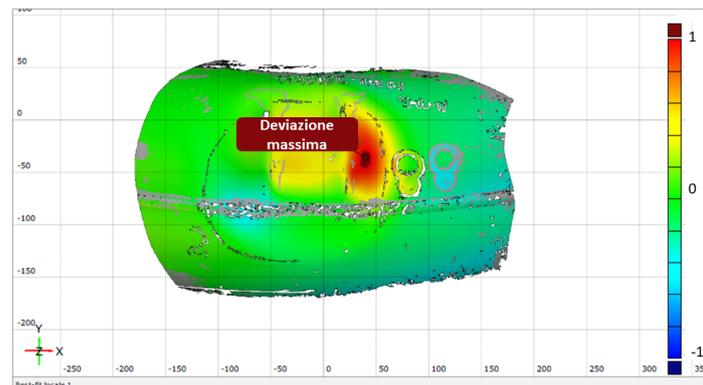


Figura 7.2: Mapa in falso colore delle deviazioni della bombola 2 sulla bombola 1.

I risultati sono stati oggetto delle valutazioni da parte del *Laboratorio di layout*.

## 7.2 Modello di impattore di bacino

Su richiesta del *Laboratorio di CAE (Computer Aided Engineering)* del Centro Sicurezza FCA è stata eseguita con lo scanner *ATOS Core 500* la scansione di un impattore di bacino *fake* realizzato appositamente per una prova di caratterizzazione di un paraurti su vettura per confrontare i risultati sperimentali con quelli ottenuti dal calcolo. Esso è costituito da un corpo cilindrico (in alluminio) che impatta contro il paraurti e da un supporto posteriore (in acciaio e alluminio) che ne consente il fissaggio al banco di prova (figura 7.3).

La scansione è stata eseguita ai fini di *reverse engineering* per ricavare la geometria del supporto retrostante l'elemento cilindrico. Il risultato dell'acquisizione è riportato in figura 7.4 in due viste differenti. È stata utilizzata la modalità di misura descritta nella sezione G del manuale d'uso [18], ovvero misurando prima la superficie superiore e poi quella inferiore. L'oggetto è stato misurato su entrambi i lati creando due diverse *Serie di misure*, relative alla superficie superiore e inferiore, che tramite marker di riferimento comuni vengono composte allineandole in modo corretto l'una all'altra.

L'impattore è stato misurato su un piano contenente i marker. Sul componente sono stati applicati altri marker adesivi (almeno tre) in modo da risultare visibili in entrambe le misure (superiore e inferiore). Una volta realizzate le due *Serie di misure* è

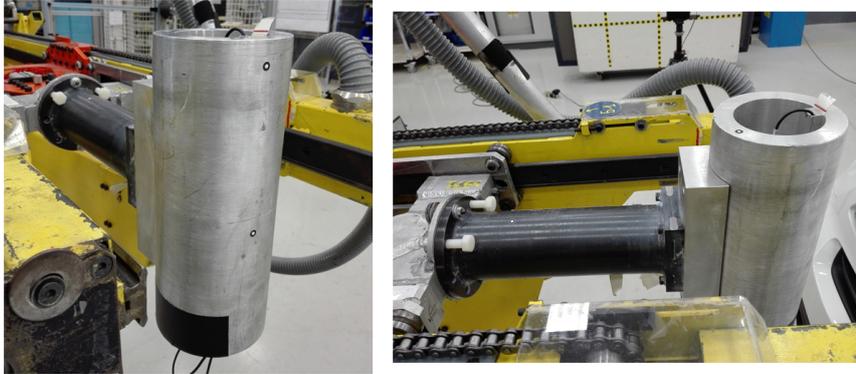


Figura 7.3: Impattore di bacino *fake*.

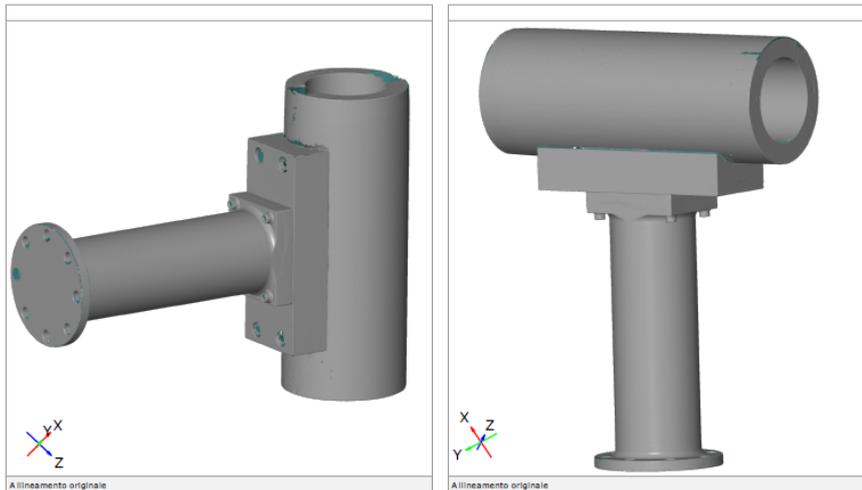


Figura 7.4: Risultato della scansione dell'impattore di bacino *fake* per il *Laboratorio di CAE* in due viste differenti.

stata rimossa da entrambe l'immagine del piano di appoggio utilizzando un apposito comando per il taglio che elimina porzioni sottostanti a un piano predefinito. In seguito le due acquisizioni sono state fatte corrispondere utilizzando i punti di riferimento comuni.

## Capitolo 8

# Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scanner *ATOS Core 500* della GOM è stato impiegato durante alcune prove sperimentali svolte nel Centro Sicurezza FCA per l'analisi degli spostamenti sul puntone della prima linea di carico a seguito di un urto a bassa velocità su due auto di identico modello (Modello 1) per testare il comportamento di un nuovo tipo di traversa sacrificale prototipale. Lo stesso urto è stato provocato su una terza vettura di Modello 2 osservandone gli spostamenti sul corrispondente elemento i cui risultati massimi sono riportati in tabella 8.1.

Per ragioni di riservatezza i valori numerici sono stati normalizzati e adimensionalizzati.

Tabella 8.1: Confronto tra la deviazione massima rilevata sui tre puntoni della prima linea di carico per il Modello 1 e il Modello 2.

|                                    | Modello 1 |         | Modello 2 |
|------------------------------------|-----------|---------|-----------|
|                                    | Prova 1   | Prova 2 |           |
| <b>Spostamento massimo puntone</b> | 0,71      | 0,40    | -         |

Lo spostamento massimo lungo l'asse x è maggiore sulla prima vettura testata di Modello 1, mentre sul Modello 2 è nulla. L'obiettivo delle prove sul Modello 1 è stato quello di studiare il comportamento di un prototipo sperimentale di una nuova traversa sacrificale che però ha dato esito negativo nei test a causa della rotazione elevata della flangia del puntone.

Lo scanner si è rivelato idoneo per l'analisi di tali spostamenti lungo l'asse x definito nel sistema di riferimento riportato in figura 5.11. Considerata la dinamica dell'urto tale direzione si può ritenere la più significativa: la maggior parte dell'energia si dissipa, infatti, lungo il puntone verso la parte posteriore del veicolo. Il modello del componente ricostruito dal software ha permesso di visualizzarne in modo accurato la deformazione

fisica generata dall'urto potendolo analizzare separatamente dal resto della vettura. Lo scanner ottico utilizzato nel presente studio ha fornito ulteriori informazioni rispetto a quelle ricavabili con i metodi tradizionali. Per ottenere migliori risultati occorre che l'oggetto del rilievo sia accessibile otticamente eliminando quegli elementi che ne limitano la visibilità. Infatti nel caso dell'urto assicuratori, sia sul Modello 1 che sul 2, per il puntone della prima linea di carico sarebbe stato opportuno smontare il proiettore, i cavi e il parafango, oltre al paraurti e alla traversa. In tal modo si sarebbe ottenuto un modello del componente meglio visibile da ogni angolazione. Nel caso del solo Modello 2 sarebbe stato opportuno rimuovere anche il *vertical link*.

Si conclude che lo scanner *ATOS Core 500* fornisce una misura accurata delle deviazioni rispetto al modello CAD di riferimento valutate lungo un asse prefissato, sia nel caso di urto frontale che posteriore. Tuttavia a causa della complessità geometrica delle superfici indagate e della difficoltà di scansione delle zone poco accessibili otticamente i risultati non sono pienamente soddisfacenti nelle parti che risentono maggiormente degli effetti di queste circostanze (zona posteriore della flangia). Il software non trovando corrispondenza nei punti in cui vi sono irregolarità superficiali, per i motivi detti sopra, non è in grado di fornire un risultato accettabile. Nel caso della parte posteriore della vettura i risultati ottenuti appaiono coerenti e compatibili con le modalità di esecuzione dell'urto.

Lo scanner è stato utilizzato nelle operazioni di tracciatura dei veicoli nell'urto pedone. In particolare è stata impiegata la sonda in dotazione per individuare le coordinate dei punti costituenti la griglia delle aree di impatto bacino e gamba su un paraurti (Modello 3). Mediante il software sono state memorizzate le coordinate acquisite nel sistema di riferimento convenzionale per le vetture rappresentato in figura 5.11. La procedura è risultata accurata e ha consentito di esportare le coordinate dei punti acquisiti in formati compatibili con i fogli di calcolo così da facilitarne l'elaborazione. Per accelerare le operazioni si potrebbe ricorrere all'uso di altri modelli della serie GOM che permettono un volume di misura più ampio rispetto a quello utilizzato in questo studio riducendo il numero delle inquadrature necessarie e dei punti di definizione delle superfici occorrenti per l'acquisizione tramite Touch Probe (figura 2.21).

È stata utilizzata la funzione di proiezione in ambiente LIVE del software *ATOS Professional 2016* per la tracciatura dell'area di impatto per l'urto testa su una vettura (Modello 6) sia in presenza della fascia di cartone prevista dalla procedura operativa interna riguardante la normativa [4] sia in assenza. Nel primo caso le sezioni longitudinali e trasversali costituenti la griglia di tracciatura sono state proiettate in corrispondenza dell'avvallamento tra cofano e parabrezza senza produrre distorsioni perché la presenza della sagoma di cartone ha ripristinato la continuità tra i piani. Nel secondo caso,

in assenza della fascia di cartone, la proiezione sulla zona di passaggio da cofano a parabrezza è apparsa distorta a causa della sovrapposizione delle sezioni su piani a quote differenti (lungo z). In entrambi i casi invece la proiezione su un'inquadratura sufficientemente distante dal bordo posteriore del cofano è risultata accurata e facile da riprodurre sul cofano stesso. Per rendere più rapida la tracciatura con la proiezione della griglia si potrebbe ricorrere a uno strumento con un volume di misura più ampio in modo da proiettare la griglia su un'area più estesa.

Lo scanner in esame è stato utilizzato per valutare i punti delle aree di impatto testa-cofano modellando l'urto mediante il software in dotazione imponendo valori predefiniti dei livelli di affondamento del cofano per i due modelli esaminati (Modello 4 e Modello 5) secondo le direzioni definite dalla normativa [3] ("Annex 5", paragrafi 4.7 e 5.7). Il software *ATOS Professional 2016* ha fornito i risultati necessari tramite la misura delle aree interferenti tra cofano e volumi del sottostante vano motore (paragrafo 6.2). La percentuale di area interferente è riportata in tabella 8.2 sia per il Modello 4 che per il Modello 5.

Tabella 8.2: Percentuale di area interferente risultante per il Modello 4 e il Modello 5.

|                            | Modello 4         | Modello 5         |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>% Area interferente</b> | 26,74% (< 33,33%) | 29,71% (< 33,33%) |

Nel caso del Modello 4 sono presenti sia l'area di impatto *Child* che l'area *Adult*, perciò l'area interferente complessiva tiene conto di entrambe e la percentuale totale deve risultare minore del 33,33%. Sul Modello 5, invece, è presente solo l'area di impatto *Child*. Per entrambi i modelli, dunque, sono rispettate le condizioni di validità richieste dalla normativa [3]. Si può concludere che il software *ATOS Professional 2016* ha permesso di analizzare la distribuzione delle predette aree sul cofano per l'impatto testa in maniera accettabile.

Lo scanner *ATOS Core 500* è stato utilizzato anche per l'analisi degli affondamenti residui sulle aree di impatto testa di due cofani (Modello 3) nel caso di urto pedone. La maggior parte dell'affondamento è localizzata lungo la verticale e i risultati forniti dal software sono stati adeguatamente accurati. L'affondamento residuo non è correlabile al valore di HIC ottenuto sui punti testati perché tale indice è legato all'accelerazione misurata sulla testa nel momento di massimo affondamento durante l'impatto. Il valore di spostamento misurato dallo scanner non comprende la componente dovuta alla deformazione elastica che a seguito dell'urto viene completamente recuperata. A volte capita che dopo l'impatto non vi siano alcuni affondamenti residui sulla superficie del cofano stesso.

Gli affondamenti risultanti sulla *pelle* del cofano a seguito delle prove sono stati

confrontati con i corrispondenti calcolati tramite simulazione agli elementi finiti. In tabella 8.3 sono riportati gli affondamenti normalizzati e adimensionalizzati di ogni punto testato e il corrispondente scostamento percentuale rispetto al modello di calcolo.

Tabella 8.3: Affondamenti adimensionalizzati e normalizzati sui cofani 1 e 2 di Modello 3 su ogni punto testato e relativo scostamento percentuale rispetto al modello di calcolo.

|          | Punto | Affondamento scanner normalizzato | Affondamento FEM normalizzato | Scostamento % |
|----------|-------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Cofano 1 | 1     | -0,83                             | -1,48                         | 78,79         |
|          | 2     | -0,65                             | -0,55                         | 15,93         |
| Cofano 2 | 3     | -0,88                             | -0,96                         | 9,09          |
|          | 4     | -0,43                             | -0,42                         | 1,76          |
|          | 5     | -0,28                             | -0,28                         | 0             |

Lo scostamento percentuale si riduce per i punti testati sufficientemente lontani dall'area di cofano influenzata dall'effetto delle *colle* tra *pelle* e *ossatura* (figura 6.34). Inoltre il modello FEM è stato progettato per funzionare al meglio durante la fase di urto fino al massimo affondamento dell'impattore testa sul cofano. Dopo il distacco dal cofano il modello è meno curato perché ai fini del calcolo FEM dell'HIC l'informazione utile da rilevare è il massimo affondamento durante l'impatto. Per ridurre ulteriormente lo scostamento bisognerebbe migliorare il modello FEM anche nella fase successiva all'urto e creare un modello di *colle* in grado di simulare anche la condizione di distacco, perché quello attuale prevede che queste restino sempre adese.

Infine, lo scanner è stato utilizzato efficacemente in operazioni di *reverse engineering* su componenti, su richiesta di altri laboratori del Centro Sicurezza FCA. In primo luogo, sono state confrontate due bombole di GPL deformate a seguito di un urto provocato con la stessa modalità. Le due scansioni sono state allineate in modo da far corrispondere i punti di impatto ed è stata calcolata la deformazione relativa dell'una rispetto all'altra. Successivamente è stata effettuata anche la scansione di un impattore di baci-no *fake* per ottenere una mesh da esportare in un ambiente di calcolo agli elementi finiti.

Per ampliare i campi di impiego si potrebbe ricorrere ad ulteriori software della serie GOM (per esempio *PONTOS Live*) con i relativi strumenti (per esempio il sistema *TRITOP*) in modo da rendere più efficace l'acquisizione LIVE di oggetti in movimento. Infatti lo strumento e il software utilizzati in questo studio non consentono l'analisi *real time* di componenti in rapido movimento, né di registrare la variazione delle coordinate dei punti di inseguimento (paragrafo 2.2.3).

**Allegato A**

**Tutorial per l'utilizzo di *ATOS Core 500* e *ATOS Professional 2016***



## Tutorial per l'uso di ATOS Core 500 e ATOS Professional 2016

Elena Lomurno

Torino

## Indice

---

- Componenti hardware
- Software ATOS Professional 2016
- Calibrazione

## Componenti hardware

- Cos'è ATOS Core 500?
  - Strumenti in dotazione

## Componenti hardware

- Cos'è ATOS Core 500?

Si tratta di uno scanner che esegue misure su oggetti medio – piccoli in tre dimensioni.



## Componenti hardware

- Cos'è ATOS Core 500?
  - Strumenti in dotazione

### SUPPORTO



### SONDA E MARKER



### PC E TELECOMANDO



5

## Software ATOS Professional 2016

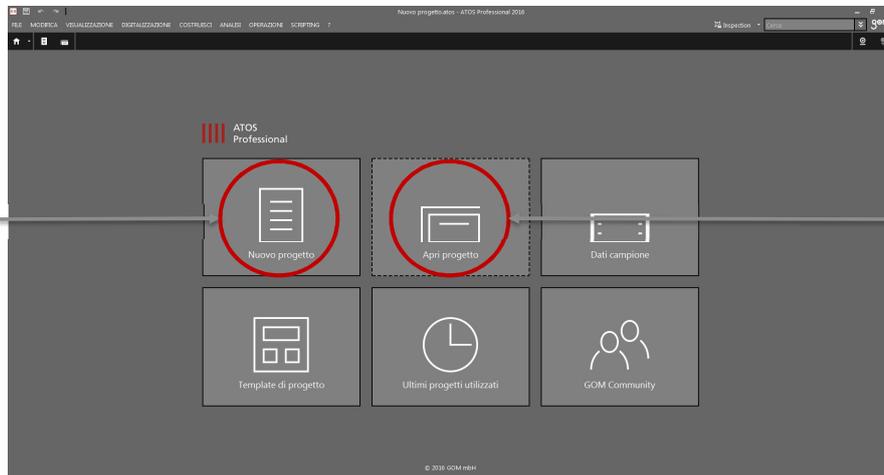
- Schermata iniziale
  - Ambiente di lavoro DIGITALIZZA
  - Ambiente di lavoro LIVE
  - Allineamento
  - Ambiente di lavoro ANALISI

6

## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale

Per creare un nuovo progetto.

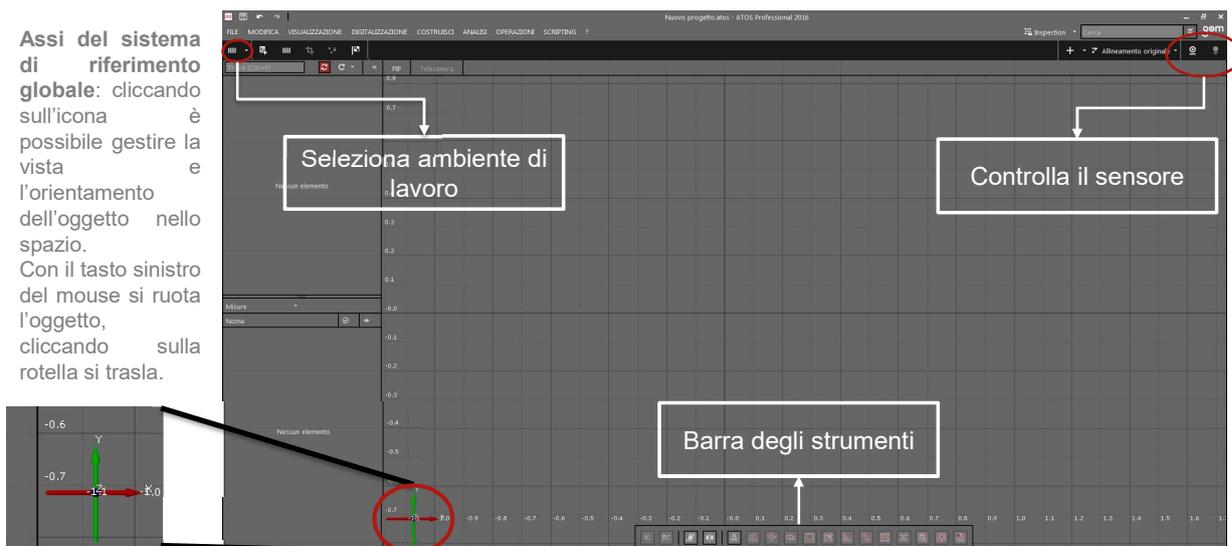


Per aprire un progetto esistente.

## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale

**Assi del sistema di riferimento globale:** cliccando sull'icona è possibile gestire la vista e l'orientamento dell'oggetto nello spazio. Con il tasto sinistro del mouse si ruota l'oggetto, cliccando sulla rotella si trasla.

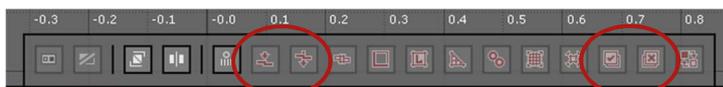


## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale

Per effettuare la scansione bisogna inizializzare il sensore, dopo averlo collegato (clic su icona nel cerchio 1). Per scaldarsi impiega circa 20 minuti. Cliccando sull'icona nel cerchio 2 è possibile spegnere/accendere la luce blu.

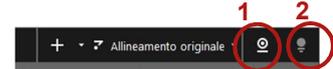
### Barra degli strumenti



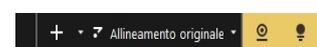
Per selezionare una parte di oggetto.

Per (de)selezionare l'intero oggetto.

### Sensore staccato



### Sensore in fase di inizializzazione



### Sensore pronto per l'uso



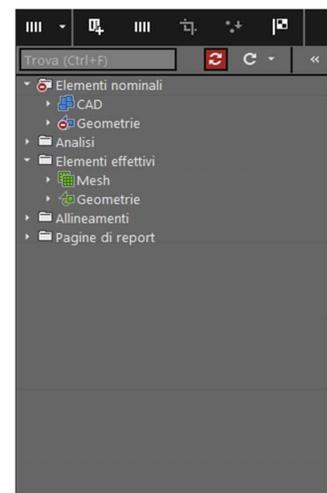
## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale



Nel riquadro a sinistra, i vari elementi presenti nel progetto vengono suddivisi in categorie. A destra si riporta un esempio di suddivisione.

Attenzione: distinguere «elementi effettivi» da «elementi nominali». Gli «elementi effettivi» comprendono le «serie di misure» (le scansioni) e le mesh create; gli «elementi nominali» comprendono i CAD creati dalle mesh oppure importati.



## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale

È possibile importare/esportare dei file quali mesh, CAD, geometrie, scansioni e altri in diversi formati. Dopo aver eseguito l'analisi delle deformazioni si può elaborare un report da esportare come PDF.

### Formati principali

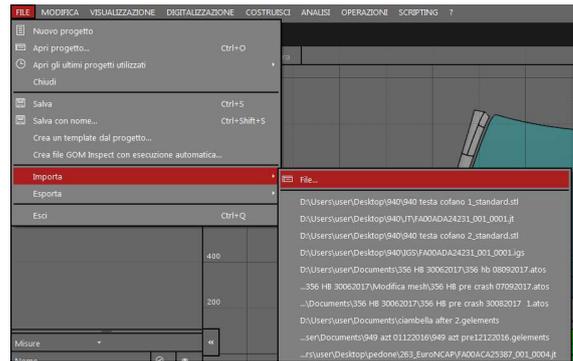
MESH

G3D, STL, POL, PLY, JT – Open

GEOMETRIA

CSV, ASCII, VDA/PSET, IGES, XML

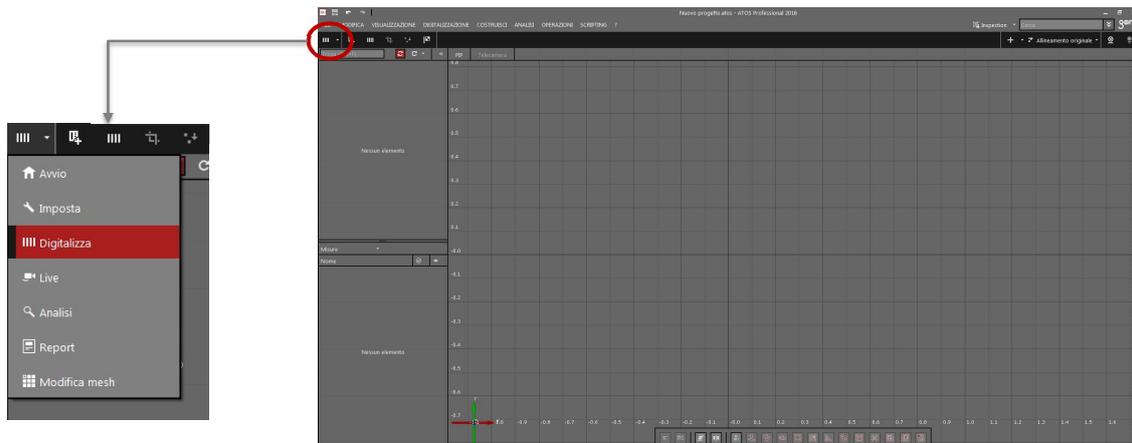
### Sequenza di comandi: FILE, IMPORTA/ESPORTA



## Software ATOS Professional 2016

### ■ Schermata iniziale

- Ambiente di lavoro DIGITALIZZA

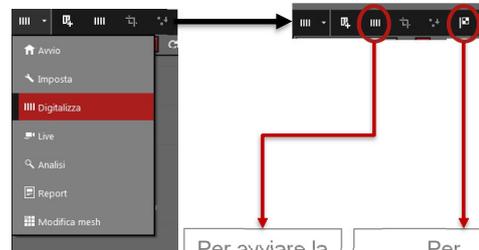


## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro DIGITALIZZA

In questo ambiente è possibile avviare la scansione dell'oggetto di interesse, creando una «Serie di misure» che farà parte degli «Elementi effettivi».

**La scansione deve essere effettuata in modo che siano visibili sempre almeno tre marker di posizione nota**, per consentire l'allineamento tra una porzione di oggetto scansionato e la successiva.



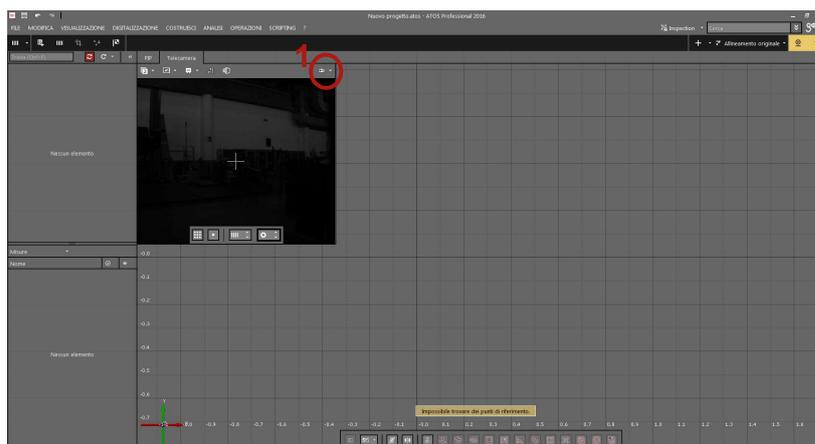
Per avviare la scansione. Si può usare anche la freccia destra del telecomando.

Per poligonalizzare la scansione e creare la mesh (elemento effettivo).

Una volta scansionato l'oggetto è possibile trasformare la serie di misure in mesh e a sua volta in CAD.

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro DIGITALIZZA



È possibile mostrare la vista di entrambe le telecamere o di una delle due tramite il comando nel cerchio 1 oppure tramite il tasto in basso a destra del telecomando.

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro DIGITALIZZA
  - Parametri di scansione



1. **Tempo di esposizione:** con un solo tempo, lo scanner effettua una scansione unica di durata regolabile dall'utente, altrimenti ne effettua due o tre. È possibile impostare i tempi di esposizione in modo manuale.
2. **Tempo di esposizione per la misura:** con la rotella del mouse si modificano le zone più o meno esposte.
3. **Tempo di esposizione dei punti di riferimento:** con la rotella del mouse si modifica il tempo di esposizione dei marker; se risultano a «basso contrasto» bisogna aumentarlo, se risultano «sovraesposti» bisogna diminuirlo.

Attenzione: il colore della superficie da misurare contribuisce alla variazione dei parametri sopra descritti. In particolare, le superfici molto riflettenti oppure nere vanno ricoperte con spray antiriflesso per facilitare l'acquisizione e migliorarne la qualità.

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro DIGITALIZZA
  - Qualità di scansione

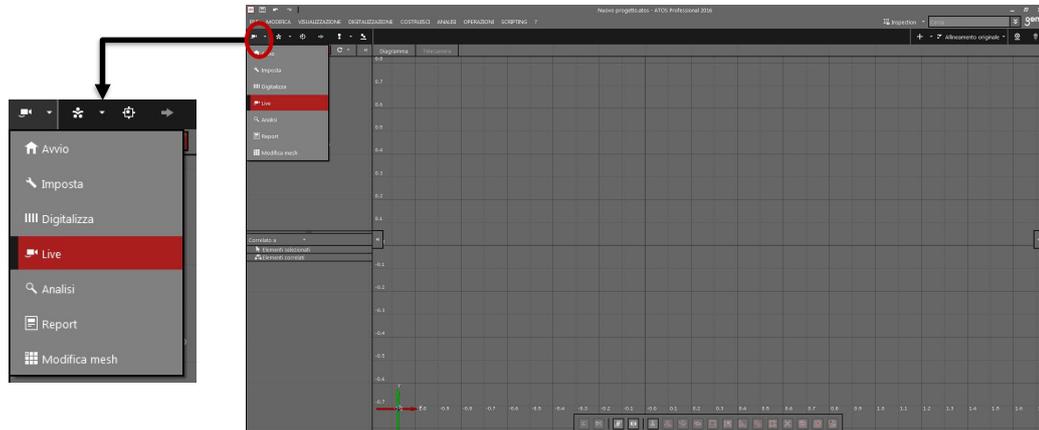


Con il doppio clic su una delle misure si possono visualizzare i parametri relativi alla qualità della scansione. Le seguenti icone sono indicative della qualità della misura.

- Qualità sconosciuta. Ricalcolare.
- Buona qualità.
- Qualità non ottimale.
- La misura non è stata trasformata.

## Software ATOS Professional 2016

- Schermata iniziale
  - Ambiente di lavoro LIVE



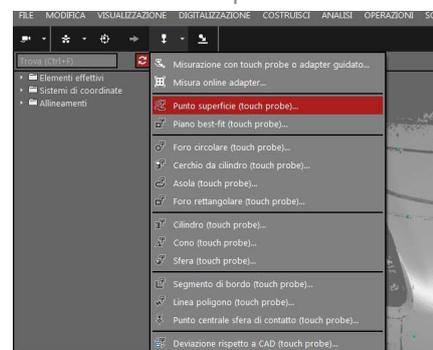
17

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe

Utilizzando la sonda in dotazione è possibile ricavare la posizione di un dato punto nello spazio appartenente al volume di misura dello scanner. Il software identifica la probe GOM tramite i diversi punti di riferimento sull'impugnatura. Calibrando la probe il software calcola la posizione della testa a partire dai punti di riferimento, conoscendo il centro e il raggio della sferetta a contatto con la superficie.

Sequenza di comandi: LIVE, MISURAZIONI CON TOUCH PROBE, PUNTO SU SUPERFICIE (TOUCH PROBE)



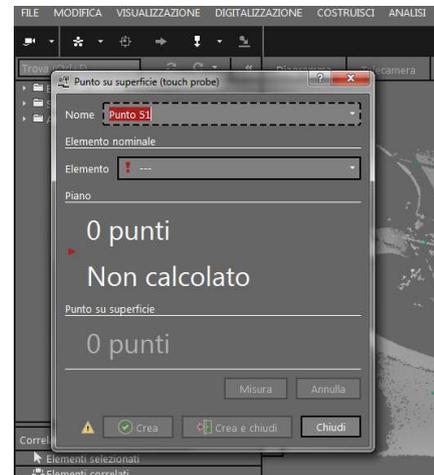
18

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe

I punti di riferimento della probe non devono appartenere alla stessa nuvola dei punti di riferimento dell'oggetto da misurare.

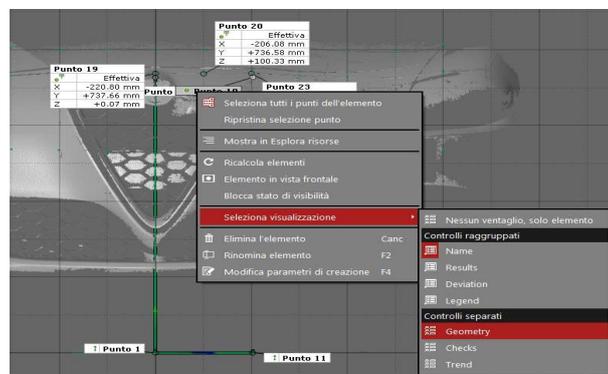
La finestra di dialogo chiede di misurare con la probe prima il piano su cui giace l'elemento da misurare: la probe legge almeno tre punti sufficientemente vicini tra loro per definire il piano. Per acquisire i punti scelti si può premere la freccia destra del telecomando. Tenendola premuta più a lungo si passa nella sezione successiva della finestra di dialogo, dove è possibile leggere e acquisire con la sonda i punti di interesse.



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe

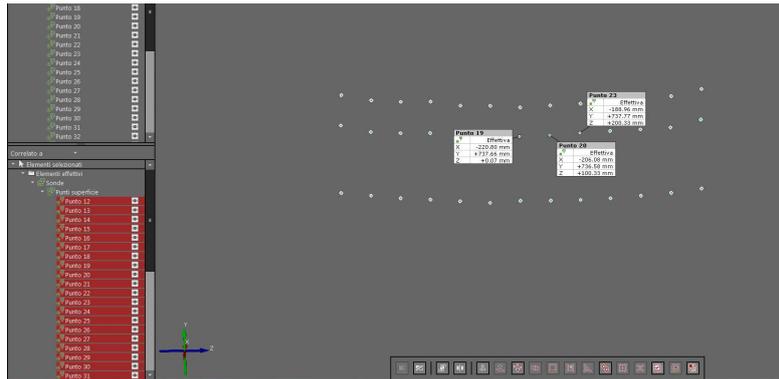
Si possono visualizzare le coordinate dei punti registrati mostrando le etichette correlate. Si clicca con il tasto destro del mouse sul punto di interesse e compare la tendina con le diverse opzioni riportata in figura.



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: esempio

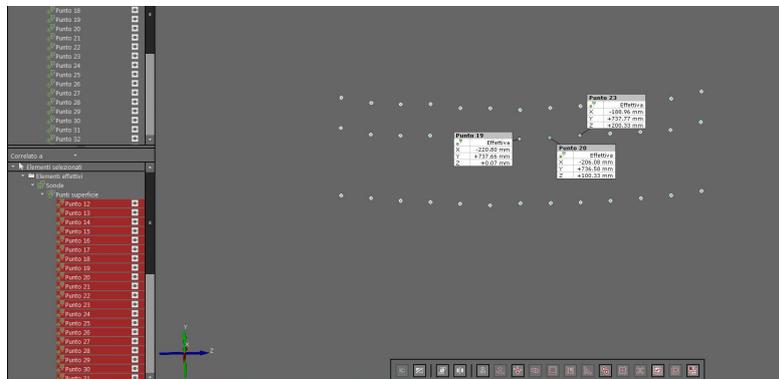
Tale metodo di misura può essere applicato a diversi casi pratici, come per esempio la tracciatura per l'urto pedone secondo la normativa EuroNCAP. Si tracciano i punti da 0 a 600 (sia positivi che negativi) a passi di 100 su WAD 930, WAD 775 e IBRL.



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: esempio

Tale metodo di misura può essere applicato a diversi casi pratici, come per esempio la tracciatura per l'urto pedone secondo la normativa EuroNCAP. Si tracciano i punti da 0 a 600 (sia positivi che negativi) a passi di 100 su WAD 930, WAD 775 e IBRL.

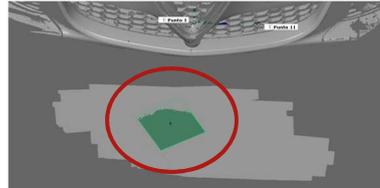


## Software ATOS Professional 2016

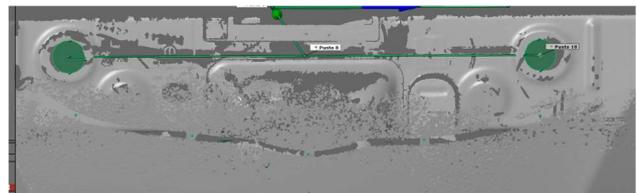
- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: nuovo sistema di riferimento

Di default il software fornisce la posizione del punto di contatto della sonda sulla superficie nel sistema di riferimento globale. Nel caso in esame è necessario costruire un nuovo sistema di riferimento coerente con quello usato normalmente per le vetture.

Si costruisce un piano a 3 punti coincidente col pavimento.



Nel vano motore dalle due asole si costruiscono due cerchi a tre punti e si individua il punto medio (COSTRUISCI, PUNTO DI DIVISIONE con posizione al 50%) della distanza tra i centri dei due cerchi.

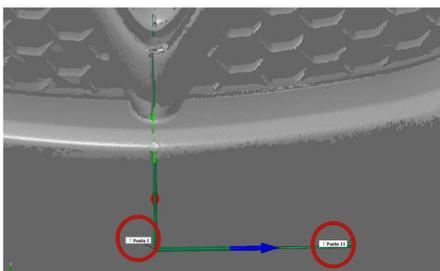


23

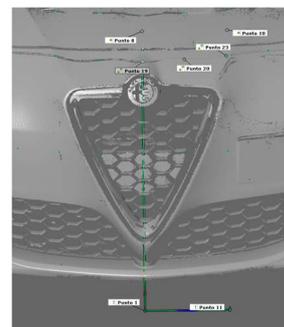
## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: nuovo sistema di riferimento

Si proiettano il punto medio costruito e uno dei due centri dei cerchi sul piano corrispondente al pavimento.



Si traccia una linea tra il punto medio tra le asole e la sua proiezione sul piano e un'altra linea tra la proiezione del punto medio e quella del centro del cerchio sul piano. Tali linee costituiscono la base per la costruzione del sistema di riferimento locale.



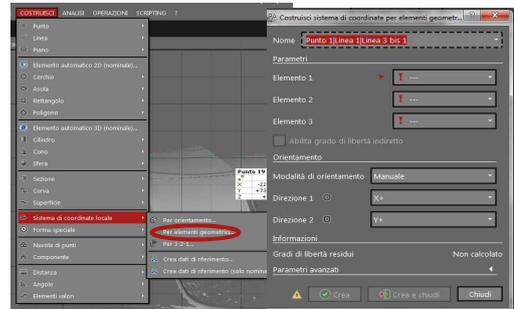
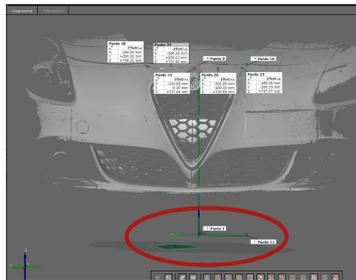
24

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: nuovo sistema di riferimento

Si costruisce il sistema di riferimento locale con la sequenza di comandi: COSTRUISCI SISTEMA DI COORDINATE LOCALE, PER ELEMENTI GEOMETRICI.

Inserire nella finestra di dialogo gli elementi costruiti in precedenza.

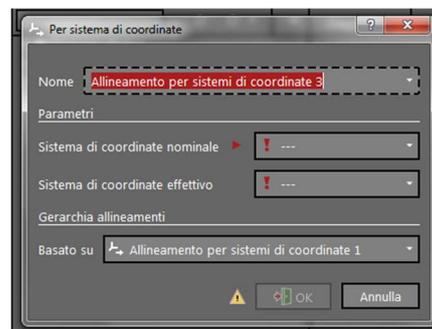


## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Calcolo della posizione con la probe: allineamento del nuovo sistema di riferimento

Una volta creato il sistema di riferimento desiderato bisogna allinearlo con quello globale del software, in modo che le coordinate visibili sulle etichette siano coerenti con il sistema di riferimento scelto.

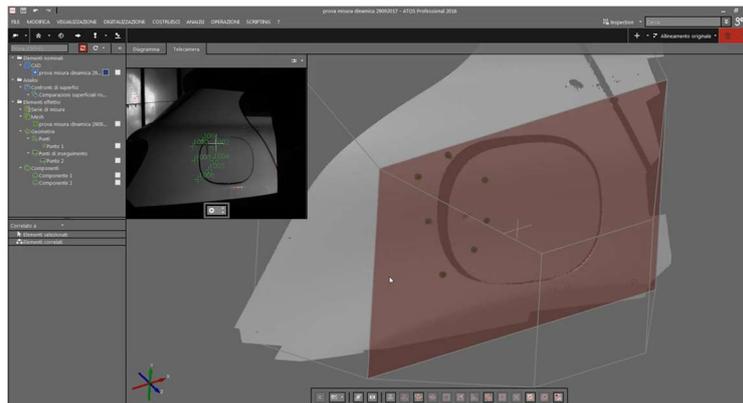
Sequenza di comandi: OPERAZIONI, ALLINEAMENTO, ALLINEAMENTO PRINCIPALE, PER SISTEMA DI COORDINATE



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Esempio di proiezione di elementi geometrici

Si possono proiettare sull'oggetto di interesse degli elementi geometrici creati appositamente sul software (punti, linee, poligoni, ecc.).

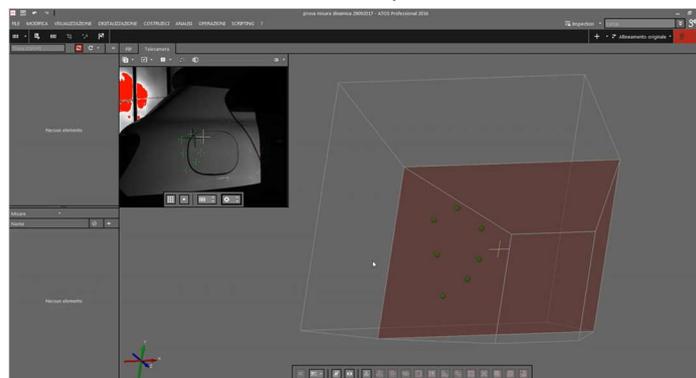


27

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Esempio di misura dinamica

È possibile rilevare gli spostamenti di un oggetto in movimento rispetto a uno di riferimento che resta fermo. I movimenti devono essere lenti e di piccola entità. Si possono seguire dei punti nel tempo e osservare come variano le coordinate, ma non se ne può tenere traccia.

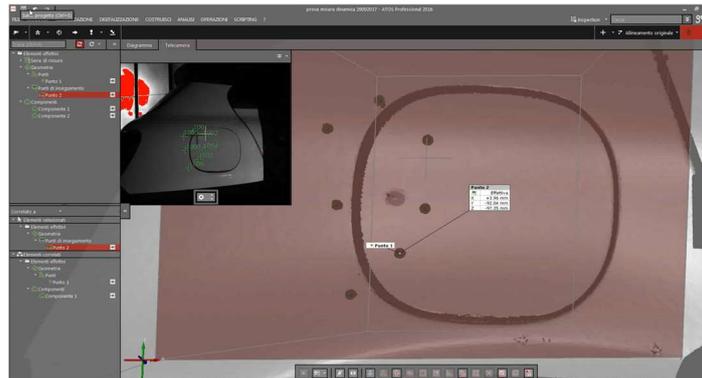


28

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro LIVE
  - Esempio di misura dinamica

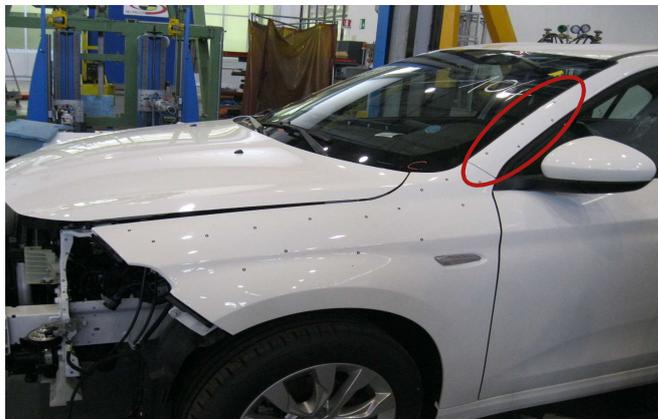
Per osservare il movimento dello sportellino e non solo la variazione delle coordinate dei punti, si crea la mesh dell'oggetto in movimento, la si trasforma in CAD e poi quest'ultimo dev'essere ritrasformato in mesh, perché l'oggetto deve essere una copia del master effettivo.



## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento

Il volume di misura dello scanner è limitato. Per oggetti grandi, come un cofano, uno sportello o simili è necessario effettuare diverse scansioni per ricostruire l'intera superficie. Occorre posizionare dei marker affinché si possa calcolare la posizione dei diversi punti nello spazio.



Se si vuole fare un confronto tra pre e post crash di alcune parti significative dell'auto (come per esempio il puntone), conviene riferire la scansione a una zona che ci si aspetta rimanga indeformata (come il montante A).

## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento
  - Metodi presenti sul software (1)

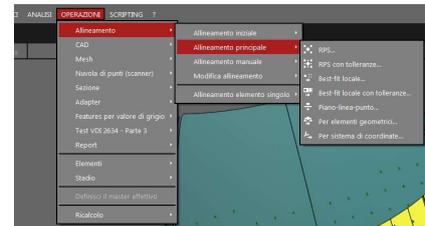
### ALLINEAMENTO INIZIALE

- Preallineamento
- Allineamento a 3 punti
- 3 – 2 – 1
- Best – fit per punti di riferimento



### ALLINEAMENTO PRINCIPALE

- RPS
- RPS con tolleranze
- Best – fit locale
- Best – fit locale con tolleranze
- Piano – linea – punto
- Per elementi geometrici
- Per sistemi di coordinate



## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento
  - Metodi presenti sul software (2)

### ALLINEAMENTO MANUALE

- Trasla
- Trasla all'elemento
- Imposta matrice
- Ruota

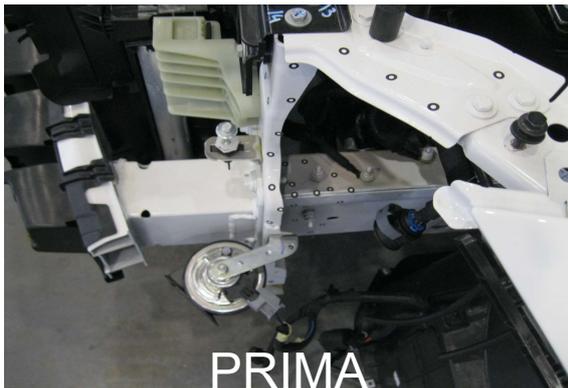


## Software ATOS Professional 2016

FCA  
ITEM

- Allineamento
  - Esempio 1

Si effettuano delle scansioni indipendenti del pezzo prima e dopo il crash e poi tramite il software si riallineano prendendo come riferimento dei punti che sono rimasti indeformati.

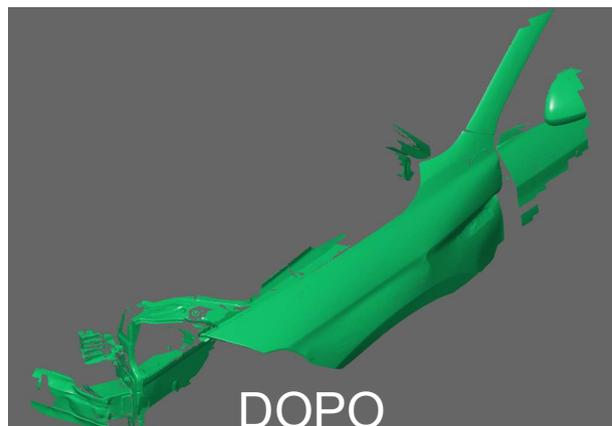
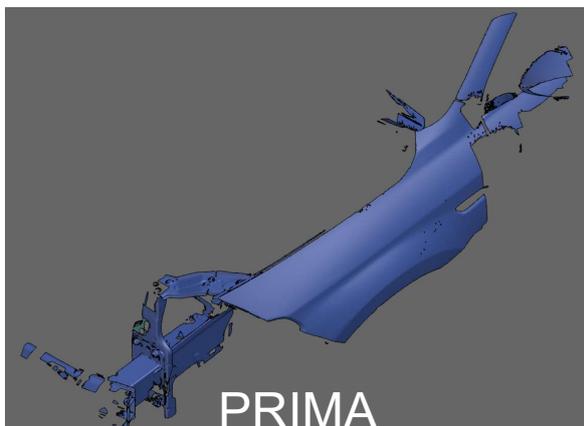


33

## Software ATOS Professional 2016

FCA  
ITEM

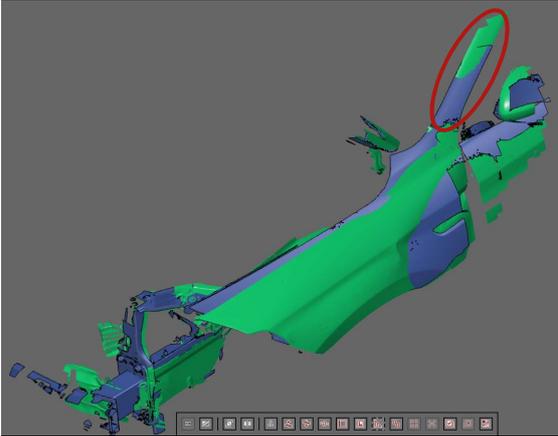
- Allineamento
  - Esempio 1



34

## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento
  - Esempio 1

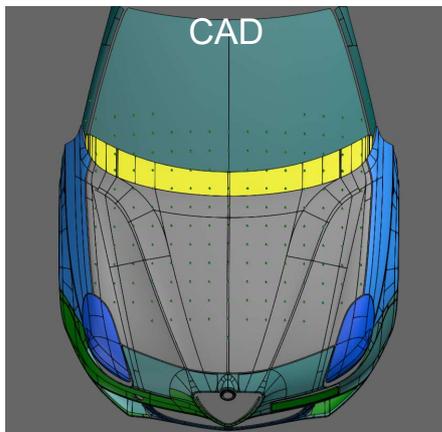


In questo esempio, si osserva un buon risultato di allineamento ottenuto in modo automatico, direttamente con «Allineamento originale», perché c'è corrispondenza sul montante A che non si è deformato durante la prova.

## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento
  - Esempio 2

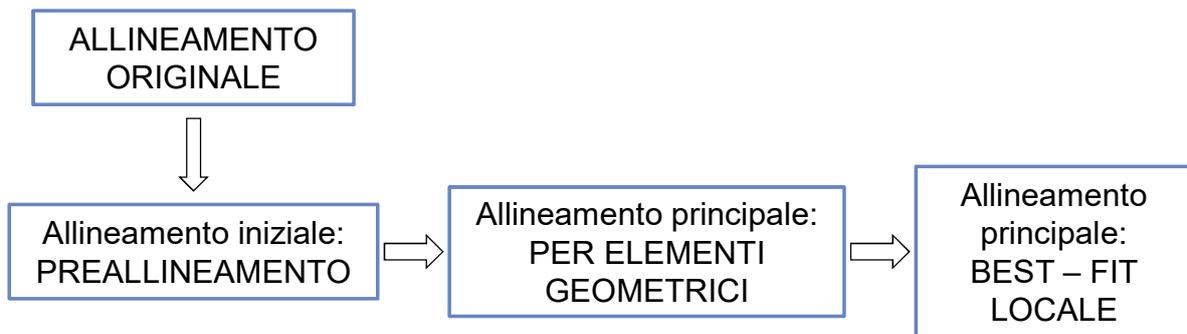
È possibile allineare una scansione con la corrispondente area della geometria CAD.



## Software ATOS Professional 2016

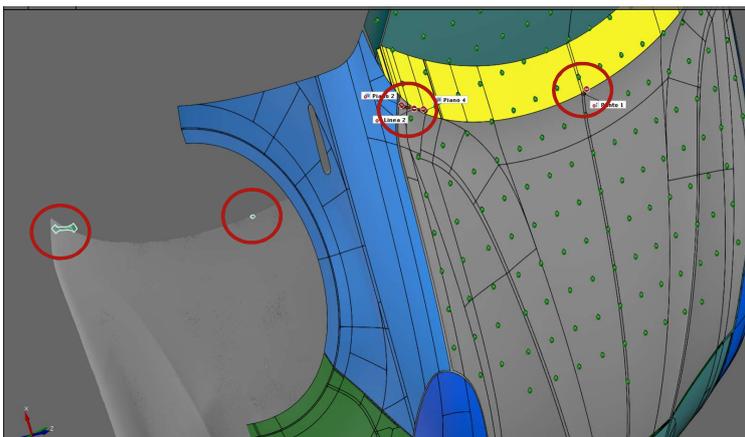
- Allineamento
  - Esempio 2

Si procede secondo lo schema seguente.



## Software ATOS Professional 2016

- Allineamento
  - Esempio 2

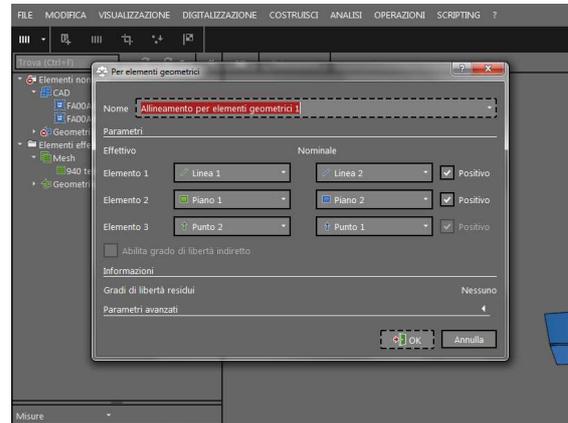
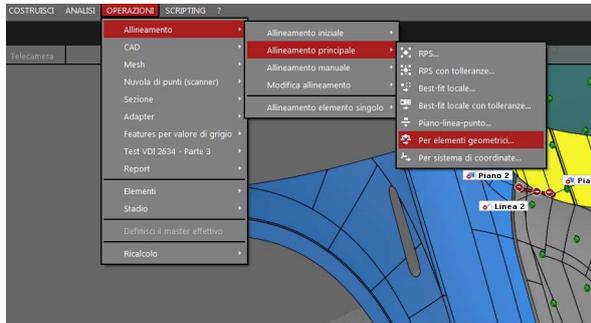


Mediante il comando COSTRUISCI si creano i seguenti elementi geometrici sia sulla mesh relativa alla scansione che sul CAD, cercando di posizionarli in modo che ci sia corrispondenza:

- si crea un piano a tre punti nella porzione indeformata del cofano;
- si crea un piano parallelo a quello creato;
- si traccia la linea perpendicolare tra i due piani;
- si posiziona un punto all'incirca sulla mezzeria del cofano.

## Software ATOS Professional 2016

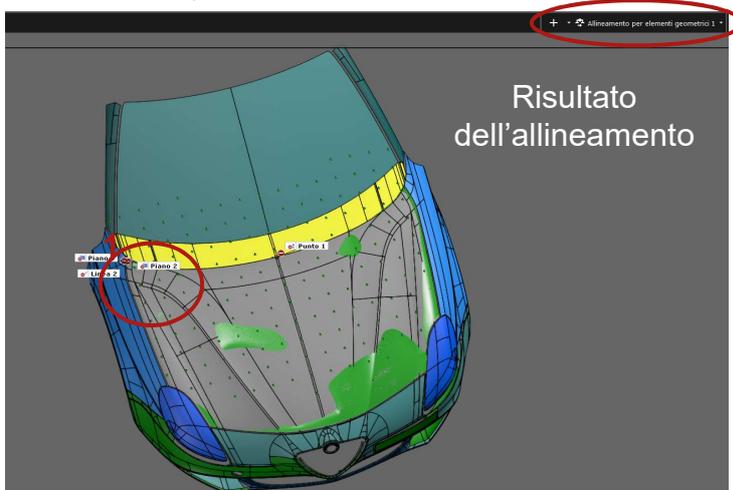
- Allineamento
  - Esempio 2



Si inseriscono gli elementi geometrici creati seguendo le istruzioni della finestra di dialogo.

## Software ATOS Professional 2016

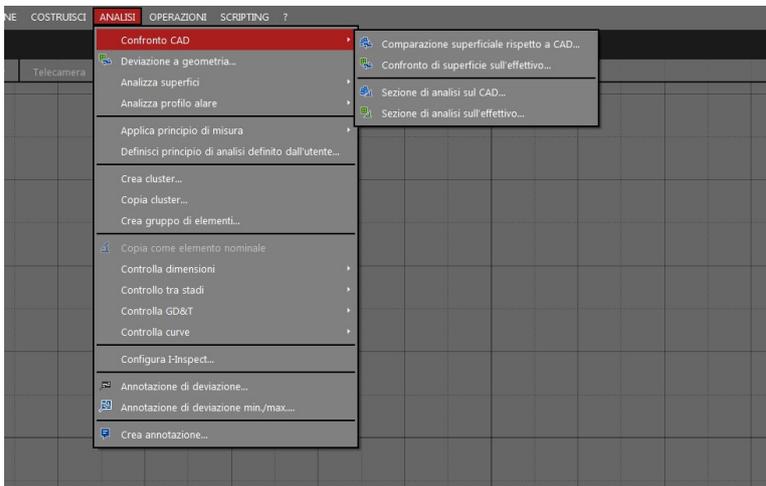
- Allineamento
  - Esempio 2



Si può procedere con il best – fit locale per migliorare l'allineamento in alcune porzioni che sono rimaste indeformate a seguito della prova, per esempio quella contrassegnata dal cerchio 1.

## Software ATOS Professional 2016

- Schermata iniziale
  - Ambiente di lavoro ANALISI



È possibile confrontare due modelli e osservare le deformazioni subite, per esempio prima e dopo un crash. Il software consente il calcolo di piccole deformazioni (qualche centimetro): mostra una mappa colore degli spostamenti tra i due modelli a confronto. Si può anche rilevare il valore dello spostamento in modo puntuale e individuare i valori massimi.

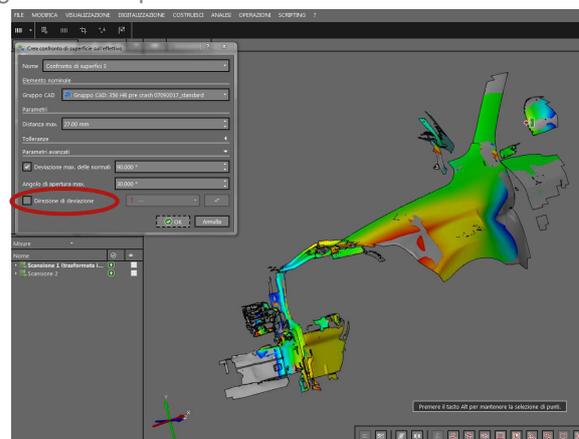
## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Esempio 1

Si osservano le deformazioni sulla scansione della 356 già descritta precedentemente.

Sequenza di comandi: ANALISI, CONFRONTO CAD, CONFRONTO DI SUPERFICIE SULL'EFFETTIVO

Si seleziona il gruppo CAD di riferimento, si può impostare la distanza massima e la direzione di osservazione della deformazione (cerchio).

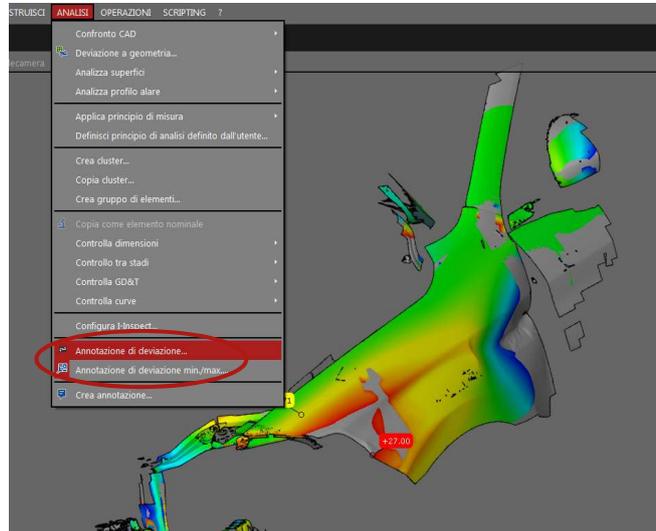


## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Esempio 1

Si possono creare delle etichette per evidenziare numericamente lo spostamento in un punto.

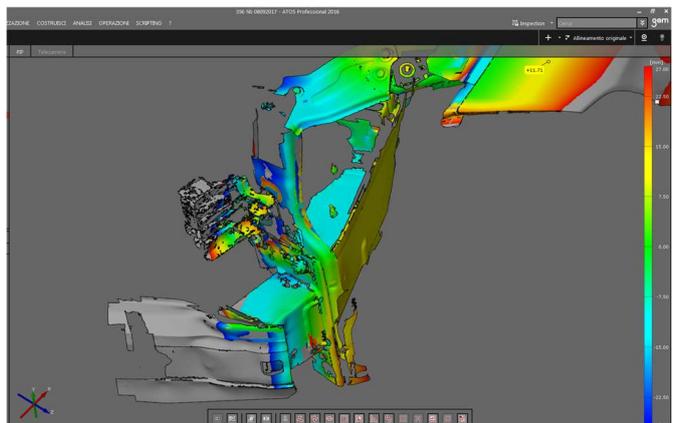
- Il comando «Annotazione di deviazione» consente di visualizzare punto per punto le deformazioni spostando il puntatore del mouse, premendo il tasto CTRL della tastiera. Le annotazioni di deviazione si possono anche fissare premendo CTRL+ tasto sx del mouse.
- Il comando «Annotazione di deviazione min/max» evidenzia la deformazione massima o minima di un'area selezionata.



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Esempio 1

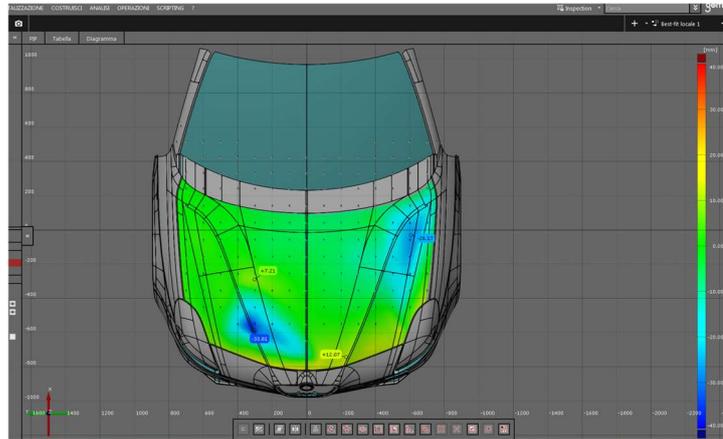
Nella parte destra dello schermo viene rappresentata la scala di corrispondenza tra il range numerico e i colori. Gli estremi sono modificabili dall'utente (cliccare sul numero della scala). Si osservano delle incoerenze rispetto ai risultati di deformazione attesi perché in questo caso, gli spostamenti in gioco sono elevati e il software non ha allineato le superfici in modo ottimale in corrispondenza del puntone. A causa dell'occlusione visiva della zona di interesse, lo scanner non è riuscito ad acquisire sufficienti dettagli per garantire un riallineamento corretto tra prima e dopo il crash.



## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Esempio 2

In questo caso, a differenza dell'esempio 1, si è utilizzato il comando «Comparazione superficiale rispetto a CAD», dove si seleziona la mesh effettiva come elemento di confronto per il CAD, selezionato in automatico.



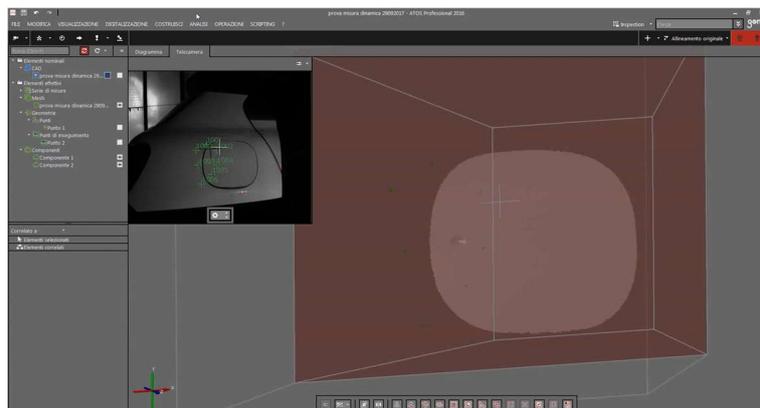
45

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Misure dinamiche

Nell'ambiente di lavoro LIVE è possibile effettuare l'analisi in tempo reale dell'oggetto in movimento. È un processo lento che non dà una risposta immediata. Si fa il confronto del CAD con l'effettivo e si avvia l'acquisizione live. Bisogna aspettare il tempo di aggiornamento della schermata.

Prima si seleziona la mesh di interesse per il confronto e si attende che vengano calcolate le deformazioni rispetto al CAD.

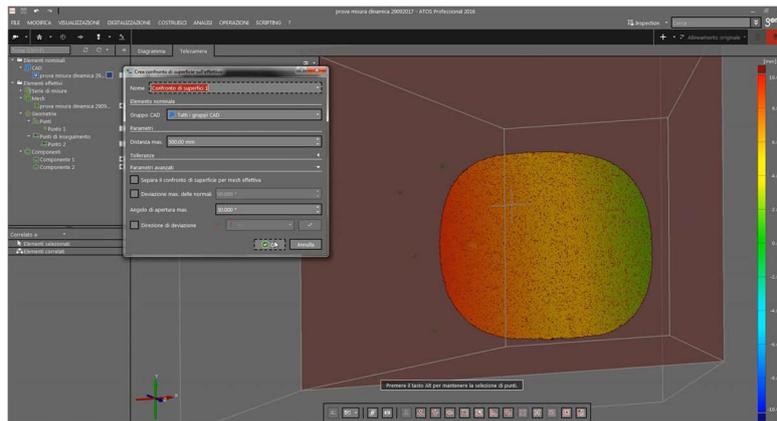


46

## Software ATOS Professional 2016

- Ambiente di lavoro ANALISI
  - Misure dinamiche

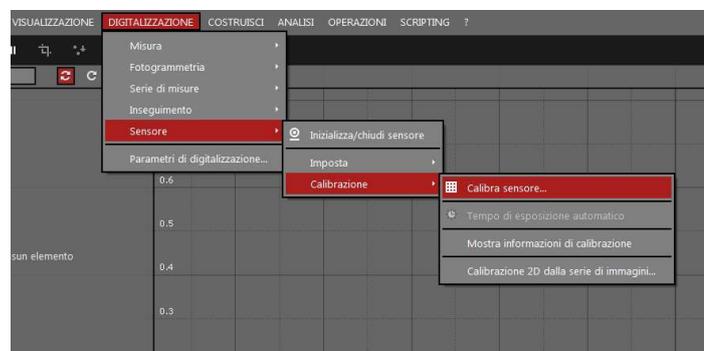
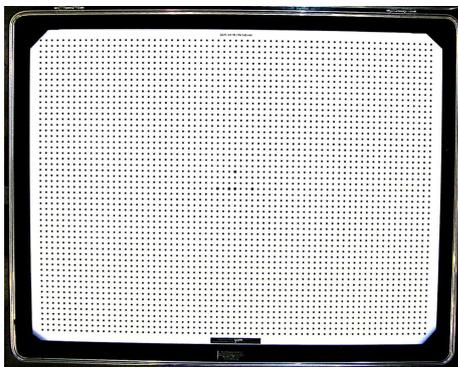
Una volta comparso il risultato dell'analisi, nell'ambiente LIVE è possibile avviare l'acquisizione e osservare il cambiamento delle deformazioni real time.



## Calibrazione

Il sensore richiede periodicamente di essere ricalibrato. Il procedimento è molto semplice: si collega e si inizializza il sensore e si seguono le istruzioni della finestra di dialogo. È necessario utilizzare il pannello di calibrazione CP40/560.

Sequenza di comandi: DIGITALIZZAZIONE, SENSORE, CALIBRAZIONE, CALIBRA SENSORE





# Bibliografia e sitografia

- [1] GOM. (2017). ATOS-Tecnologia di scansione industriale 3D, indirizzo: <http://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos.html>.
- [2] E. Becchio, «Fiat safety center overview», Organizzazione del Safety Center, nov. 2016.
- [3] United Nations, *Agreement concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance*, Addendum 126: Regulation No. 127, January 2013.
- [4] European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), *Pedestrian testing protocol*, ver. 8.4, November 2017.
- [5] Wikipedia. (2017). Prototipazione rapida, indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/Prototipazione\\_rapida](https://it.wikipedia.org/wiki/Prototipazione_rapida).
- [6] —, (2017). Reverse engineering, indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/Reverse\\_engineering](https://it.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering).
- [7] GOM. (2017). Sistemi di metrologia, indirizzo: <http://www.atos-core.com/it/index.php>.
- [8] —, (2017). ATOS-Tecnologia di scansione industriale 3D, indirizzo: <http://www.gom.com/it/settori-industriali.html>.
- [9] GOM mbH, «Component Testing / Deformation Analysis, Deformation Analysis of Car Components», GOM, Optical Measuring Techniques, Report, 2009. indirizzo: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/car\\_deformation\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/car_deformation_EN.pdf).
- [10] —, «BMW: GOM Inspect as standard software installed», GOM, Optical Measuring Techniques, Report, 2015. indirizzo: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/gom\\_inspect\\_as\\_standard\\_software\\_EN.pdf.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/gom_inspect_as_standard_software_EN.pdf.pdf).

- [11] —, «Bosch: The rolling out of GOM Inspect is explained by the users' long-standing trust», GOM, Optical Measuring Techniques, Report, 2015. indirizzo: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/gom\\_inspect\\_users\\_\\_long-standing\\_trust\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/gom_inspect_users__long-standing_trust_EN.pdf).
- [12] Wikipedia. (2016). Diagramma di Wöhler, indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma\\_di\\_W%C3%B6hler](https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma_di_W%C3%B6hler).
- [13] GOM mbH, «Application Example: Life Cycle Calculation of a Running Blade», GOM, Optical Measuring Techniques, Report, 2014. indirizzo: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/running\\_blade\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/running_blade_EN.pdf).
- [14] GOM. (2017). ATOS Professional—Software per la scansione e l'analisi 3D, indirizzo: <http://www.gom.com/it/software-3d/gom-system-software/atos-professional.html>.
- [15] —, (2017). ATOS Core—scanner ottico 3D, indirizzo: <http://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos/atos-core.html>.
- [16] —, (2017). Principio della tripla scansione, indirizzo: <http://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos/atos-triple-scan.html>.
- [17] ATOS Core, *Manuale d'uso hardware*, Manuale, 2016, cap. 3-4.
- [18] GOM Software 2016, *Acquisition Basic*, Manuale, 2016.
- [19] —, *Analisi Base*, Manuale, 2016.
- [20] —, *PONTOS Live*, Manuale, 2016.
- [21] RCAR Research Council for Automobiles Repairs, *Low-speed structural crash test protocol*, ver. 2.2, July 2011.
- [22] AUTOSTOP GLOBAL. (2015). Test del punto H, indirizzo: <http://www.autostopleather.com/it/company-profile/safety/test-degli/test-del-punto-h.html>.
- [23] GDV German Insurers Association, RCAR Research Council for Automobiles Repairs, *Information on the implimentation of RCAR crash standards in the German insurance vehicle rating system and information on AEB systems, Description of Group Rating System*, April 2011.
- [24] Motorward. (2014). All you need to know about crash tests, indirizzo: <http://www.motorward.com/2014/03/need-know-crash-tests/>.
- [25] United Nations Economic Commission for Europe, *Agreement concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance*, Addendum 126: Regulation No. 127, February 2015.

- [26] UNECE. (2011). Difference of TRL legform impactor/injury criteria and Flex pedestrian legform impactor/injury criteria, indirizzo: <http://www.unece.org>.
- [27] European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), *Assessment protocol- Pedestrian protection*, ver. 9.0.2, November 2017.
- [28] —, *Pedestrian testing protocol*, ver. 8.3, December 2016.
- [29] Corriere della sera. (2017). Dizionario di inglese, indirizzo: [http://dizionari.corriere.it/dizionario\\_inglese/Inglese/B/benchmarking.shtml](http://dizionari.corriere.it/dizionario_inglese/Inglese/B/benchmarking.shtml).



# Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che in qualche modo hanno contribuito alla realizzazione di tale lavoro e che mi hanno aiutata a giungere alla fine di questo lungo e impegnativo percorso pieno di ostacoli, ma soprattutto di soddisfazioni.

Ringrazio anzitutto la mia relatrice, la Prof.ssa Cristina Bignardi, che sin dalla triennale è stata per me un riferimento ed un esempio di umanità e competenza e il Prof. Alberto Audenino, co-relatore, senza i quali questa tesi non esisterebbe.

Desidero ringraziare il Dott. Enrico Becchio, direttore del Centro Sicurezza FCA di Orbassano, per avermi dato la possibilità di affacciarmi nel complesso e affascinante mondo di un'azienda multinazionale come la FCA.

Un ringraziamento speciale lo rivolgo all'Ing. Andrea Severini, tutor aziendale FCA, che mi ha guidata con entusiasmo e carica durante tutto il progetto di tesi fornendomi continuamente spunti e opportunità di sperimentare in autonomia. Ringrazio, inoltre, tutti i colleghi del laboratorio C&P del Centro Sicurezza: Maurizio, per la sua disponibilità, gentilezza e battuta pronta e Gennaro, per la sua pazienza e i suoi suggerimenti. Inoltre ringrazio Christian, Luca, Lorenzo, Cosimo, Luciano e Alberto per avermi fatto sentire subito parte del team e per avermi aiutata con pazienza, attenzione e simpatia. In particolare ringrazio l'Ing. Laura Volponi, costante riferimento e supporto in ogni difficoltà, sempre pronta a dedicarmi parte del suo tempo. Ringrazio sentitamente anche l'Ing. Domenico Straface per il suo interesse nonostante i numerosi impegni lavorativi e la per sua entusiasta partecipazione nella progettazione e realizzazione di molte delle prove sperimentali eseguite. Infine ringrazio tutti gli operai del Centro Sicurezza FCA per avermi resa parte di una grande famiglia.

Proseguo ringraziando tutti i miei amici più cari, in particolare Daniele, per avermi accompagnata affettuosamente sin dal primo anno con la sua sagacia e prontezza di spirito, Chiara Mancino, collega e amica sincera e Damiano, saggio consigliere. Ringrazio Gabriele per il buon umore e l'affetto e Carmen per essere come una sorella premurosa e attenta a cui si può solo voler bene. Inoltre ringrazio Chiara Marino che ha le parole giuste per ogni occasione e sa sempre trovare la soluzione migliore. Ringrazio Elena, la vicina di casa che tutti vorrebbero, collega brillante e amica affettuosa. Ringrazio Michela per essere sempre un'ispirazione. Ringrazio Lucia con cui ho condiviso tutto il mio percorso universitario, quasi di pari passo, rivestendo un'importanza fondamentale

tanto da diventare come una sorella. Ringrazio Michael per il suo conforto e i suoi bei libri. Non posso non ringraziare gli amici di una vita, presenti in ogni momento, tra cui Rita la cui dolcezza e forza sono un esempio per me. Ringrazio Artea per esserci sempre stata col suo carattere risoluto e forte. Ringrazio Livia per avermi ascoltata e aiutata in ogni momento con saggezza ed entusiasmo. Ringrazio Vincenzo la cui presenza costante lo ha reso di famiglia. Ringrazio Antonio che nonostante le difficoltà dimostra un forza incredibile. Ringrazio Maria Elena per la sua energia e gioia di vivere che continuerà sempre a trasmettermi. Ringrazio Cecilia che è una fonte inesauribile di idee ed iniziative nuove e originali, sincera e instancabile. Infine ringrazio Rossella per il suo animo nobile, per la sua capacità di resistere e reagire, per l'amicizia decennale che ci lega e sempre più si consolida.

Un ringraziamento speciale va a Luca, il mio ragazzo, che con invidiabile pazienza e caparbieta mi ha sostenuta negli ultimi periodi più difficili con consigli degni di uno psicologo. La sua forza di volontà non finisce mai di stupirmi.

Vorrei ringraziare enormemente la mia splendida famiglia: mia madre, solare, positiva, piena di risorse e sostegno fondamentale per ogni problema, mio padre, curioso e sempre pronto a nuove sfide mosso dalla sua sete di conoscenza che cerca di trasmettermi ogni giorno e Marianna, mia sorella, coraggiosa, determinata e capace costantemente presente in ogni momento della mia vita e di questo lungo percorso di studi.

Infine ringrazio i nonni, gli zii e i cugini che in questi anni mi hanno trasmesso tutto il loro affetto.