

**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica**

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche



Tesi Di Laurea

**Caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di  
provini in superlega di nichel (IN625) ottenuti mediante  
Laser Metal Deposition.**

Experimental characterization of the mechanical behavior of IN625 nickel  
superalloy specimens obtained by Laser Metal Deposition.

Relatore  
**Prof. Ing. Marco Sasso**

Laureando  
**Giuseppe De Marco**

---

Anno accademico 2018/19



[Università Politecnica delle Marche, Facoltà di ingegneria](#)

*Alla mia famiglia.*



## Sommario

<b>Indice delle figure</b>	<b>4</b>
<b>Indice delle tabelle</b>	<b>7</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>1 Additive manufacturing</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Generalità</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Powder Bed Fusion</b>	<b>13</b>
1.2.1 Selective Laser Melting (SLM)	15
1.2.2 Electron Beam Melting (EBM)	16
<b>1.3 Laser Metal Deposition (LMD)</b>	<b>17</b>
1.3.1 Generalità	17
1.3.2 I settori d'impiego	19
1.3.3 Vantaggi	19
<b>1.4 Sistema LMD utilizzato alla Wayne State University</b>	<b>22</b>
<b>2 Superleghe di Nichel</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Classificazione delle superleghe</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Microstruttura delle superleghe di nichel da AM</b>	<b>31</b>
2.2.1 Difetti tipici	32
2.2.2 Trattamenti termici sottovuoto delle superleghe di nichel	34
2.2.3 Proprietà meccaniche	35
<b>2.3 Materiale indagato: Inconel 625 (IN625)</b>	<b>37</b>
2.3.1 Generalità	37
2.3.2 Composizione	37
2.3.3 In625 prodotto alla Wayne State University mediante LMD	40
<b>3 Realizzazione dei provini</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Provini Flat</b>	<b>42</b>
3.1.1 Geometria e dimensioni	42
3.1.2 Parametri di processo	45
3.1.3 Procedimento di stampaggio	46
<b>3.2 Provini Cilindrici</b>	<b>49</b>
3.2.1 Geometria e dimensioni	49
3.2.2 Parametri di processo	50
3.2.3 Procedimento di stampaggio	50
<b>3.3 Provini torniti</b>	<b>54</b>
3.3.1 Dimensioni	54
3.3.2 Procedimento adottato	55
<b>3.4 Provini Cilindrici per test di compressione</b>	<b>57</b>
3.4.1 Dimensioni	57
3.4.2 Parametri di processo	59
3.4.3 Procedimento di stampaggio	59
3.4.4 Lavorazioni eseguite	61
<b>4 Prove sperimentali eseguite</b>	<b>63</b>
<b>4.1 Prova di trazione statica</b>	<b>63</b>
4.1.1 Setup statici	69
4.1.2 Digital Image Correlation	74
4.1.3 Calcolo delle dimensioni dei provini	82
<b>4.2 Prova di compressione statica</b>	<b>85</b>
4.2.1 Setup statici	90



<b>4.3</b>	<b>Prova di compressione dinamica .....</b>	<b>93</b>
4.3.1	La barra di Hopkinson .....	94
4.3.2	Comportamento meccanico ad elevato Strain-Rate.....	105
<b>4.4</b>	<b>Prove di durezza .....</b>	<b>109</b>
4.4.1	La durezza.....	109
4.4.2	Test di durezza .....	110
4.4.3	Prova Vickers .....	111
<b>5</b>	<b>Analisi Microstrutturale .....</b>	<b>113</b>
<b>5.1</b>	<b>Preparazione provini (Preparazione metallografica) .....</b>	<b>113</b>
5.1.1	Taglio dei provini.....	113
5.1.2	Hot Mounting Machine .....	114
5.1.3	Lappatura provini.....	116
5.1.4	Soluzione acida (Attacco Acido).....	117
<b>5.2</b>	<b>Microscopio ottico.....</b>	<b>118</b>
<b>5.3</b>	<b>Microscopia Elettrico a scansione SEM .....</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>Risultati prove sperimentali .....</b>	<b>123</b>
<b>6.1</b>	<b>Prove di trazione statiche .....</b>	<b>123</b>
6.1.1	Risultati provini flat.....	123
6.1.2	Risultati provini cilindrici .....	128
6.1.3	Risultati provini torniti .....	134
<b>6.2</b>	<b>Risultati analisi microstrutturale .....</b>	<b>138</b>
<b>6.3</b>	<b>Prove di compressione .....</b>	<b>144</b>
6.3.1	Prove di compressione statiche.....	144
6.3.2	Prove di compressione dinamiche.....	147
<b>6.4</b>	<b>Prove di durezza .....</b>	<b>150</b>
<b>7</b>	<b>Simulazioni numeriche basate sull'analisi FEM .....</b>	<b>152</b>
<b>7.1</b>	<b>Metodo degli elementi finiti (FEM).....</b>	<b>152</b>
7.1.1	Ansys Workbench 19.....	153
7.1.2	Aspetti da tenere in considerazione nella gestione di un'analisi FEM.....	154
<b>7.2</b>	<b>Scelta del tipo di analisi e dell'ambiente di simulazione.....</b>	<b>154</b>
<b>7.3</b>	<b>Analisi numerica dei test di trazione .....</b>	<b>155</b>
7.3.1	Definizione della geometria .....	155
7.3.2	Definizione del materiale .....	156
7.3.3	Definizione dei vincoli e carichi .....	158
7.3.4	Risultati.....	160
<b>8</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>164</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>167</b>



## Indice delle figure

<b>FIG. 1.1:</b> STRUTTURA IN LEGA DI TITANIO OTTENUTA MEDIANTE AM. [7].	13
<b>FIG. 1.2:</b> SCHEMA CONCETTUALE DEL PROCESSO SLM. [8].	14
<b>FIG. 1.3:</b> MODELLAZIONE DI UNA PALETTA DI TURBINA. [9].	14
<b>FIG. 1.4:</b> RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL PROCESSO SLM. [10].	15
<b>FIG. 1.5:</b> REALIZZAZIONE DI UNA TURBINA PER SLM. [11].	16
<b>FIG. 1.6:</b> SCHEMA DI UN SISTEMA EBM ARCAM. [4].	17
<b>FIG. 1.7:</b> SISTEMI LMD COMMERCIALIZZATI. [14].	18
<b>FIG. 1.8:</b> SCHEMA GENERICO DI UNA MACCHINA LMD "POWDER FED". [15].	19
<b>FIG. 1.9:</b> PARTI REALIZZATE MEDIANTE TECNICA LMD. [16].	20
<b>FIG. 1.10:</b> GIUNTO MECCANICO REALIZZATO CON TRE DIFFERENTI MATERIALI MEDIANTE LMD. [16].	21
<b>FIG. 1.11:</b> APPLICAZIONE DELLA TECNICA LMD CON IL PROCESSO DI LASER WIRE CLADDING. [16].	22
<b>FIG. 1.12:</b> SISTEMA LMD DELLA WAYNE STATE UNIVERSITY. [16].	23
<b>FIG. 1.13:</b> SCHEMATIZZAZIONE DELL'UGELLO COASSIALE E DEI DISPOSITIVI CON I QUALI È STRUMENTATO. [16].	24
<b>FIG. 2.1:</b> PALETTE DI TURBINA IN SUPERLEGA DI NICHEL REALIZZATE CON TECNICHE AM.	25
<b>FIG. 2.2:</b> COMPONENTI PER TURBINE DEL SETTORE AEROSPAZIALE REALIZZATI IN SUPERLEGA.	26
<b>FIG. 2.3:</b> A) MICROSTRUTTURA DI UNA LEGA ASTROLOY DOPO INVECCHIAMENTO: SI NOTANO CARBURI MC A BORDOGRANO E I PRECIPITATI $\gamma'$ INTRAGRANULARI. B) MICROSTRUTTURA DELLA LEGA INCONEL 718 CON IN EVIDENZA FASI DI LAVES E FASI $\Delta$ AGHIFORMI. [3] [20].	28
<b>FIG. 2.4:</b> ALCUNE TRA LE PRINCIPALI LEGHE DI NICHEL IN FUNZIONE DELLA LORO SALDABILITÀ. [22]	30
<b>FIG. 2.5:</b> A) GRANI COLONNARI (CG) E POZZETTI DI FUSIONE; B) DENDRITI COLONNARI E CELLULARI. [23].	32
<b>FIG. 2.6:</b> ESEMPIO DI MICROCRICCHE (A) E PORI DA BALLING (B) SU UN CAMPIONE DI INCONEL 625. [24].	34
<b>FIG. 2.7:</b> CARICHI DI SNERVAMENTO (YS), ROTTURA (UTS) E ALLUNGAMENTI A ROTTURA DI CAMPIONI DI INCONEL 718 REALIZZATI PER SLM E DMD. [22].	36
<b>FIG. 2.8:</b> LEGHE DERIVATE DALL'INCONEL 625.	38
<b>FIG. 2.9:</b> DIAGRAMMA T.T.T. (TEMPERATURA, TEMPO TRASFORMAZIONE) DELLA LEGA INCONEL 625.	40
<b>FIG. 3.1:</b> RAPPRESENTAZIONE CAD DEL PROVINO FLAT (IN ALTO). DISEGNO QUOTATO DEL PROVINO FLAT (IN BASSO).	43
<b>FIG. 3.2:</b> DISEGNO QUOTATO DEL SUBSTRATO UTILIZZATO PER LA DEPOSIZIONE.	44
<b>FIG. 3.3:</b> RAPPRESENTAZIONE CAD DEL SUBSTRATO UTILIZZATO PER LO STAMPAGGIO DEI PROVINI.	45
<b>FIG. 3.4:</b> SCHEMA DELL'ORIENTAMENTO DI COSTRUZIONE DEI PROVINI FLAT.	46
<b>FIG. 3.5:</b> SCHEMATIZZAZIONE DEL MOVIMENTO DEL LASER DURANTE LA DEPOSIZIONE DEI PROVINI FLAT.	47
<b>FIG. 3.6:</b> PROVINI FLAT DEPOSITATI IN SERIE SUL SUBSTRATO METALLICO.	48
<b>FIG. 3.7:</b> RAPPRESENTAZIONE DEL TAGLIO DEL SUBSTRATO MEDIANTE SEGATRICE A NASTRO (PROVINI FLAT).	48
<b>FIG. 3.8:</b> RAPPRESENTAZIONE CAD DEL PROVINO CILINDRICO (IN ALTO). DISEGNO QUOTATO DEL PROVINO CILINDRICO (IN BASSO).	50
<b>FIG. 3.9:</b> SCHEMATIZZAZIONE DEL MOVIMENTO DEL LASER DURANTE LA DEPOSIZIONE DEI PROVINI CILINDRICI.	52
<b>FIG. 3.10:</b> PROVINI CILINDRICI DEPOSITATI IN SERIE SUL SUBSTRATO METALLICO.	53
<b>FIG. 3.11:</b> RAPPRESENTAZIONE DEL TAGLIO DEL SUBSTRATO MEDIANTE SEGATRICE A NASTRO (PROVINI CILINDRICI).	53
<b>FIG. 3.12:</b> RAPPRESENTAZIONE CAD DEL PROVINO CILINDRICO TORNITO (IN ALTO). DISEGNO QUOTATO DEL PROVINO CILINDRICO TORNITO (IN BASSO).	55
<b>FIG. 3.13:</b> PROVINO CILINDRICO DEPOSITATO SUL SUBSTRATO CON TECNICA LMD.	56
<b>FIG. 3.14:</b> TORNIO DI PROPRIETÀ DELLA WAYNE STATE UNIVERSITY.	56
<b>FIG. 3.15:</b> PROVINI CILINDRICI OTTENUTI MEDIANTE TORNITURA.	57
<b>FIG. 3.16:</b> CILINDRI STAMPATI MEDIANTE LASER METAL DEPOSITION.	58
<b>FIG. 3.17:</b> SCHEMATIZZAZIONE DEL MOVIMENTO DEL LASER DURANTE LA DEPOSIZIONE DEI CILINDRI IN SUPERLEGA DI NICHEL IN625.	60
<b>FIG. 3.18:</b> DISEGNO QUOTATO DEL SUBSTRATO UTILIZZATO PER LA DEPOSIZIONE DEI CILINDRI.	60
<b>FIG. 3.19:</b> CILINDRI IN SUPERLEGA DI NICHEL IN625 OTTENUTI DOPO L'OPERAZIONE DI TORNITURA.	61
<b>FIG. 3.20:</b> PROVINI CILINDRICI OTTENUTI CON TAGLIO PER ELETTROEROSIONE.	61
<b>FIG. 3.21:</b> PROVINI CILINDRICI PER TEST DINAMICI: PROVINO DEL PRIMO SET (A DESTRA).	62
<b>FIG. 4.1:</b> RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UNA MACCHINA PER PROVE DI TRAZIONE.	63
<b>FIG. 4.2:</b> SCHEMATIZZAZIONE DEL PROVINO PER LA PROVA DI TRAZIONE.	64
<b>FIG. 4.3:</b> CURVA VERA E CURVA INGEGNERISTICA.	66
<b>FIG. 4.4:</b> GRAFICO CHE METTE IN RELAZIONE LA TENSIONE INGEGNERISTICA E LA DEFORMAZIONE INGEGNERISTICA. [3].	67
<b>FIG. 4.5:</b> MTS PER LE PROVE STATICHE.	69
<b>FIG. 4.6:</b> TELECAMERA BASLER ACA2000-165.	70



FIG. 4.7: OTTICA TELECENTRICA M7528-MP.....	70
FIG. 4.8: SISTEMA DI ILLUMINAZIONE CON SORGENTE DI LUCE E FIBRE OTTICHE. ....	70
FIG. 4.9: SET-UP PROVE STATICHE.....	71
FIG. 4.10: PROVINO CILINDRICO DOTATO DEL SUBSTRATO. ....	72
FIG. 4.11: SISTEMA DI AFFERRAGGIO DEI PROVINI DOTATI DEL SUBSTRATO.....	73
FIG. 4.12: ALLOGGIAMENTO DI UN SINGOLO PROVINO NEL SUPPORTO.....	73
FIG. 4.13: SET-UP DEL SISTEMA DI AFFERRAGGIO E DEL PROVINO PER I TEST DI TRAZIONE. ....	74
FIG. 4.14: ESEMPIO DI SUBSETS.....	75
FIG. 4.15: PROVINO FLAT SU CUI È STATO REALIZZATO LO SPECKLE.....	76
FIG. 4.16: FUNZIONAMENTO DIC.....	77
FIG. 4.17: FINESTRA DEL PROGRAMMA DIC.....	80
FIG. 4.18: SEZIONE 1 - DIC.....	80
FIG. 4.19: SEZIONE 2 - DIC.....	81
FIG. 4.20: SEZIONE 4E5 - DIC.....	81
FIG. 4.21: SEZIONE 5 - DIC.....	82
FIG. 4.22: SEZIONE DEI PROVINI: FLAT (IN BASSO) E CILINDRICO (IN ALTO).....	83
FIG. 4.23: SEZIONE DEL PROVINO FLAT VISTA AL MICROSCOPIO OTTICO.....	83
FIG. 4.24: SEZIONE DEL PROVINO CILINDRICO VISTA AL MICROSCOPIO OTTICO.....	84
FIG. 4.25: DISEGNO DEL PROFILO DELLA SEZIONE DI UN PROVINO FLAT.....	84
FIG. 4.26: SCHEMATIZZAZIONE DI UNA PROVA DI COMPRESIONE.....	85
FIG. 4.27: RAPPRESENTAZIONE DEL FENOMENO DI BARILOTTATURA.....	86
FIG. 4.28: ANDAMENTO DELLA CURVA DI COMPRESIONE E TRAZIONE A CONFRONTO.....	86
FIG. 4.29: COMPORTAMENTO A COMPRESIONE DI DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI.....	87
FIG. 4.30: CURVA VERA E INGEGNERISTICA A CONFRONTO.....	89
FIG. 4.31: MACCHINA PER PROVE DI COMPRESIONE UNIVPM.....	90
FIG. 4.32: ESTENSOMETRO.....	91
FIG. 4.33: RAPPRESENTAZIONE DEL PROVINO POSIZIONATO TRA DUE CILINDRI.....	92
FIG. 4.34: SET-UP PER LA PROVA DI COMPRESIONE STATICA.....	93
FIG. 4.35: BARRA DI HOPKINSON TRADIZIONALE.....	94
FIG. 4.36: SCHEMATIZZAZIONE INPUT E OUTPUT BAR E PROVINO.....	95
FIG. 4.37: ELEMENTO SACRIFICALE.....	99
FIG. 4.38: MARTINETTO E SISTEMA DI BLOCCO PER HOPKINSON A TRAZIONE DIRETTA.....	100
FIG. 4.39: PROFILATO E NOTTOLINO.....	100
FIG. 4.40: UNIVPM - HOPKINSON BAR.....	101
FIG. 4.41. SUPPORTO IN ACCIAIO DOTATO DI ELEMENTO IN MATERIALE POLIMERICO.....	102
FIG. 4.42: SISTEMA DI ACQUISIZIONE.....	103
FIG. 4.43: CONFRONTO TRA LE ONDE A TRAZIONE DIRETTA (A DESTRA) E CLASSICA (A SINISTRA).....	103
FIG. 4.44: SCHEMATIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA HOPKINSON BAR A TRAZIONE DIRETTA.....	104
FIG. 4.45: PROVINO POSIZIONATO TRA LE DUE BARRE (INPUT E OUTPUT BAR).....	105
FIG. 4.46: STRAIN RATE RELATIVO ALLE DIFFERENTI RELAZIONI DI CARICO.....	106
FIG. 4.47: EVOLUZIONE DEL LEGAME COSTITUTIVO DELL'ACCIAIO IN FUNZIONE DELLO STRAIN-RATE.....	107
FIG. 4.48: VARIAZIONE DELLA TENSIONE DI SNERVAMENTO PER EFFETTO JOULE.....	108
FIG. 4.49: GEOMETRIE DEGLI INDENTATORI BRINELL E ROCKWELL.....	111
FIG. 4.50: SCHEMATIZZAZIONE DI UN INDENTATORE VICKERS E DELLA SUA IMPRONTA.....	112
FIG. 5.1: PROVINO FLAT TAGLIATO TRASVERSALMENTE (PIANO XY).....	113
FIG. 5.2: HOT MOUNTING MACHINE.....	114
FIG. 5.3: POSIZIONAMENTO DEI PROVINI.....	115
FIG. 5.4: INSERIMENTO DELLA RESINA TERMOPLASTICA NELLA CAMERA DI REAZIONE.....	115
FIG. 5.5: PROVINI INGLOBATI NELLA RESINA TERMOPLASTICA. FIG. A) SEZIONE LONGITUDINALE DEI PROVINI CILINDRICO (A SINISTRA) E FLAT (A DESTRA). FIG. B) SEZIONE TRASVERSALE DEI PROVINI FLAT (IN ALTO) E CILINDRICO (IN BASSO).....	116
FIG. 5.6: LUCIDATURA DEI PROVINI.....	117
FIG. 5.7: PROVINO SOTTOPOSTO AD ATTACCO CHIMICO.....	118
FIG. 5.8: MICROSCOPIO OTTICO OLYMPUS K23008949.....	119
FIG. 5.9: VISIONE SCHEMATICA DI UN MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE.....	120
FIG. 5.10: PREPARAZIONE DEI PROVINI PER L'ANALISI SEM.....	120
FIG. 5.11: SEGNALI EMESI DA DIFFERENTI PARTI DEL VOLUME DI INTERAZIONE.....	122
FIG. 5.12: FESEM JEOL JSM 7600F.....	122



<b>FIG. 6.1:</b> POSIZIONAMENTO GRIGIA NEL TRATTO UTILE (PROVINO FLAT #1).	124
<b>FIG. 6.2:</b> PROVINO FLAT; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A METÀ TEST.	124
<b>FIG. 6.3:</b> PROVINO FLAT; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A FINE TEST.	125
<b>FIG. 6.4:</b> STRESS-STRAIN_Test#1_PROVINO#1.	125
<b>FIG. 6.5:</b> PROVINO #1 ROTTO.	126
<b>FIG. 6.6:</b> STRESS-STRAIN, PROVE ESEGUITE SU 6 CAMPIONI.	128
<b>FIG. 6.7:</b> POSIZIONAMENTO GRIGIA NEL TRATTO UTILE (PROVINO CILINDRICO #1).	129
<b>FIG. 6.8:</b> PROVINO CILINDRICO; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A METÀ TEST.	129
<b>FIG. 6.9:</b> PROVINO CILINDRICO; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A FINE TEST.	130
<b>FIG. 6.10:</b> STRESS-STRAIN_Test#1_PROVINO#1.	131
<b>FIG. 6.11:</b> STRESS-STRAIN_Test#2_PROVINO#2.	132
<b>FIG. 6.12:</b> STRESS-STRAIN, PROVE ESEGUITE SU 7 CAMPIONI.	134
<b>FIG. 6.13:</b> POSIZIONAMENTO GRIGIA NEL TRATTO UTILE (PROVINO TORNITO #1).	135
<b>FIG. 6.14:</b> PROVINO TORNITO; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A METÀ TEST.	135
<b>FIG. 6.15:</b> PROVINO TORNITO; MAPPA DELLE DEFORMAZIONI A FINE TEST.	136
<b>FIG. 6.16:</b> STRESS-STRAIN_Test#1_PROVINO#1.	136
<b>FIG. 6.17:</b> STRESS-STRAIN, PROVE ESEGUITE SU 2 CAMPIONI.	138
<b>FIG. 6.18:</b> MICROSCOPIO OTTICO, SEZIONE LONGITUDINALE PROVINO FLAT.	139
<b>FIG. 6.19:</b> MICROSCOPIA SEM, SEZIONE LONGITUDINALE PROVINO FLAT.	140
<b>FIG. 6.20:</b> MICROSCOPIO OTTICO, SEZIONE LONGITUDINALE PROVINO CILINDRICO.	141
<b>FIG. 6.21:</b> MICROSCOPIA SEM, SEZIONE LONGITUDINALE PROVINO CILINDRICO.	142
<b>FIG. 6.22:</b> MICROSCOPIO OTTICO, SEZIONE TRASVERSALE PROVINO CILINDRICO.	142
<b>FIG. 6.23:</b> MICROSCOPIA SEM, SEZIONE TRASVERSALE PROVINO CILINDRICO.	143
<b>FIG. 6.24:</b> STRESS-STRAIN_Test#1_PROVINO#1.	144
<b>FIG. 6.25:</b> STRESS-STRAIN_Test#1; CONFRONTO CURVA VERA (ARANCIONE) - CURVA VERA CORRETTA (BLU).	145
<b>FIG. 6.26:</b> STRESS-STRAIN_Test#1- CURVA VERA OTTENUTA DOPO LA CORREZIONE DELL'ATTRITO.	146
<b>FIG. 6.27:</b> STRESS-STRAIN, PROVE ESEGUITE SU 2 CAMPIONI.	147
<b>FIG. 6.28:</b> RAPPRESENTAZIONE DEL TEST DI COMPRESSIONE DINAMICA. A) PROVINO VERGINE PRIMA DEL TEST. B) PROVINO COMPRESSO A FINE TEST.	147
<b>FIG. 6.29:</b> STRESS-STRAIN - STRAIN-RATE 868 s-1.	148
<b>FIG. 6.30:</b> STRESS-STRAIN, CONFRONTO TRA CURVE A DIVERSO STRAIN RATE.	149
<b>FIG. 7.1:</b> DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA.	156
<b>FIG. 7.2:</b> DEFINIZIONE DELLA MESH.	156
<b>FIG. 7.3:</b> DEFINIZIONE DEL MATERIALE.	157
<b>FIG. 7.4:</b> DEFINIZIONE DEL VINCOLO FIXED SUPPORT.	158
<b>FIG. 7.5:</b> DEFINIZIONE DEL VINCOLO DISPLACEMENT.	159
<b>FIG. 7.6:</b> DEFINIZIONE DEI SUBSTEPS.	159
<b>FIG. 7.7:</b> EQUIVALENT PLASTIC STRAIN RESULTS.	160
<b>FIG. 7.8:</b> CURVA FORZA-SPOSTAMENTO NUMERICA.	161
<b>FIG. 7.9:</b> CONFRONTO CURVA SPERIMENTALE E CURVA NUMERICA.	162
<b>FIG. 7.10:</b> CONFRONTO CURVA STRESS-STRAIN SPERIMENTALE E NUMERICA.	163



## Indice delle tabelle

<b>TABELLA 1.1:</b> CLASSIFICAZIONE DELLE TECNOLOGIE AM PER METALLI. ....	12
<b>TABELLA 2.1:</b> PRINCIPALI LEGHE DI NICHEL COMMERCIALIZZATE. [21]. ....	29
<b>TABELLA 2.2:</b> COMPOSIZIONE DELLA LEGA INCONEL 625 (IN625). ....	37
<b>TABELLA 2.3:</b> COMPOSIZIONE SPECIFICA DELLA SUPERLEGA IN625 UTILIZZATA NEL PRESENTE LAVORO DI TESI. ....	40
<b>TABELLA 3.1:</b> PARAMETRI DI PROCESSO PER LO STAMPAGGIO DI PROVINI FLAT IN INCONEL625 (IN625). ....	46
<b>TABELLA 3.2:</b> PARAMETRI DI PROCESSO PER LO STAMPAGGIO DI PROVINI CILINDRICI IN INCONEL625 (IN625). ....	50
<b>TABELLA 3.3:</b> CARATTERISTICHE DIMENSIONALI DEI PROVINI CILINDRICI PER TEST DI COMPRESSIONE SUL SISTEMA BARRA DI HOPKINSON. [27]. ....	58
<b>TABELLA 3.4:</b> PARAMETRI DI PROCESSO PER LO STAMPAGGIO DI PROVINI CILINDRICI IN INCONEL625 (IN625). ....	59
<b>TABELLA 4.1:</b> DISPOSITIVI PER I DIVERSI LIVELLI DI STRAIN RATES. ....	109
<b>TABELLA 6.1:</b> RISULTATI DELLE PROVE SUI PROVINI FLAT. ....	127
<b>TABELLA 6.2:</b> RISULTATI DELLE PROVE SUI PROVINI CILINDRICI. ....	133
<b>TABELLA 6.3:</b> RISULTATI DELLE PROVE SUI PROVINI CILINDRICI TORNITI. ....	137
<b>TABELLA 6.4:</b> RISULTATI DEI TEST DI DUREZZA DI UN PROVINO CILINDRICO. ....	150



## Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è finalizzato allo studio e alla caratterizzazione della superlega di nichel Inconel 625 (IN625) ottenuta mediante il processo di Laser Metal Deposition (LMD), anche detto Direct Energy Deposition.

Tale tecnologia rientra nella famiglia delle tecniche di Additive Manufacturing per la realizzazione di leghe metalliche.

Nello specifico, per l'ottenimento dei campioni, è stato utilizzato il sistema LMD di proprietà della Wayne State University.

Essendo un processo piuttosto innovativo è necessario studiare l'evoluzione microstrutturale delle leghe prodotte attraverso questa tecnologia così da poterle utilizzare in ambito industriale.

Seguendo le istruzioni dei professori Guru Dinda e Golam Newaz della Wayne State University di Detroit sono stati definiti i parametri di processo e le modalità di stampaggio di tale materiale.

Sono stati quindi ricavati i provini per eseguire le prove di trazione/compressione statiche e di compressione dinamiche.

Per le prove statiche i provini sono stati realizzati in due differenti geometrie (flat e cilindrici) mentre per le prove dinamiche solo di forma cilindrica.

Le prove di trazione statiche sono state eseguite con una MTS installata nei laboratori della Wayne State University mentre quelle di compressione con una macchina dell'Università Politecnica delle Marche.

Le prove di compressione dinamiche sono state eseguite con la barra di Hopkinson realizzata dal gruppo di Costruzione di Macchine dell'Università Politecnica delle Marche.

La tecnica utilizzata per la misura delle deformazioni durante i test è la tecnica digitale chiamata DIC (Digital Image Correlation) che lavora analizzando un set di immagini acquisite durante lo svolgimento della prova.

Quindi, è stata valutata la sensibilità del materiale per basse ed elevate velocità di deformazione.

Per comprendere al meglio il comportamento del materiale è stata condotta un'analisi microstrutturale sui provini realizzati per le prove statiche.



Tale indagine è stata realizzata utilizzando prima la microscopia ottica e poi la microscopia elettronica a scansione (SEM) attraverso i relativi strumenti di proprietà della Wayne State University.

Successivamente sono state condotte delle prove di durezza su tale materiale realizzate con un microdurometro Vickers situato anch'esso nei laboratori della Wayne State University.

Infine sono stati realizzati dei modelli geometrici (CAD) dei provini utilizzati per le prove statiche di trazione attraverso l'utilizzo del software SOLIDWORKS.

Quindi sono stati importati all'interno del software Ansys Workbench con il quale sono state condotte delle simulazioni numeriche in modo tale da riprodurre i test condotti sperimentalmente e avere quindi informazioni aggiuntive per il confronto e la convalida dei risultati ottenuti.

# 1 Additive manufacturing

## 1.1 Generalità

La definizione di additive manufacturing (AM) è fornita dalla norma ASTM F2792-10 come “il processo di giunzione di materiali per la creazione di oggetti da modelli di dati CAD (Computer Aided Design) 3D, solitamente strato per strato, a differenza delle tecniche di formatura tradizionali che lavorano per sottrazione di materiale” [1].

Le tecniche di additive manufacturing comprendono quindi tutti i processi che permettono di realizzare componenti meccanici con varie e complesse forme geometriche, difficili da ottenere con altre tipologie di lavorazioni meccaniche secondarie molto costose [2].

Inoltre poiché si tratta di tecniche additive e non sottrattive, è possibile minimizzare gli sfridi e riducendo così il materiale scartato, che anzi può addirittura essere recuperato e utilizzato nuovamente.

Un altro aspetto molto importante che ha permesso di utilizzare l'AM in ambito industriale è la flessibilità progettuale dovuta ai pochi vincoli geometrici.

Tuttavia allo stato attuale, i limiti principali della tecnologia sono la scarsa comprensione fisica del processo e l'assenza di modelli fisici validi e la ristretta disponibilità di materiali utilizzabili o normati.

A tal proposito è necessario, per ogni lega adoperata, conoscere i parametri ottimali di processo, oltre che definire dei nuovi trattamenti termici idonei, anche in funzione delle caratteristiche meccaniche richieste [3].

In passato, le tecniche AM sono state denominate spesso con il termine Prototipazione Rapida (RP) (“Rapid Manufacturing”). Le prime macchine RP sono state commercializzate alla fine degli anni '80 e servivano principalmente per la produzione di modelli e prototipi [2].

Grazie allo sviluppo tecnologico queste tecniche sono diventate più affidabili e sono state adattate alla produzione di dispositivi e componenti più prestazionali.

In ambito scientifico e tecnologico, gli investimenti maggiori per lo sviluppo e l'industrializzazione dell'AM, sono forniti dalla ricerca aerospaziale, dal settore automotive e medicale [4] [5], i cui dispositivi hanno in genere forme complesse e particolari e un elevato valore aggiunto.

In ambito ortopedico, ad esempio, è importante avere la possibilità di progettare forme uniche e leggere in funzione delle caratteristiche fisiche peculiari del paziente [5].



Nel settore aerospaziale, la spinta è data dalla possibilità di ridurre il peso dei componenti senza comprometterne le funzionalità meccaniche e termiche, mediante l'utilizzo di leghe ad elevata resistenza specifica (leghe di titanio, superleghe di nichel) e rinnovando la progettazione adattandola all'AM.

In aggiunta a ciò, è stato reso possibile l'ottenimento di questi oggetti dalle forme complesse in un singolo passaggio di formatura (Figura 1.1), riducendo di molto i tempi e i costi.

Altri settori interessati alla ricerca sono quello dentale, produzione di inserti per stampi per leghe leggere e gioielleria [6].

Le tecnologie AM mostrano il loro grande potenziale e i loro vantaggi, offrendo soluzioni ottimali ed uniche nel momento in cui si richiede la fabbricazione di componenti non in serie, ma con proprietà, funzionalità e geometrie progettate ad hoc utilizzando materiali costosi e di difficile lavorazione in formatura tradizionale. Per tutti i casi usuali di formatura, ovvero per alti volumi produttivi di componenti in geometrie meno complesse realizzati con materiali facili da processare, le tecniche tradizionali continuano a essere ovviamente più vantaggiose [3].

Esistono diverse tipologie di AM [4], a seconda del materiale di partenza (polimerico, metallico, ceramico), del suo stato di aggregazione (liquido, polvere, filo o bacchetta) e del principio di deposizione (diretta, fusione localizzata, stereolitografica).

In Tabella 1.1 sono riportate per categorie le tecniche di additive manufacturing dedicate alla produzione di componenti metallici, secondo la norma ASTM F2792-12a [1].



*Tabella 1.1: Classificazione delle tecnologie AM per metalli.*

<b>Categoria</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Materiali</b>	<b>Tecnologie</b>
Direct Energy Deposition	Materiale fuso, durante la deposizione, da una sorgente termica di energia (laser, fascio elettronico, arco elettrico)	Metalli in polvere o fili	<b>DED/LMD/LENS*; EBF/EBDM</b>
Powder Bed Fusion	Una sorgente termica fonde localmente regioni specifiche di un letto di polveri	Metalli in polvere	<b>SLM/DMLS**; EBM; SLS</b>
Sheet Lamination	Materiale a strati, a lamine, fatti aderire a formare l'oggetto	Metalli, Ibridi	<b>UC; LOM</b>

\*DED, LMD e LENS sono diversi nomi commerciali utilizzati per definire la stessa tecnologia.

\*\*SLM e DMLS sono diversi nomi commerciali utilizzati per definire la stessa tecnologia.

Attualmente, i componenti metallici vengono principalmente realizzati con macchinari detti a letto di polvere "Powder Bed Fusion" (PBF) di cui fanno parte l'Electron Beam Melting (EBM) e il Selective Laser Melting (SLM). Quest'ultima tecnologia è anche conosciuta come Direct Metal Laser Sintering (DMLS) o Laser Beam Melting (LBM o Laser PBF).

Oltre alle tecniche PBF esistono altri processi di additive manufacturing in cui il materiale da fondere non è un letto di polvere, bensì fili (wire fed) direzionati e fusi da un fascio laser o elettronico direttamente sul pozzetto di fusione.

Similmente a quest'ultima, il Laser Metal Deposition (LMD) utilizza un filo o, tramite degli ugelli, delle polveri consentendo un più alto volume di produzione [3].



*Fig. 1.1: Struttura in lega di titanio ottenuta mediante AM. [7].*

## 1.2 Powder Bed Fusion

Il processo Powder Bed Fusion sfrutta l'energia termica prodotta da una sorgente laser per fondere dei punti specifici su uno strato di polvere metallica.

Quest'ultima poi, raffreddandosi solidifica e rende possibile la realizzazione della parte desiderata.

Il pezzo viene realizzato partendo da un design a strati, con un processo che viene ripetuto strato dopo strato per andare a comporre la forma finale.

A seguito della fusione di un livello viene depositata un nuovo strato di polvere metallica e il procedimento si ripete fino al completamento della parte.

Ciò che accomuna le differenti tecniche a letto di polvere è la logica e lo sviluppo del processo, che segue quest'ordine:

- Progettazione e realizzazione di un modello 3D CAD: si elaborano le specifiche e si prendono in considerazione i vincoli progettuali (spessori di pareti, profili degli angoli etc.).
- Elaborazione del file CAD in formato STL (Standard Tessellation Language) con dimensioni e risoluzioni ragionevoli.

- Realizzazione del supporto, detto anche substrato, che fa da collegamento tra il pezzo e la piattaforma di costruzione (“building platform”) e serve a fornire un supporto su cui costruire l’oggetto.
- Esecuzione del processo.
- Il pezzo viene rimosso dalla piattaforma e separato anche dal supporto. Dopodiché viene sottoposto ad eventuali trattamenti di distensione oppure trattamenti termici di ricottura per ridurre le tensioni residue.
- Dopo il controllo qualità, si eseguono trattamenti di finitura superficiali (sabbatura, pallinatura, lappatura, coating di rivestimento) ove necessari [3].

La Figura 1.2 mostra un esempio indicativo di step necessari alla realizzazione di un componente.

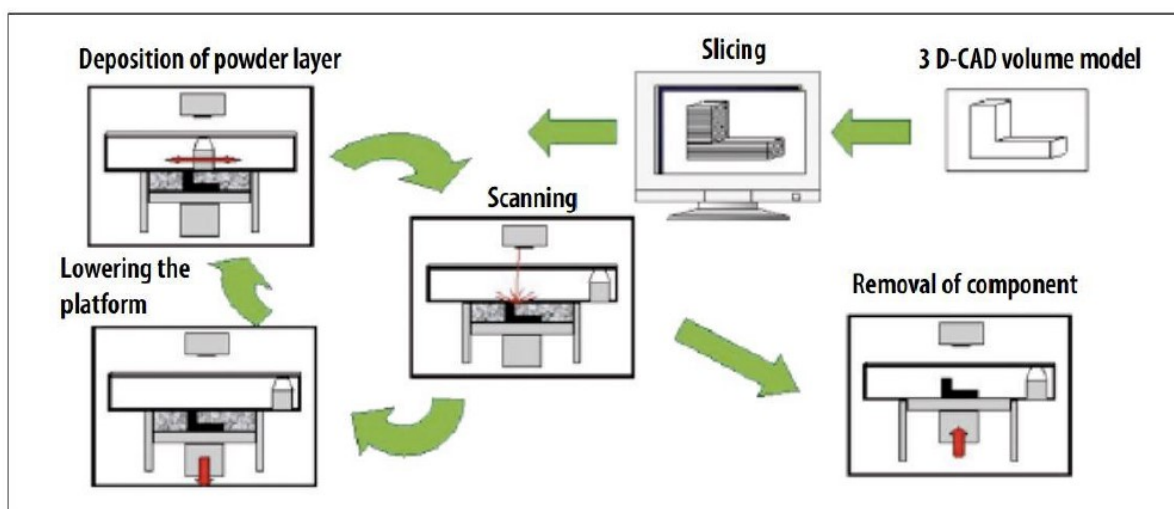


Fig. 1.2: Schema concettuale del processo SLM. [8].

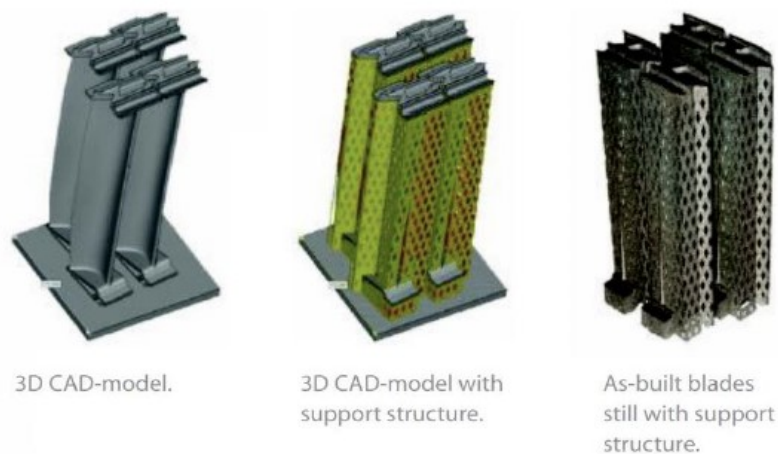


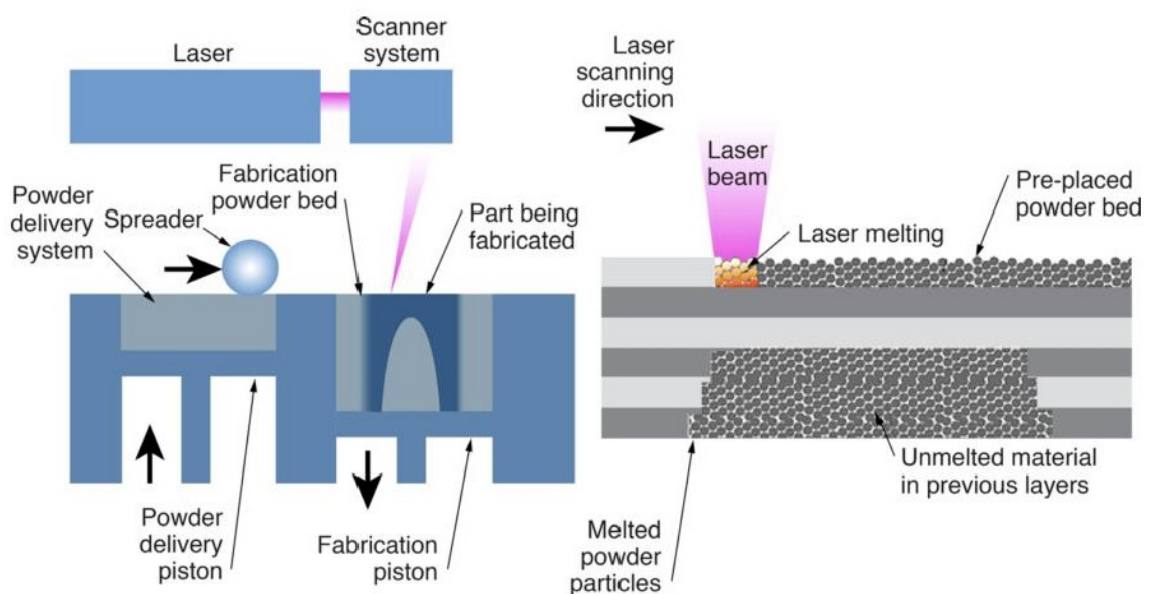
Fig. 1.3: Modellazione di una paletta di turbina. [9].

### 1.2.1 Selective Laser Melting (SLM)

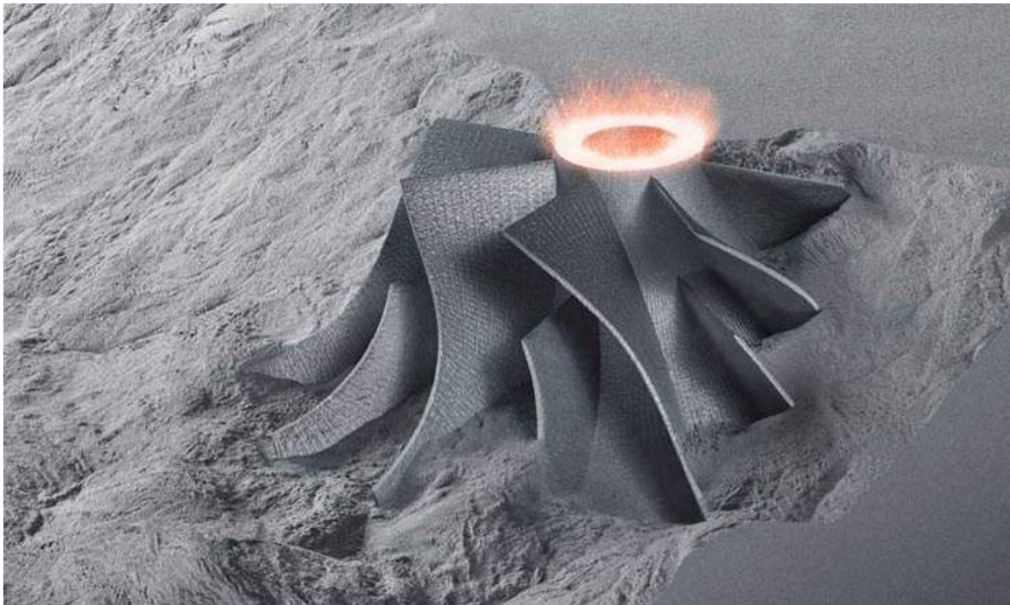
La tecnologia SLM è stata sviluppata nel 1995 dai Dr. Dieter Schwarze e Dr. Matthias Fockele nel Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) ad Aachen, in Germania e infine brevettata (ILT SLM patent DE 19649865).

I sistemi Laser Bed Powder Fusion sono rappresentati schematicamente in Figura 1.4. È presente una zona chiamata “Powder delivery system” che comprende un pistone di sostentamento della polvere, una lama o spreader per trasportare e ordinare gli strati di polvere e un pistone di sostegno del componente solidificato. Un'altra parte detta Energy delivery system comprende il laser e un sistema ottico che permette al fascio di raggiungere tutte le zone di lavoro [10].

Essi adoperano una sorgente laser di energia che si muove a scansione sul letto di polvere secondo le istruzioni del file CAD e che fonde localmente le polveri metalliche permettendone poi l'immediato raffreddamento e solidificazione. Il processo di fusione coinvolge uno strato di polveri dell'ordine delle decine di micron, a seconda dei parametri di processo. Una volta scansionato lo strato, il supporto si abbassa di una certa distanza permettendo a una lama (“spreader”, “recoater”, “rake”) di muovere e allineare le polveri metalliche nella camera di lavoro per la successiva operazione di fusione [3].



*Fig. 1.4: Rappresentazione schematica del processo SLM. [10].*



*Fig. 1.5: Realizzazione di una turbina per SLM. [11].*

### 1.2.2 Electron Beam Melting (EBM)

I processi di EBM sono, rispetto a quelli SLM, molto simili dal punto di vista concettuale presentando comunque delle differenze sostanziali.

Innanzitutto la sorgente di calore non è un laser, ma un fascio elettronico generato da un filamento di tungsteno collimato da due sistemi principali di lenti elettromagnetiche (Fig. 1.6): il primo è detto “focus coil” e ha il compito di focalizzare il fascio al diametro richiesto mentre il secondo, detto “deflection coil” indirizza il fascio alle giuste coordinate sulla piattaforma [3]. Le potenze raggiunte sono maggiori rispetto al metodo SLM: 3,0 kW – 4,0 kW – 7,0 kW [4] [12].

Quindi gli spessori di polvere in gioco durante la realizzazione del pozzetto di fusione sono maggiori così come anche la distribuzione dimensionale delle polveri utilizzate [5].

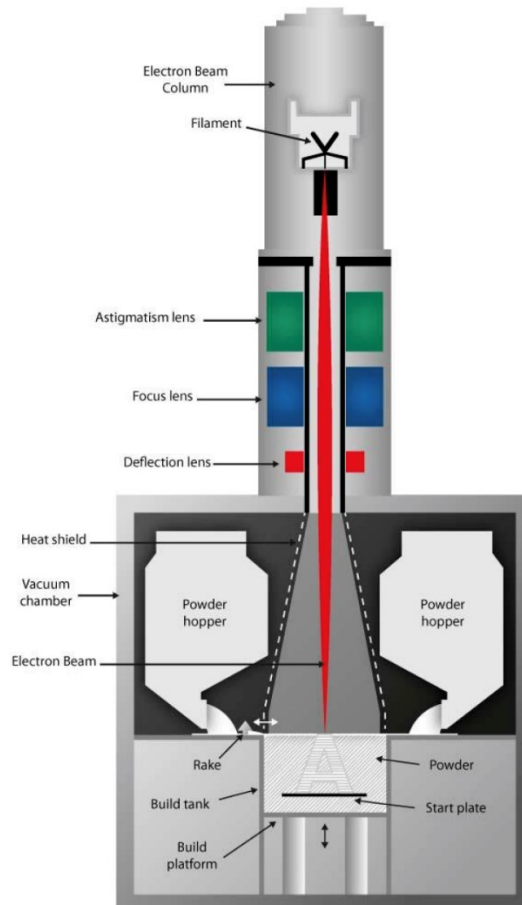
Il sistema viene fatto lavorare in condizioni di vuoto favorendo una buona stabilità del fascio elettronico e una protezione per i materiali più reattivi (ad esempio titanio e le sue leghe). Durante il funzionamento viene rilasciato un debole afflusso di elio nella camera di lavoro il quale consente di evitare un accumulo di carica elettrica sulle polveri le quali devono essere di per sé elettricamente conduttive così da smaltire la carica elettrica.

Successivamente alla realizzazione del vuoto sia la camera che le polveri vengono preriscaldate dal fascio elettronico non focalizzato il quale favorisce un principio di sinterizzazione il quale assicura una migliore fusione e una riduzione degli stress termici sul



componente finale. Successivamente grazie ad una riduzione dell'intensità di corrente e della velocità di scansione si completa la fusione [2].

Tale tecnica è utilizzata per la realizzazione di componenti per il settore aerospaziale e non solo come le palette di turbina.



*Fig. 1.6: Schema di un sistema EBM Arcam. [4].*

### 1.3 Laser Metal Deposition (LMD)

#### 1.3.1 Generalità

La tecnica Laser Metal Deposition (LMD), anche nota come “Direct Metal Deposition” (DMD) o “Direct Energy Deposition” (DED), rappresenta un processo produttivo che attraverso l’utilizzo di energia termica permette di fondere dei materiali che quindi possono essere depositati.

È l’unica tecnica di produzione additiva multi-DOF in grado di realizzare componenti attraverso la deposizione di polvere metallica tramite dei sistemi a ugelli (Figura 1.8) o da filamento direttamente sul pozzetto di fusione.

Il processo Laser Metal Deposition utilizza energia termica generata da una sorgente laser (YAG o a CO<sub>2</sub>), focalizzata per fondere la polvere metallica che viene irrorata nel punto focale del raggio laser che quindi fonde la polvere con il componente su cui viene depositata.

Il laser è coassiale alla testa di deposizione, che si muove su un numero di assi compresi tra i 3 e i 5.

La polvere metallica viene applicata automaticamente da un ugello il quale insieme al pozzetto forma un sistema protetto da una miscela gassosa di elio o argon.

Le potenze in gioco variano dai 500 W ai 5 kW a seconda delle case produttrici di questi sistemi e dei diversi modelli commercializzati (Figura 1.7) [13].





	Model Name	Source of Energy	Purge System	DOF	Working Envelope
<b>OPTOMECH</b> 	LENS 450	Laser-400-watt IPG fibre Laser	Argon	3-Axis	100x100x100 mm <sup>3</sup>
<b>DMG Mori Seiki</b> 	LASERTEC 65 3D	Laser- 2500-watt fibre coupled diode laser	Argon	5-Axis	735x650x560 mm <sup>3</sup>
<b>SCIAKY</b> 	The EBAM 110	Electron Beam	Vacuum	3-Axis	1778 × 1194 × 1600 mm <sup>3</sup>
<b>MAZAK</b> 	Integrex i-400 AM	Laser- 1000-watt fibre	Argon	5-Axis	1011x1519 mm <sup>3</sup>

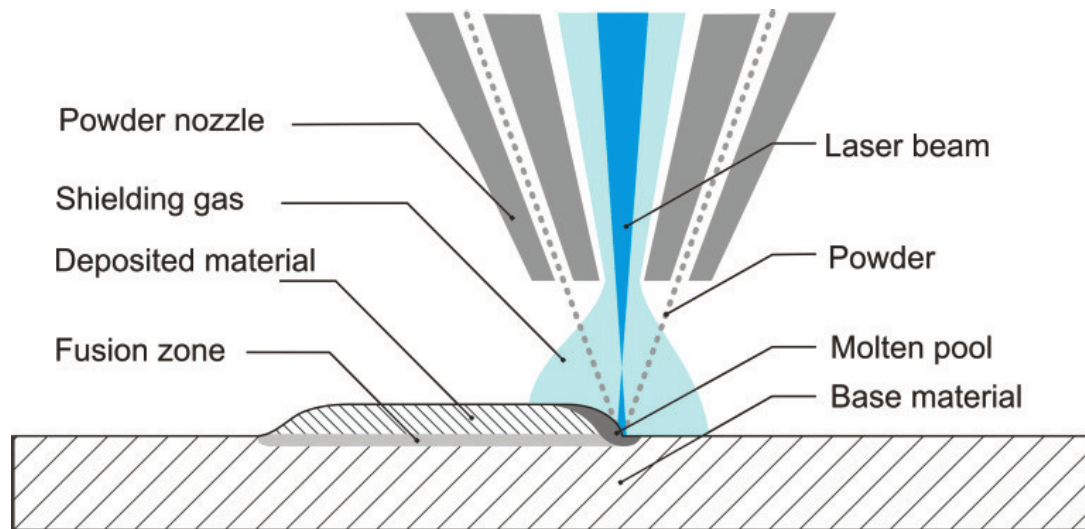
Fig. 1.7: Sistemi LMD commercializzati. [14].

Il processo richiede la corretta regolazione di numerosi parametri di processo come potenza laser, velocità di scansione, velocità di avanzamento polvere, distanza di lavoro, preriscaldamento temperatura, flusso del gas di trasporto, flusso del gas di protezione e raffreddamento intervalli.

Un aspetto fondamentale della tecnica Laser Metal Deposition è la sua capacità di realizzare componenti caratterizzati da una porosità molto inferiore rispetto a quella ottenuta con gli

altri processi additive; ciò consente quindi di ottenere strutture caratterizzate da migliori proprietà meccaniche.

È inoltre possibile installare una tavola rotante e inclinabile per mantenere l'area di fusione su un piano orizzontale. Questa potenzialità rende il processo idoneo per aggiungere parti a pezzi già esistenti, così come per riparazioni e rivestimenti [14].



*Fig. 1.8: Schema generico di una macchina LMD "Powder fed". [15].*

### 1.3.2 I settori d'impiego

La Laser Metal Deposition è molto più che semplice stampa 3D in quanto la versatilità dei settori d'impiego di questo procedimento spazia dal rivestimento e dalla riparazione di componenti ai processi di giunzione, come la copertura di fessure, fino alla generazione di componenti completi con assoluta libertà creativa.

Con i sistemi LMD si realizzano componenti di grandi dimensioni come palette di turbina, alberi motori, ingranaggi realizzati in acciaio, leghe di titanio e superleghe base nichel [3]. Tale tecnica è utilizzata nel settore aeronautico e aerospaziale, nella tecnologia energetica, in petrolchimica, nell'industria automobilistica e nella tecnica medica [13].

### 1.3.3 Vantaggi

I principali vantaggi di questa tecnica possono essere così riassunti:

#### **Alte frequenze di deposizione e libertà delle forme:**

È possibile realizzare strutture grossolane e molto fini: entrambe con alte frequenze di deposizione rispetto ad altri procedimenti generativi.

Tale tecnica infatti lascia ampia libertà di design nella lavorazione individuale di componenti, soprattutto se la si confronta con la lavorazione con stampi generici permettendo quindi di



creare strutture completamente nuove o di modificare la forma e la struttura superficiale di componenti esistenti.

In questo modo si possono generare anche completi componenti di grande formato, che non sono idonei per gli ingombri di una stampante 3D.



*Fig. 1.9: Parti realizzate mediante tecnica LMD. [16].*

**Varietà e semplice modifica del materiale utilizzato:**

La Laser Metal Deposition permette di utilizzare diverse tipologie di materiali, i quali possono essere utilizzati singolarmente o combinati con altri così da realizzare la miscela desiderata.

Nello stesso processo, infatti, possono essere attivati più contenitori per polvere, avendo così la possibilità di creare leghe particolari in base alle specifiche esigenze.

La combinazione di materiali diversi permette di creare strutture con differente composizione come mostrato in figura 1.10 [13].



*Fig. 1.10: Giunto meccanico realizzato con tre differenti materiali mediante LMD. [16].*

### **Flessibilità:**

Con la saldatura laser a riporto si possono lavorare strutture 3D su superfici esistenti non piane e così realizzare in modo semplice modifiche geometriche.

Ad esempio è possibile realizzare un rivestimento attraverso la tecnica di Laser Wire Cladding (Figura 1.11) dove la parte viene messa in rotazione su sé stessa mentre viene realizzata su di essa la deposizione di materiale che costituirà il rivestimento.

Ciò permette di rinforzare localmente il componente il quale nelle zone sottostanti può essere costituito da materiali di minor costo.

L'applicazione di uno strato protettivo da corrosione o usura fa aumentare il valore dei componenti e li protegge da forti sollecitazioni meccaniche o chimiche.



*Fig. 1.11: Applicazione della tecnica LMD con il processo di Laser Wire Cladding. [16].*

#### 1.4 Sistema LMD utilizzato alla Wayne State University

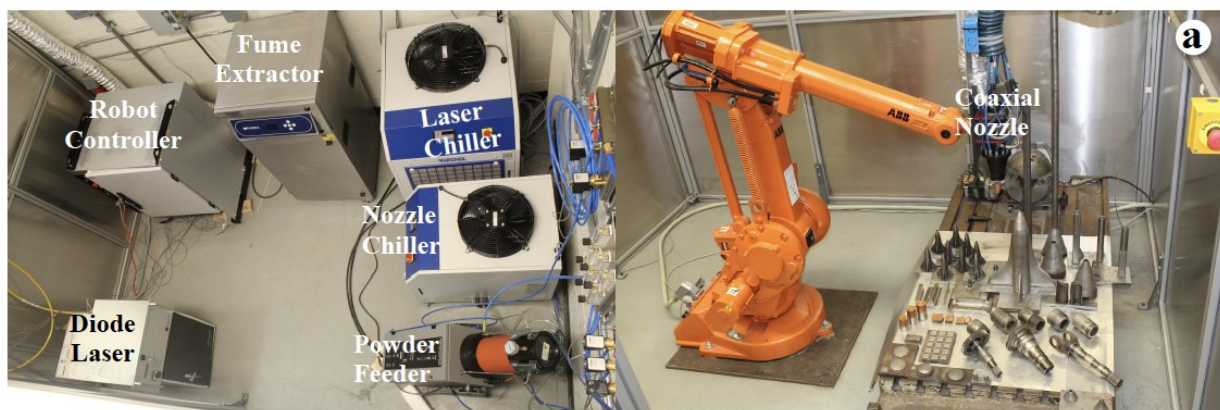
La tecnologia Laser Metal Deposition (LMD) utilizzata per la realizzazione dei provini testati in questo lavoro di tesi è stata sviluppata presso Wayne State University ed è costituito dai seguenti componenti mostrati in Figura 1.12.

- Robot controller: Robot ABB IRB- 1410; si tratta di Robot a sei assi che permette di movimentare il sistema di deposizione così da realizzare il percorso di stampaggio.
- Diode Laser: il laser a diodi da 1,2KW; permette di apportare l'energia necessaria sotto forma di calore in grado di fondere il materiale metallico da depositare. La potenza indicata sopra è quella massima ma è possibile regolarla a livelli più bassi durante la definizione dei parametri di processo che precede la deposizione.
- Coaxial Nozzle: l'ugello coassiale è un elemento di fondamentale importanza perché svolge diversi ruoli. Innanzitutto permette di apportare al bagno fuso il gas protettivo e quindi la polvere metallica da depositare direzionandola verso il laser. Esso realizzato

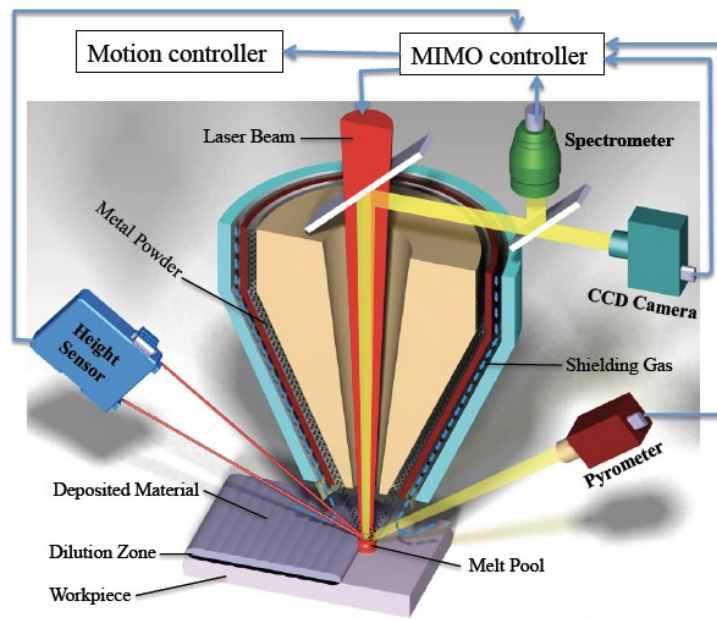
in maniera tale da presentare dei canali così da consentire il passaggio di acqua per il suo raffreddamento. Inoltre di fondamentale importanza è la sua capacità di poter essere strumentato con dispositivi di vario tipo come il pirometro per il controllo della temperatura e il sensore di altezza per monitorare la quota di stampaggio (Figura 1.13).

- Powder Feeder Bay State 1200SP-1 Feeder; l'alimentatore raccoglie e invia al sistema la polvere metallica utilizzata durante la deposizione. Può essere controllato da remoto così da poter garantire un corretto dosaggio della polvere durante il processo.
- Laser and Nozzle Chiller: si tratta rispettivamente del refrigeratore laser e degli ugelli che permettono di raffreddare il liquido utilizzato per la refrigerazione così da mantenere stabili i livelli di temperatura del sistema.
- Fume Extractor: l'estrattore di fumi favorisce il ricircolo dell'aria all'interno della stanza, sigillata per garantire una maggiore sicurezza, nella quale avviene lo stampaggio.

## Laser Metal Deposition (LMD) Technology



*Fig. 1.12: Sistema LMD della Wayne State University. [16].*



*Fig. 1.13: Schematizzazione dell'ugello coassiale e dei dispositivi con i quali è strumentato. [16].*

Questa tecnologia LMD funziona secondo il principio dell'energia diretta per realizzare il processo di deposizione.

Nel processo LMD, viene focalizzato un raggio laser ad alta energia sul substrato o uno strato precedentemente depositato per formare un pool di fusione; quindi le polveri metalliche vengono simultaneamente inviate nel pool di fusione da uno o più ugelli coassiali appositamente progettato.

L'ugello è progettato in modo tale che i flussi di polvere convergono nello stesso punto del focalizzato raggio laser.

Un robot viene utilizzato per controllare il movimento del raggio laser come da percorso utensile il quale viene generato dal modello CAD di un oggetto per creare un componente 3D strato per strato.

Nel presente processo, l'argon viene utilizzato sia per realizzare la giusta schermatura, prevenendo quindi l'ossidazione del bagno fuso, sia per inviare la polvere a quest'ultimo.

Tale sistema consente di controllare l'apporto di calore nel substrato evitando eventuali distorsioni e grazie all'elevata velocità di raffreddamento ( $10^3$ - $10^6$  K/s) consente di ottenere parti caratterizzate da una microstruttura fine.

Inoltre attraverso l'utilizzo di più alimentatori di polvere è possibile miscelare diverse polveri scegliendo la concentrazione di ciascuna così da controllare in tempo reale la composizione del materiale che si sta depositando [17].



## 2 Superleghe di Nichel

### 2.1 Classificazione delle superleghe

Lo sviluppo delle superleghe di Nichel trova le sue origini nella necessità di utilizzare nuovi materiali per alcuni componenti critici nei motori a reazione, esigenza che si presentò fin dalla fine della seconda guerra mondiale.

Le prestazioni richieste a questi nuovi materiali dovevano risolvere i problemi di resistenza a caldo, specialmente nelle condizioni particolarmente più critiche delle palette delle turbine (Figura 2.1) [18].

Con il termine superleghe ci si riferisce alle leghe metalliche a base di nichel, nichel-ferro e cobalto con un'elevata quantità di alliganti atti ad ottenere un'elevata resistenza meccanica ad alte temperature (fino a 1000-1100 °C).

Le superleghe a base nichel sono le più prestazionali e sono sfruttate per la loro resistenza meccanica, alla fatica termomeccanica nell'intervallo di temperature tra i 540 °C e i 1000 °C e apprezzate anche per la loro resistenza alla corrosione sia a temperature ambiente che alle elevate temperature (fino a 1000°C) [3].

Le caratteristiche descritte spiegano il motivo del perché questi materiali sono utilizzati per la realizzazione di turbine e motori aeronautici (Figura 2.2) a gas sollecitati meccanicamente e termicamente, ma anche in molti altri campi in cui è richiesta un'elevata resistenza alla corrosione; industria medica, chimica, petrolchimica, sottomarini, reattori nucleari [3].



*Fig. 2.1: Palette di turbina in superlega di Nichel realizzate con tecniche AM.*



*Fig. 2.2: Componenti per turbine del settore aerospaziale realizzati in superlega.*

Il reticolo cristallino della matrice austenitica “ $\gamma$ ” di queste superleghe è FCC (cubico a facce centrate) a qualsiasi temperatura, e ciò rende il materiale duttile e anche incline a rispondere positivamente ai meccanismi di rafforzamento: soluzione solida oppure indurimento per precipitazione.

Il rafforzamento per precipitazione avviene attraverso la precipitazione di seconde fasi nella matrice della superlega.

I precipitati rafforzano il materiale ostacolando il movimento delle dislocazioni; le leghe rafforzate per soluzione solida hanno elementi alliganti che vanno a posizionarsi in maniera interstiziale o a sostituire atomi della matrice, distorcendone il reticolo e frenando il movimento delle dislocazioni.

Gli elementi alliganti più comuni per avere questi effetti sono: Ti, Al, Nb che permettono la precipitazione delle principali fasi che rafforzano il materiale, specie alle alte temperature.

Esse sono:

- $\gamma'$ : indica una soluzione solida di composizione chimica media  $Ni_3Ti$  o  $Ni_3Al$  o un intermetallico misto ( $Ni_3(Al, Ti)$ ) coerente con la matrice e stabile alle alte temperature, il che migliora sensibilmente le caratteristiche meccaniche delle leghe. Morfologicamente può apparire sferica, globulare, a blocchi o cuboidale a seconda del tempo di e della temperatura a cui le leghe sono state trattate.



Maggiore è la percentuale di  $\gamma'$  nella lega, maggiore la resistenza ma peggiore la sua produzione e lavorabilità: per questo motivo la percentuale in volume varia tra il 20% e il 40% [3].

Essa è la principale fase rafforzante per molte superleghe [19] [20].

- $\eta$ : è una fase di formula  $Ni_3Ti$  di reticolo HCP (esagonale compatto), che riduce le proprietà meccaniche della lega.

Essa si forma per sostituzione della fase  $\gamma'$  per lunghi tempi di trattamento in posizione intergranulare (in forma cellulare) o intragranulare (a forma di piastrine aciculari).

La sua formazione è tanto più favorita quanto maggiore è il quantitativo di Ti e  $\gamma'$  [20].

- $\gamma''$ : Precipitato metastabile di  $Ni_3Nb$  che presenta una struttura TCC (tetragonale a corpo centrato).

È la principale fase rafforzante della lega Inconel 718 e precipita sotto forma di dischetti con dimensione nanometriche.

Essa è una fase metastabile e per trattamenti termici prolungati oppure trattamenti termici ad alta temperatura evolve nella fase  $\delta$  [19] [20].

- $\delta$ : fase con formula chimica  $Ni_3Nb$  e reticolo ortorombico. Precipita generalmente per esposizione termica tra i 815 °C e i 900 °C nelle superleghe a base Ni o per tempi prolungati a più basse temperature [19] [20].

- Mo, Co, W, V, Cr sono altri elementi che rafforzano le leghe per soluzione solida;
- Al, Cr, La, Y, Ce hanno la capacità di migliorare le resistenze ad ossidazione e corrosione anche ad alte temperature;
- Cr, Ta, Mo, Hf, W, Ti, Nb sono elementi metallici ad alto punto di fusione predisposti a formare carburi fini e stabili di varie composizioni (come MC ricco in molibdeno,  $M_{23}C_6$  ricco in cromo etc.) che hanno il compito sia di rafforzare i bordi di grano e



inibirne lo scorrimento reciproco ad alta temperatura sia di bloccare il movimento delle dislocazioni [3].

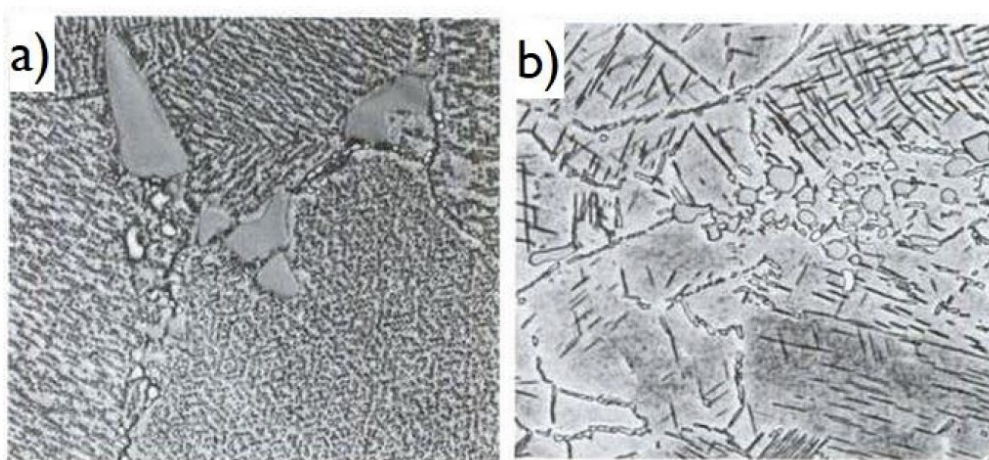
D'altra parte i carburi hanno la tendenza ad infragilire il materiale e a ridurre la resistenza a corrosione, sottraendo Cr o Mo, per cui percentuali in peso tipiche del carbonio nella lega non superano mai lo 0,1%.

Esistono anche altre fasi ad alto impacchettamento dette TCP (Topological Closed Packed), indesiderate che riducono resistenza e duttilità delle leghe.

Esse sono di tre tipi:

- $\mu$ : fase con reticolo romboedrico con formula chimica  $(Fe, Co)_2(Mo, W)_6$  presente in alcune leghe con un'elevata percentuale di tungsteno o molibdeno. Si forma ad elevate temperature e appare con morfologia ad aghetti grossolani [20].
- **Laves**: fase con formula generale  $(Fe, Mn, Cr, Si)_2(Mo, Ti, Cb)$  e struttura esagonale. Appare con morfologie irregolari globulari allungate o a placchette dopo esposizione ad alte temperature [20].
- $\sigma$ : fase tetragonale con diverse formule chimiche  $(FeCr, FeCrMo, CrFeMoNi, CrCo, CrNiMo)$ . È una fase che appare di forma irregolare allungata [3] [20].

La Figura 2.3 mostra due diverse microstrutture di due leghe di nichel con alcuni di questi precipitati in evidenza.



*Fig. 2.3: a) Microstruttura di una lega Astroloy dopo invecchiamento: si notano carburi MC a bordograno e i precipitati  $\gamma'$  intragranulari. b) Microstruttura della lega Inconel 718 con in evidenza fasi di Laves e fasi  $\delta$  aghiiformi. [3] [20].*

Le composizioni delle superleghe di nichel sono molte e sono state ottimizzate nel corso dell'ultimo secolo soprattutto dalla Special Metals Corporation e dalla Haynes International Inc. che sono ancora oggi i principali produttori [21].

Di pari passo, le tecnologie produttive si sono evolute e rinnovate, permettendo la nascita di superleghe dalle caratteristiche uniche (ad esempio quelle monocristalline o a dispersione di ossido) che ne hanno permesso l'ulteriore miglioramento delle caratteristiche termomeccaniche.

In Tabella 2.1 è mostrato un elenco delle principali leghe commerciali, i loro meccanismi di rafforzamento e la proprietà per cui sono più apprezzate (resistenza a corrosione o resistenza ad alta temperatura) [3].

**Tabella 2.1:** Principali leghe di nichel commercializzate. [21].

<i>Alloy family</i>	<i>Alloy system</i>		<i>Commercial alloy examples</i>	
Corrosion-resistant	Solid-solution strengthened	Ni	Nickel 200	
		Ni-Cu	400, K-500	
		Ni-Mo	B-2, B-3 <sup>®</sup>	
		Ni-Cr-Mo	G-35 <sup>®</sup> , 59	
		Ni-Cr-Mo-W	C-276, C-22 <sup>®</sup> , 686	
		Ni-Cr-Mo-Cu	C-2000 <sup>®</sup>	
		Ni-Mo-Cr	HYBRID-BC1 <sup>®</sup>	
High-temperature	Solid-solution strengthened	Ni-Fe-Cr	800H, RA330 <sup>®</sup> , HR-120 <sup>®</sup>	
		Ni-Cr-Fe	600, 690	
		Ni-Cr-Fe-Mo	HASTELLOY X	
		Ni-Cr-Mo-Nb	625, 625SQ <sup>®</sup>	
		Ni-Cr-Co-Mo	617	
		Ni-Cr-W-Mo	230 <sup>®</sup>	
		Ni-Co-Cr-Si	HR-160 <sup>®</sup>	
		Precipitation-strengthened	Ni <sub>2</sub> (Mo,Cr)	242 <sup>®</sup> , 244 <sup>®</sup>
			γ'	Waspaloy, René 41, 282 <sup>®</sup>
			γ''	718, 718 Plus <sup>®</sup>
	Nickel aluminides	Ni <sub>3</sub> Al	IC-25, IC-218	
	Oxide-dispersion strengthened	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MA754, MA6000	
	Single-crystal superalloys	N/A	CMSX-4, TMS 162	

Le fasi rafforzanti servono ad aumentare le proprietà meccaniche della lega, ma la loro eccessiva formazione può ridurre la saldabilità della lega oppure renderle difficili da deformare plasticamente per le lavorazioni meccaniche [36].

Ciò è tanto più critico quanto più severe sono le performance richieste e quanto più complesse sono le geometrie dei componenti.

Per questo motivo le tecnologie AM possono offrire una soluzione, dato che permettono l'ottenimento di pezzi in forme complesse anche in near-net-shape in una sola sessione di

lavoro, senza la necessità di utilizzare stampi e dispendiose rifiniture secondarie, con risparmio di tempo e di materiale.

Dal momento che le tecniche additive riguardano la continua fusione e immediata solidificazione di una porzione di materiale strato per strato, è possibile in prima approssimazione comparare la saldabilità di una lega con la sua formabilità in ambito AM.

Quindi non tutte le superleghe sono adattabili a questi processi di fusione, ma quelle più saldabili vi si adattano con più facilità.

Un indice di saldabilità è dato dalla presenza di  $\gamma'$  (quindi di Ti e Al) e di elementi proni a formare carburi quali Cr e Co (Figura 2.4).

Le leghe ricche in Ti e Al sono più difficili da processare perché possono dar origine al fenomeno dello “strain-age cracking” ovvero a delle criccate localizzate dopo saldatura e dopo che il pezzo subisce trattamenti termici.

Invece la formazione di carburi e la loro presenza a bordo grano riduce drasticamente la duttilità delle superleghe già a metà della temperatura di fusione della lega, rendendole più suscettibili alla saldatura [3] [22].

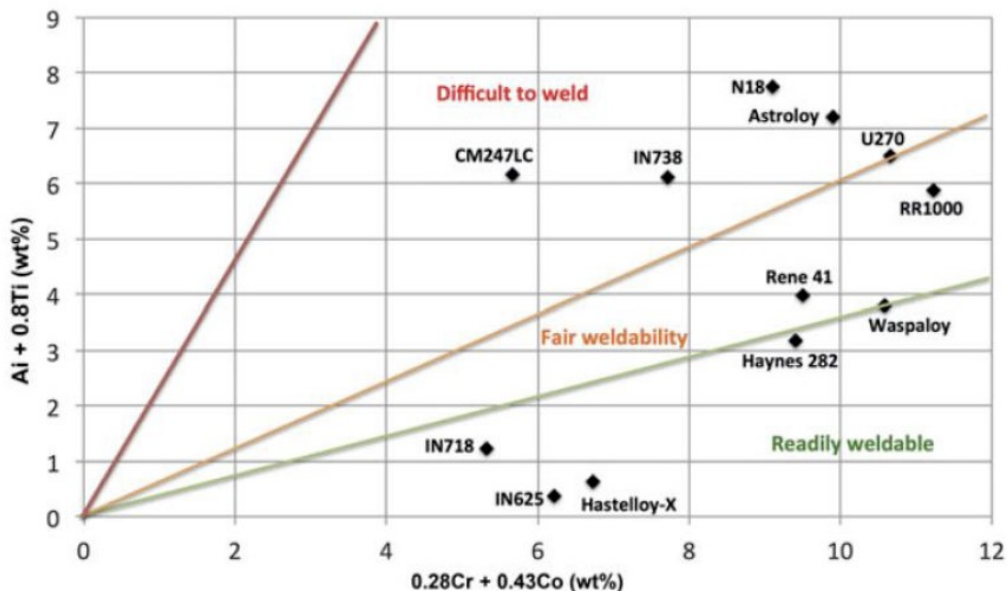


Fig. 2.4: Alcune tra le principali leghe di nichel in funzione della loro saldabilità. [22]

Dalla Figura 2.4 si evince che le leghe più saldabili sono principalmente quelle rafforzate per soluzione solida come l’Inconel 625 e l’Inconel 718 indurita per precipitazione [3].

Infatti queste due leghe sono quelle più utilizzate e commercializzate nel settore dell’Additive Manufacturing.

## 2.2 Microstruttura delle superleghe di nichel da AM

Come spiegato nel paragrafo precedente, le superleghe che più si contraddistinguono per stabilità ed elevate proprietà meccaniche, termiche e fisiche sono le superleghe di Nichel e in particolare Inconel 625 e Inconel 718.

Le polveri di superleghe così complesse a livello compositivo e microstrutturale possono presentare caratteristiche microstrutturali indesiderate oltre a criticità derivanti dalla produzione delle polveri stesse: porosità, morfologia e dimensione.

Per ottenere un componente finale di alta qualità è quindi necessario controllare il processo di stampa additiva a partire dalla produzione delle polveri utilizzate.

Tuttavia, come tutti i materiali sottoposti alle tecnologie additive, anche queste polveri presentano le tipiche tracce di pozza fusa che si genera durante la fase di stampa.

La microstruttura tipica dello stato as-built, ovvero del materiale appena formato, è quella in cui i grani sono allungati lungo l'asse z, cioè la direzione di accrescimento del materiale, originando una forte anisotropia (Figura 2.5).

Questi grani crescono in maniera epitassiale attraverso i vari strati fusi e solidificati seguendo il gradiente termico, anch'esso fortemente direzionato verso il substrato.

A causa del rapido raffreddamento (106 K/s), la microstruttura è metastabile e non idonea all'uso industriale.

A seconda della direzione di crescita della stampa 3D, i campioni di superlega di Nichel possono mostrare delle caratteristiche metallurgiche differenti:

- grani colonnari lungo la direzione di crescita del componente
- grani dendritici equiassiali in direzione ortogonale

Comunemente si formano strutture dendritiche molto fini di due tipi: colonnari e cellulari (Figura 2.5) [3].

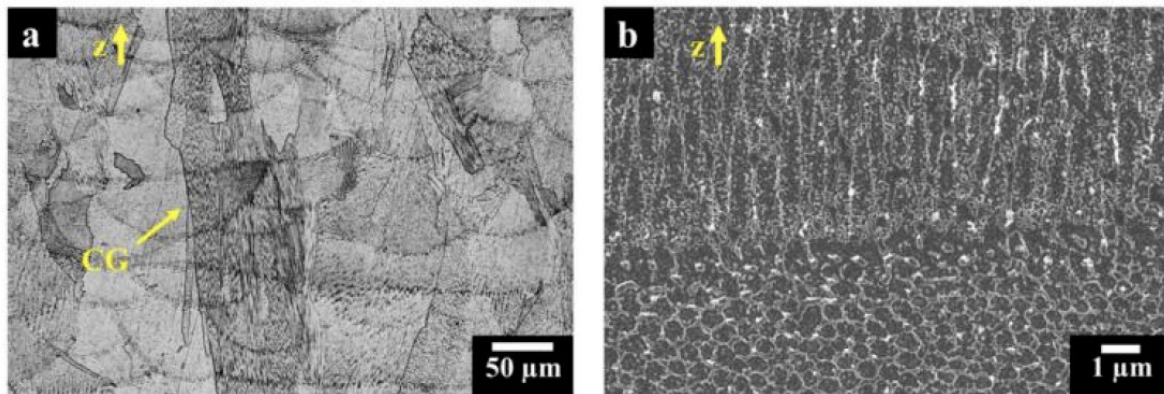


Fig. 2.5: a) Grani colonnari (CG) e pozzetti di fusione; b) Dendriti colonnari e cellulari. [23].

Durante la stampa, a causa del continuo riscaldamento e rapido raffreddamento indotto dalle passate laser e dalla presenza di elementi leganti come Niobio e Molibdeno all'interno della superlega stessa, il processo di segregazione degli elementi leganti può portare alla formazione sia di fasi che aumentano la resistenza del materiale ( $\gamma'$  e  $\gamma''$ ) che di fasi indesiderate che al contrario lo rendono più debole e quindi inadatto alle alte prestazioni.

Questi effetti collaterali mi permettono di introdurre un altro argomento correlato, rappresentato cioè dall'utilizzo dei forni a vuoto.

### 2.2.1 Difetti tipici

Durante la formatura delle superleghe AM si possono generare dei difetti indesiderati, se il processo non è ben ottimizzato: le porosità residue da *key hole*, il *balling* e il *cracking*.

Tali difetti si possono generare quando i parametri di processo non sono corretti; in particolare il *key hole* si genera se la potenza del fascio laser è troppo elevata e la velocità di scansione è troppo bassa.

In questo modo il pozzetto di fusione, che assume dimensioni maggiori del dovuto e forme tipiche (a *key hole* per l'appunto), non riesce a portar via il gas che vi rimane intrappolata sotto forma di porosità.

Il *balling* d'altro canto si genera quando la potenza è troppo bassa e la scansione troppo veloce: il materiale non ha le condizioni per fondere e risolidificarsi in maniera efficace, ma rimane altamente viscoso e tende a non saldarsi localmente e a formare particelle di dimensioni micrometriche all'interno del poro (Figura 2.6b) [3].

La formazione di cricche (*cracking*) (Figura 2.6a) nelle superleghe a base nichel può essere causato da diversi meccanismi:

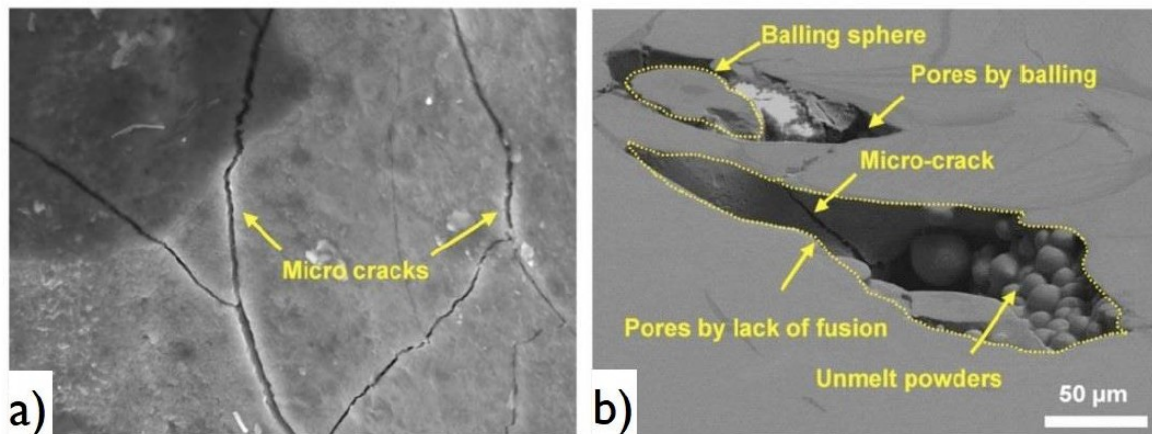


- In letteratura, uno di questi è lo *strain-age hardening*; In questo caso specifico le cricche sono dovute all'elevatissima concentrazione di elementi alliganti (in particolare Ti e Al) che possono generare discontinuità e porosità nel materiale quando si effettuano trattamenti termici dopo la saldatura nella zona fusa o nella zona termicamente alterata [19];
- Le micro-cricche possono formarsi anche durante il raffreddamento da fuso (*solidifaction cracking* o *hot cracking*): può accadere che le zone inter dendritiche siano ancora liquide e provochino micro cricche durante la loro solidificazione facendo facilmente collassare la zona dendritica [22];
- Un altro fenomeno è quello detto *liquation cracking*. In questo caso le cricche possono nucleare a bordo grano, dove precipitano fasi eutettiche come  $\gamma'$  e carburi a basso punto di fusione. Queste zone del materiale, anche se sono lontane dalla sorgente di calore, sono velocemente riscaldate sopra la temperatura eutettica. Sotto i forti stress residui che si generano durante il processo di deposizione, questi film di liquido hanno le potenzialità di far nucleare e propagare cricche nel materiale [3].

La formazione dei precipitati lungo il bordo di grano unito alle alte densità di dislocazioni possono portare la formazione delle cricche.

Questi difetti possono essere ridotti o limitati dapprima agendo sulla composizione della superlega, ma anche controllando i parametri di processo: in particolar modo la potenza e la strategia di scansione [3].





*Fig. 2.6: Esempio di microcricche (a) e pori da balling (b) su un campione di Inconel 625. [24].*

### 2.2.2 Trattamenti termici sottovuoto delle superleghe di nichel

Per evitare gli effetti indesiderati descritti nel paragrafo precedente, occorre effettuare un'attenta analisi sulla composizione e sulla quantità delle fasi, così da poter intervenire nel correggere la microstruttura del materiale attraverso appositi trattamenti termici in vuoto. I trattamenti di solubilizzazione e invecchiamento devono essere necessariamente effettuati in vuoto a causa della presenza di elementi leganti facilmente ossidabili in questo tipo di superleghe.

La temperatura e la durata del trattamento sono controllati in modo preciso al fine di garantire un adeguato compromesso tra la solubilizzazione dei precipitati indesiderati e la crescita incontrollata del grano.

Il forno per trattamenti termici in vuoto consiste in una camera inerte e priva di ossigeno, dotata di apposite pompe per creare una condizione profonda di vuoto e da un sistema di controllo preciso della temperatura.

Il trattamento che viene effettuato all'interno del forno da vuoto permette di intervenire termicamente sui materiali più "difficili" e in modo più efficace rispetto ai classici forni industriali.

Per quanto attiene le componenti realizzate con stampa 3D, queste, essendo letteralmente costruite mediante la fusione delle polveri con il laser in atmosfera protetta, necessitano di un post-processo in atmosfera controllata che solo il forno per trattamenti termici sottovuoto può garantire.



Una volta usciti dal forno, i componenti prodotti con tecnologia additiva sono caratterizzati da una minore presenza di distorsioni o di eventuali difetti di fabbricazione e sono quindi pronti per essere applicati nei settori industriali strategici.

### 2.2.3 Proprietà meccaniche

Le caratteristiche meccaniche non solo variano in relazione al trattamento termico che subisce il materiale (dallo stato as-Built, al solubilizzato, al rafforzato per precipitazione) ma anche alla tecnica AM adoperata (SLM, EBM, DMD) e dai parametri di processo adoperati per la fabbricazione di quel componente (potenza, strategia di scansione) che generano prodotti con caratteristiche diverse.

L'anisotropia microstrutturale dello stato as-built si manifesta macroscopicamente con una differenza di resistenza meccanica alla trazione tra l'asse z e le direzioni ad esso perpendicolare.

Il materiale in queste condizioni non ha le specifiche necessarie per poter operare industrialmente e deve necessariamente subire dei trattamenti termici.

In figura 2.7 sono riportate le proprietà meccaniche per campioni in Inconel 718 realizzati per SLM e DMD: si osserva come il materiale nelle condizioni as-built risulti essere meno prestazionale rispetto al forgiato e come ci sia una differenza tra le due direzioni verticale e orizzontale, che risulta sensibilmente più resistente.

Questo comportamento non è lo stesso per tutte le leghe di nichel: la lega Inconel 625 nello stato as-built, ad esempio, esibisce valori maggiori di snervamento e di rottura dello stesso materiale forgiato.

Solo con idonei trattamenti di HIP e adeguati invecchiamenti le proprietà della lega AM di Inconel 718 divengono comparabili se non migliori del corrispettivo forgiato, e l'anisotropia meccanica scompare [3].



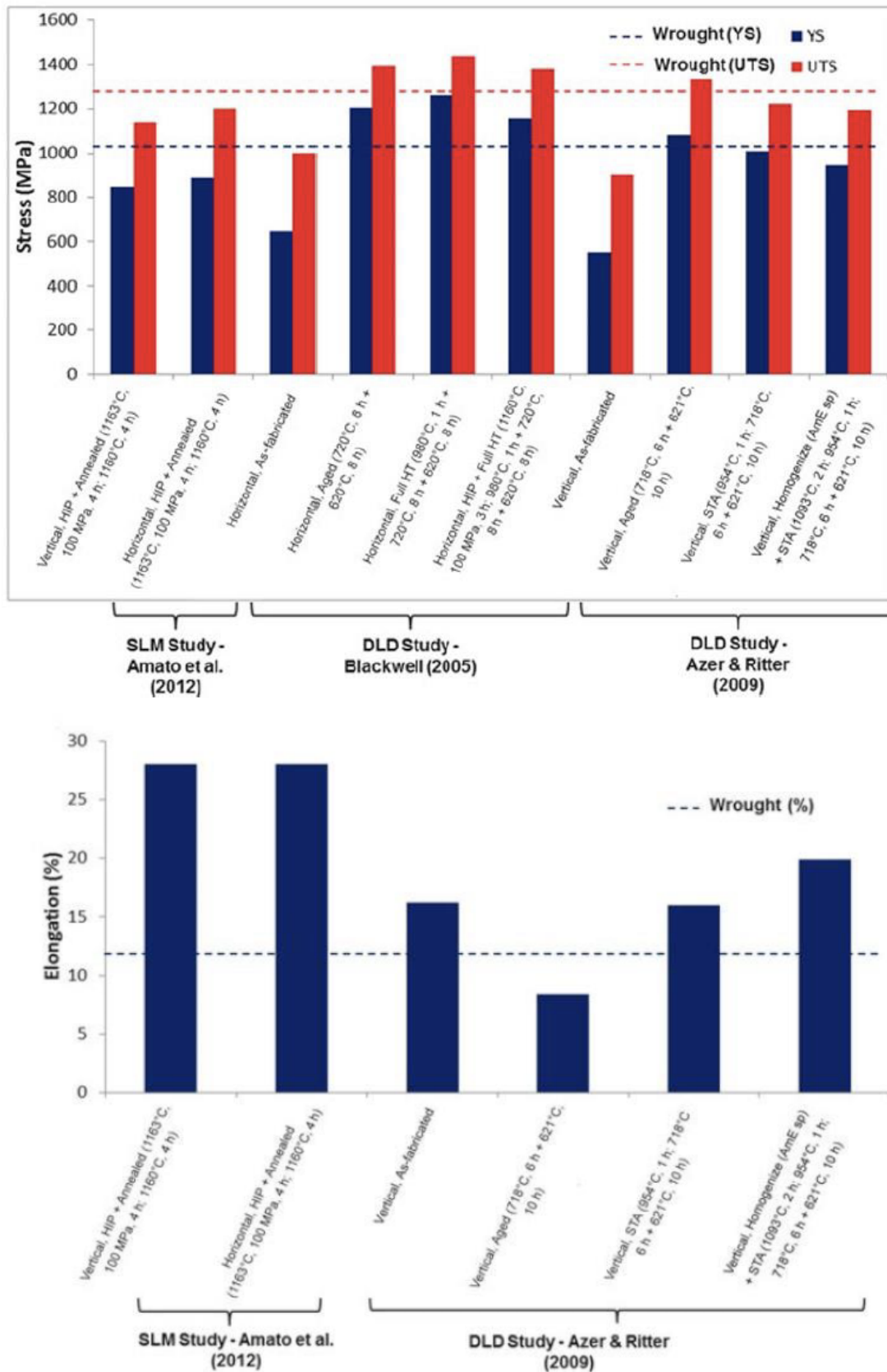


Fig. 2.7: carichi di snervamento (YS), rottura (UTS) e allungamenti a rottura di campioni di Inconel 718 realizzati per SLM e DMD. [22].

## 2.3 Materiale indagato: Inconel 625 (IN625)

### 2.3.1 Generalità

L'Inconel 625 è una superlega di Nichel indurita per soluzione solida con reticolo CFC (Cubico a Facce Centrate) con percentuali importanti di Cr, Mo e Nb con intervallo di fusione compreso tra 1290 – 1350 °C e apprezzata per la sua capacità nel resistere in ambienti corrosivi e ossidanti anche per lunghi periodi mantenendo stabili i suoi livelli di resistenza fino a circa 1000 °C.

Essa possiede ottime proprietà meccaniche di resistenza a trazione, tenacità e fatica oltre che eccellente facilità di produzione e ottima saldabilità, grazie al basso contenuto di alluminio e titanio.

Tale superlega, insieme all'Inconel 718, è largamente utilizzata nel settore aerospaziale, nucleare e navale fin dagli anni '60; le sue principali applicazioni sono nei reattori nucleari, nel settore petrolifero, nelle turbine a gas (negli stadi più stressanti termicamente, nell'industria chimica e per realizzare tubature e canalizzazioni, pompe valvole e altro ancora).

### 2.3.2 Composizione

Analizzando nel dettaglio la composizione di tale lega è possibile riassumere nella tabella 2.2 i vari elementi e le relative percentuali.

*Tabella 2.2: Composizione della lega Inconel 625 (IN625).*

Elemento	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
%wt	58,0 min	20,0 – 23,0	5,0 max	8,0- 10,0	3,15 – 4,15	0,10 max	0,50 max	0,50 max	0,0015 max	0,0015 max	0,40 max	0,40 max	1,0 max

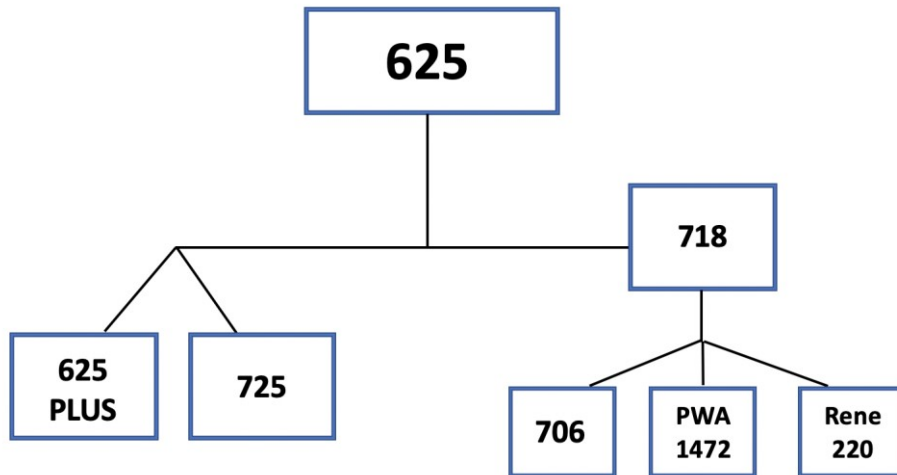
Le modifiche chimiche della lega di Inconel 625 hanno portato allo sviluppo di diverse superleghe.

Tra queste, quella più conosciuta è l'Inconel 718 che è una lega da indurimento per precipitazione della fase  $\gamma'$  utilizzata per la loro elevata resistenza meccanica, a fatica e buona capacità di lavorazione.

La lega Inconel 706, rispetto alla precedente, è adoperata in grossi dischi di turbina per la sua capacità di rompersi in maniera duttile anche in presenza di intagli.

Le leghe Rene 220 e PWA 1472 contengono più cobalto per aumentare la temperatura di servizio dei dispositivi (ad esempio per le turbine a gas).

Le leghe Inconel 625Plus e Inconel 725 sono leghe che possiedono sia resistenza meccanica (grazie all'aggiunta di titanio che permette la precipitazione di fase  $\gamma'$ ), sia resistenza alla corrosione in ambienti acidi a temperature maggiori della lega base di Inconel 625 [3].



*Fig. 2.8: Leghe derivate dall'Inconel 625.*

L'Inconel 625 è commercializzata in due stati metallurgici, detti “gradi”, corrispondenti a condizioni operative diverse secondo la norma ASTM B443 [25]:

- Grado I: lega allo stato ricotto (“annealed”), che viene adoperata in temperature di esercizio non superiori a 593°C è molto resistente a corrosione specie in ambienti marini.

Questo grado conferisce alla lega una microstruttura molto fine. Essa è estremamente resistente al pitting, al crevice (corrosione interstiziale), agli ambienti salini, allo stress corrosion cracking (SCC) e agli attacchi acidi.

Con essa si realizzano principalmente componenti che debbano resistere in ambienti salini marini anche a temperature moderate [26]: valvole, guarnizioni, placcature di dispositivi in acciaio, cavi per gli ormeggi, guaine per cavi per le comunicazioni sottomarine, dispositivi per sottomarini come elementi di propulsione.

Questo grado è anche utilizzato in molti altri campi come quello aerospaziale, energetico e petrolchimico per quei dispositivi che lavorano in temperatura a contatto con ambienti corrosivi di varia natura [3] [26].

- Grado II: lega solubilizzata (“solution annealed”), che viene impiegata quando si richiede resistenza meccanica ad alta temperatura, sopra i 593°C.



La microstruttura di questo grado è più grossolana rispetto a quello precedente e ciò la rende adatta alla resistenza meccanica a temperature elevate (creep).

Con questa lega si realizzano palette di turbina e elementi per lo scarico di gas esausti. A questi gradi corrispondono quindi diversi trattamenti termici: le leghe di grado I subiscono trattamenti di ricottura tra gli 871°C e i 1092°C, mentre le seconde sono solubilizzate a temperature tipicamente comprese tra i 1093°C e i 1160°C [26].

Grazie alla presenza di niobio nella composizione chimica, si osserva la presenza di fini precipitati di  $\gamma''$  quando la lega è trattata a temperature comprese tra i 650 °C e 870 °C (curva T.T.T. di Figura 2.2).

A temperature comprese tra i 700°C e 980°C circa si attiva la precipitazione di altre due fasi normalmente indesiderate in quanto infragiliscono il materiale: le fasi di Laves e la fase  $\delta$ .

Quest'ultima è un'evoluzione di  $\gamma''$  (ne condivide la composizione chimica Ni<sub>3</sub>Nb ma con reticolo ortorombico) che appare con la tipica morfologia acicolare.

Le fasi di Laves appaiono invece come dei globuli o dischetti o placchette e precipitano principalmente a bordo grano.

Entrambe possono essere dissolte con trattamenti di ricottura ad elevate temperature, generalmente dai 980 °C in su.

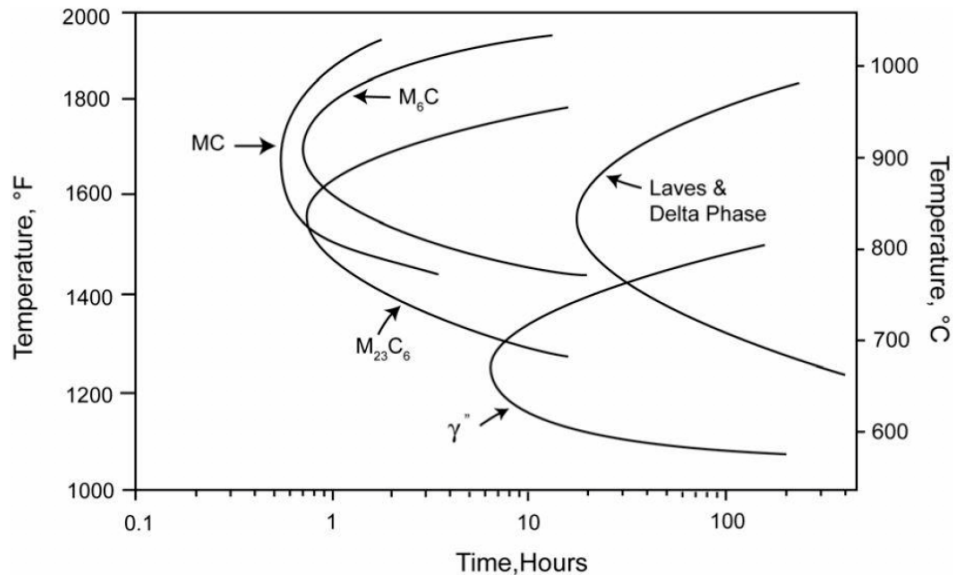
La formazione delle fasi di Laves può essere ridotta lavorando sulla composizione della lega riducendo le concentrazioni di ferro e silicio.

Oltre a tali fasi sono normalmente presenti diversi tipi di carburi; i più comuni hanno formula chimica MC, M<sub>6</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> [3]:

- MC: carburi di Nb o Mo più stabili in temperatura, anche sopra i 1000 °C. Appaiono a blocchi dopo una lenta solidificazione o come film continuo lungo i bordi di grano dopo trattamenti termici;
- M<sub>6</sub>C: carburi di Ni, Cr e Mo. Stabili fino a poco più di 1000 °C, appaiono con morfologia a blocchi o irregolare ai bordi di grano ma in maniera discreta;
- M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>: carburi di Cr, stabili tra i 650 °C e i 950 °C circa. Questi carburi precipitano generalmente lungo i bordi di grano e hanno una forma filamentosa.

I carburi hanno comportamento duale: da un lato possono rafforzare i bordi di grano incrementando la resistenza al creep ma dall'altro hanno effetto negativo sulla duttilità [48].

La loro dissoluzione nella matrice è più difficile da raggiungere, data la loro elevata stabilità (specie per i carburi MC e M<sub>6</sub>C).



**Fig. 2.9:** Diagramma T.T.T. (Temperatura, Tempo Trasformazione) della lega Inconel 625.

### 2.3.3 In625 prodotto alla Wayne State University mediante LMD

La polvere Inconel 625 utilizzata nel presente studio è presente in commercio (Praxiprt Inc.) ed è atomizzata a gas.

La produzione tramite atomizzatore a gas è probabilmente il metodo più comune per produrre polvere metallica; il metallo fuso viene spinto attraverso un ugello e atomizzato tramite un flusso di gas inerte come l'argon o l'azoto.

Il flusso di gas inerte fa sì che il metallo fuso si solidifichi e le particelle sferiche vengono raccolte sul fondo della camera di lavorazione.

La composizione specifica della polvere in questione è mostrata in tabella 2.3 ed ha una distribuzione granulometrica del diametro compreso tra 45-135 μm.

**Tabella 2.3:** Composizione specifica della superlega In625 utilizzata nel presente lavoro di tesi.

Elements	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Nb	Co	Ti	Al	Fe	Ni
Wt %	0.2	0.1	0.06	0.01	0.01	20.98	8.93	3.57	0.01	0.03	0.04	3.13	BAL

Le caratteristiche dimensionali della polvere utilizzata sono fondamentali per la corretta fusione del materiale.



Inoltre la forma sferica delle particelle e la loro grandezza migliorano la loro capacità di scorrere, la loro compattazione e consentono dosaggi e stratificazioni coerenti.



### 3 Realizzazione dei provini

Per la caratterizzazione sperimentale del materiale in questione (IN625) sono stati realizzati provini con caratteristiche geometriche differenti e ottimizzati per i test eseguiti.

Sono stati quindi realizzati set di provini per i test statici di trazione e per i test dinamici di compressione.

Nel primo caso, attraverso la tecnica LMD sono stati depositati dei provini piatti (flat samples) e cilindrici (cylindrical samples), mentre nel secondo caso sono stati depositati soltanto dei provini nella sola forma cilindrica.

Inoltre, durante l'esecuzione delle prove di trazione sui provini cilindrici, sono emerse delle problematiche che hanno portato a dover lavorare al tornio tali provini così da migliorare la loro geometria per una corretta esecuzione dei test e convalida dei risultati ottenuti.

#### 3.1 Provini Flat

I primi provini realizzati mediante la tecnica Laser Metal Deposition sono stati quelli flat, e la loro deposizione è stata effettuata dopo la definizione delle caratteristiche geometriche e dimensionali, dei parametri di processo e del percorso utensile con cui far lavorare il sistema LMD utilizzato.

##### 3.1.1 Geometria e dimensioni

La realizzazione dei provini flat ha avuto inizio con la definizione delle caratteristiche dimensionali e della geometria del provino da depositare mediante LMD.

L'obiettivo di tale lavoro di tesi è stato caratterizzare la superlega di nichel In625 attraverso l'esecuzione di prove statiche di trazione su provini di dimensione ridotta così da ridurre sia il tempo di stampaggio che di prova.

Come prima cosa è stato realizzato un CAD del provino in questione (Figura 3.1) definendo quindi la geometria flat e le dimensioni specifiche.

Oltre a ciò è stato necessario definire il substrato da utilizzare sul quale effettuare la deposizione del materiale.

Quindi riassumendo sono state definite nel seguente ordine:

- Dimensione e geometria dei provini flat
- Materiale e dimensioni del substrato

Per la definizione del provino innanzitutto è stata fissata l'altezza massima pari a 30mm per poi definire la lunghezza del tratto utile e delle zone di afferraggio.

Ciascuna di queste dimensioni è stata presa di uguale lunghezza e pari a 10mm scegliendo un raggio di raccordo tra le due zone distinte pari a 1mm.

Dopodiché si è passati alla definizione della larghezza e dello spessore del provino partendo dapprima da quest'ultimo in quanto vincolato dalla dimensione del raggio laser (Spot Laser) del sistema di stampaggio.

Infatti il raggio laser, di forma circolare con diametro pari a 2mm influenza la scelta del minimo spessore del provino che quindi è stato scelto della stessa grandezza.

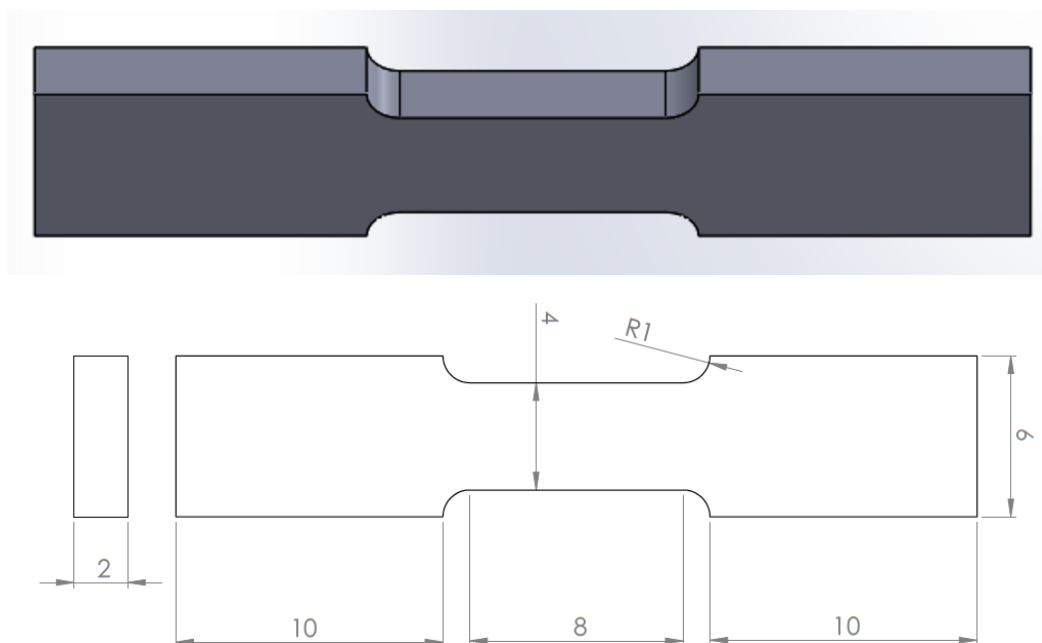
Infine è stata definita la larghezza del tratto utile di tale provino pari al doppio dello spessore: 4mm.

Dopodiché sono state definite le dimensioni delle zone di afferraggio del provino mantenendo lo stesso valore per lo spessore (2mm) e aumentando un 1mm da ambedue i lati la larghezza (6mm).

Ovviamente le dimensioni definite sono indicative e necessarie per la definizione del percorso utensile con cui impostare il funzionamento del robot; infatti i provini ottenuti non rispecchiano in maniera dettagliata la geometria scelta.

È importante sottolineare come fosse noto a priori che le dimensioni definite fossero difficili da ottenere nello specifico a seguito del processo LMD adottato.

Le dimensioni del provino flat realizzato sono mostrate nella Figura 3.2.



**Fig. 3.1:** Rappresentazione CAD del provino flat (in alto). Disegno quotato del provino flat (in basso).



Successivamente si è passati alla definizione del materiale da utilizzare per il substrato sul quale effettuare la deposizione del materiale.

La selezione del giusto materiale è di fondamentale importanza per la realizzazione del pozzetto di fusione sul quale depositare la polvere per la formazione del primo layer.

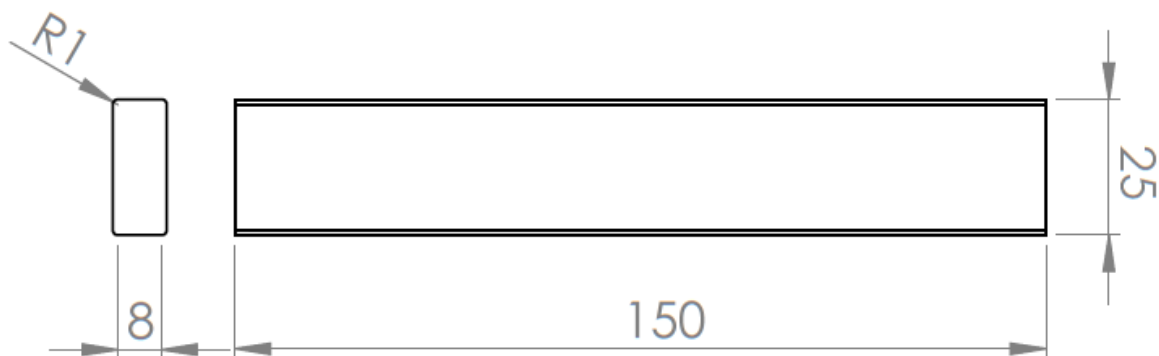
Per questo motivo è stato scelto di realizzare il substrato in ferro industriale, già collaudato per la deposizione di Inconel 625 che garantisce inoltre giusta adesione tra i due diversi materiali.

Nel caso in cui quest'ultima non fosse stata corretta avrebbe portato all'insuccesso della rottura localizzata durante lo svolgimento della prova di trazione compromettendo il risultato della stessa.

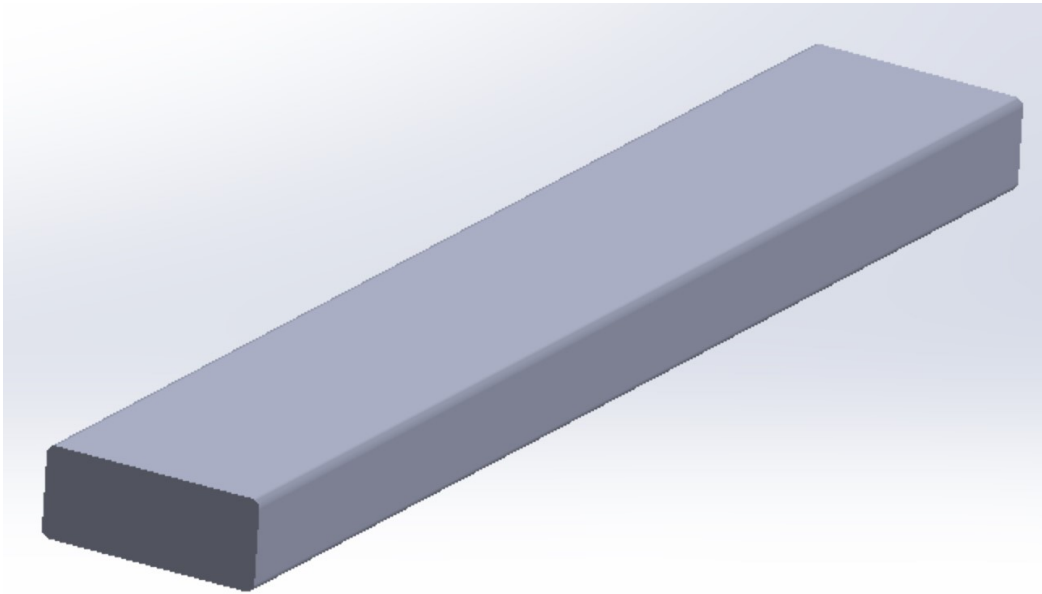
La scelta della dimensione e della geometria del substrato è stata influenzata dalla scelta di dovere risparmiare tempo sia durante la fase di stampaggio che di prova.

A tal proposito si è deciso di utilizzare delle barre piatte metalliche di dimensioni **25 x 10 x 150** come mostrato in Figura 3.2 così da poter stampare i vari provini in serie senza dover perdere tempo nella sostituzione delle varie basi su cui stampare i provini.

Le dimensioni del substrato utilizzato sono mostrate nell'immagine successiva.



*Fig. 3.2: Disegno quotato del substrato utilizzato per la deposizione.*



*Fig. 3.3: Rappresentazione CAD del substrato utilizzato per lo stampaggio dei provini.*

### 3.1.2 Parametri di processo

La definizione dei parametri di processo con i quali settare il sistema LMD utilizzato è di fondamentale importanza per ottenere dei provini che rispecchino al meglio la geometria e le dimensioni scelte.

Nel seguente ordine sono stati definiti i seguenti parametri:

- Potenza del raggio laser
- Velocità di scansione
- Flusso di polvere
- Layer Height

Innanzitutto è stata definita la potenza del laser (Laser Power) la quale deve garantire una corretta fusione del materiale depositato senza però apportare una quantità di calore eccessiva.

In tal caso, infatti si otterrebbe un bagno fuso troppo liquido che non permetterebbe di ottenere una deposizione precisa e controllata in grado di realizzare un provino con caratteristiche prossime a quelle definite.

Il secondo parametro definito è la velocità di movimento del laser (Travel Speed) con il quale il raggio laser si muove da un punto ad un altro.

La giusta velocità di scansione del laser è di fondamentale importanza per garantire una corretta deposizione di materiale e quindi la formazione di ciascun layer.

Il terzo parametro riguarda il flusso di polvere, ossia la quantità di polvere che scorre nei canali che terminano all'ugello, la quale garantisce il giusto apporto di materiale per la deposizione e realizzazione dei vari layer.

Infine l'ultimo parametro è riferito all'altezza di ciascun layer ossia lo spessore dei vari strati di polvere depositati che andranno a costituire il provino flat.

Tali parametri sono riassunti nella tabella sottostante:

**Tabella 3.1:** Parametri di processo per lo stampaggio di provini flat in Inconel625 (In625).

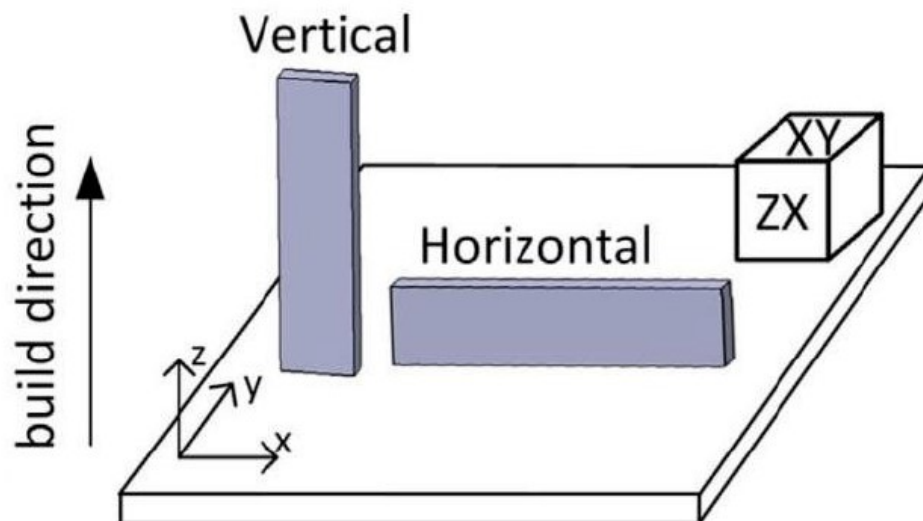
Sample	Laser Power (Watt)	Travel Speed (mm/min)	Powder Flow (gm/min)	Laser Spot Size (mm)	Layer Height (mm)
Tension Test	800	720	24	2	0.6

### 3.1.3 Procedimento di stampaggio

Prima di iniziare la deposizione è stato necessario definire il percorso utensile da far seguire al robot e a tal proposito sono state definite le coordinate della traiettoria adatta alla realizzazione del provino in questione e che garantissero le dimensioni richieste.

Per definire un orientamento ai campioni, si definisce:

- Piano XY: il piano di lavoro (building platform);
- Direzione z: la direzione di accrescimento, perpendicolare al piano XY (Figura 3.4).



**Fig. 3.4:** Schema dell'orientamento di costruzione dei provini flat.

La strategia di scansione adottata ha previsto la deposizione di layer sovrapposti di altezza pari a 0,6mm e variazione di direzione laser tra ciascun strato depositato (Figura 3.5).

Quindi sono state definite le coordinate dei punti tra i quali far muovere il robot distinguendo le due zone caratteristiche del provino: afferraggi e tratto utile.

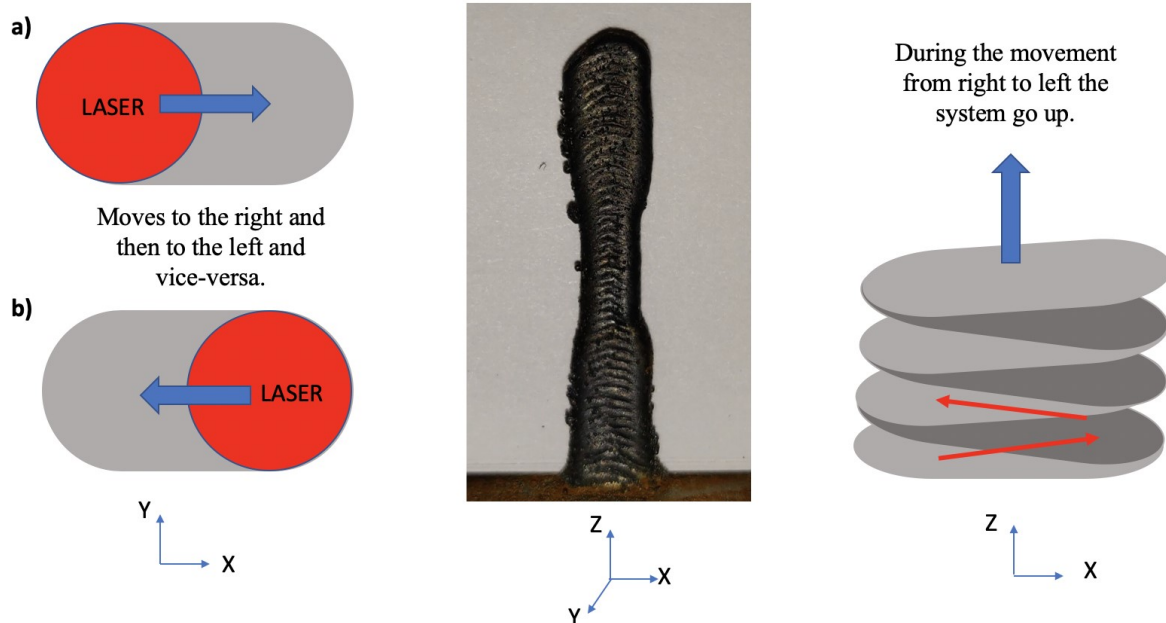
Per la deposizione della prima zona il laser compie un movimento da sinistra a destra (Figura 3.4) sul piano XY muovendosi dal punto A di coordinate (-3;0) al punto B (+3;0).

Dopodiché il puntatore laser trasla verso l'alto per effettuare la deposizione del layer successivo in direzione contraria da B (+3;0) verso A (-3;0).

Dopodiché si procede alla deposizione del materiale per la realizzazione del tratto utile attraverso il movimento del laser dal punto C (-2;0) al punto D (+2;0) e viceversa.

Il cambio di direzione del laser non avviene istantaneamente appena raggiunti i punti di estremità indicati precedentemente, ma a seguito di un tempo di stop pari a 2 secondi necessario per far sì che il layer appena depositato raffreddi e solidifichi evitando quindi l'inflessione del provino.

## FLAT SAMPLES



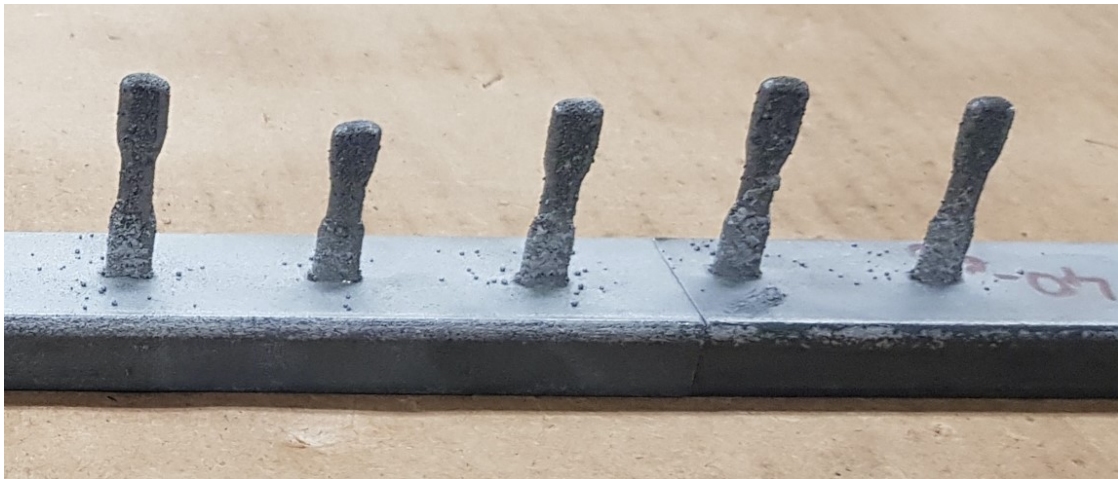
*Fig. 3.5: Schematizzazione del movimento del laser durante la deposizione dei provini flat.*

Nella figura precedente è possibile osservare la dimensione circolare del raggio laser e il movimento seguito durante la deposizione di materiale.

Al centro della foto è possibile osservare il provino flat realizzato con la tecnica LMD dove è possibile distinguere i vari layer sovrapposti che lo costituiscono.

Il provino realizzato non rispecchia nel dettaglio le misure definite inizialmente ma ciò non è un problema perché l'obiettivo di tale lavoro di tesi è quello di testare questi provini così come ottenuti dal processo senza sottoporli ad ulteriori lavorazioni.

Come detto in precedenza la deposizione dei vari provini è avvenuta in serie disponendo i vari provini in successione su un substrato metallico come mostrato in Figura 3.6.



*Fig. 3.6: Provini flat depositati in serie sul substrato metallico.*

Ovviamente per lo svolgimento dei singoli test di trazione dei suddetti provini è stato necessario separarli gli uni dagli altri procedendo con il taglio del substrato attraverso l'utilizzo di una segatrice e nastro (Figura 3.7) presso l'officina meccanica (Machine Shop) della Wayne State University.



*Fig. 3.7: Rappresentazione del taglio del substrato mediante segatrice a nastro (provini flat).*

## 3.2 Provini Cilindrici

La seconda tipologia di provini depositati sono quelli cilindrici, ottenuti utilizzando gli stessi parametri di processo ma diverso percorso utensile a causa della differente geometria.

Innanzitutto sono state definite le caratteristiche geometriche e dimensionali del provino per poi definire le coordinate per la movimentazione del braccio meccanico del sistema LMD.

### 3.2.1 Geometria e dimensioni

La realizzazione dei provini cilindrici ha avuto inizio con la definizione delle caratteristiche geometriche e dimensionali del provino da depositare mediante LMD.

Anche in questo caso l'obiettivo del lavoro di tesi relativamente alla riduzione dei tempi di stampaggio e svolgimento del test ci ha portato a ridurre il più possibile le dimensioni del campione cilindrico.

Per prima cosa è stato creato un CAD del provino in questione (Figura 3.8) definendo quindi la geometria cilindrica e le dimensioni specifiche.

Anche per questa tipologia di provini la deposizione è stata effettuata sullo stesso substrato descritto nel paragrafo precedente.

Quindi sono state decise le dimensioni del provino in questione partendo dall'altezza massima dello stesso la quale è stata fissata pari a 20mm per poi definire la lunghezza del tratto utile e delle zone di afferraggio.

Si è deciso quindi di realizzare le zone di afferraggio (Bottom Zone) e il tratto utile (Central Zone) con una lunghezza rispettivamente pari a 5mm e 8mm separate da un raccordo di raggio pari a 1mm.

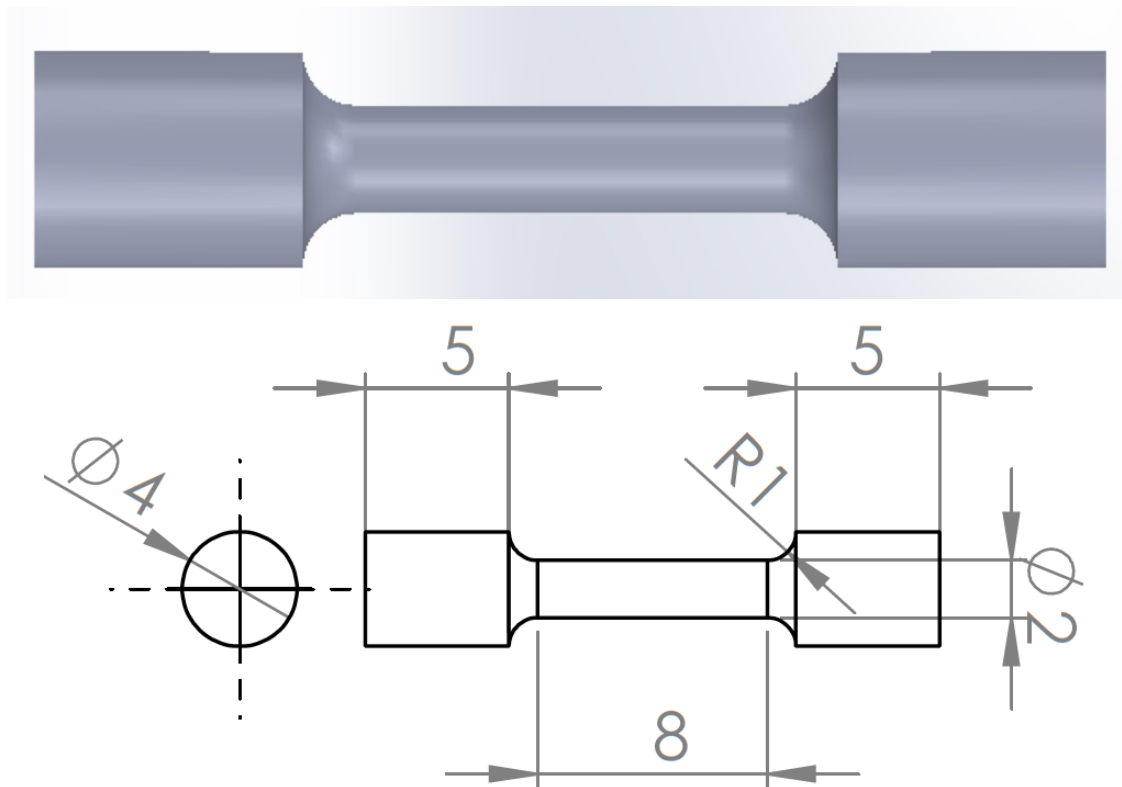
Dopodiché si è passati alla definizione del diametro delle due zone distinte partendo dapprima da quello del tratto utile in quanto vincolato dalla dimensione del raggio laser (Spot Laser) del sistema di stampaggio di diametro pari a 2mm.

A tal proposito si è deciso di realizzare il diametro del tratto utile dello stesso valore e quello della zona di afferraggio pari al doppio (4mm).

Anche in questo caso la dimensioni scelte sono indicative e necessarie per la definizione del percorso utensile, poiché i provini ottenuti differiranno dal provino ideale.

Le dimensioni del provino cilindrico realizzato sono mostrate nella Figura 3.8.





*Fig. 3.8: Rappresentazione CAD del provino cilindrico (in alto). Disegno quotato del provino cilindrico (in basso).*

### 3.2.2 Parametri di processo

La scelta dei parametri di processo da utilizzare per lo stampaggio di quest'altra tipologia di provini ha richiesto meno tempo in quanto le scelte effettuate per i provini flat si sono rivelate idonee anche per i provini cilindrici.

A tal proposito è stato utilizzato lo stesso set up di stampaggio riassunto nella tabella sottostante.

*Tabella 3.2: Parametri di processo per lo stampaggio di provini cilindrici in Inconel625 (In625).*

Sample	Laser Power (Watt)	Travel Speed (mm/min)	Powder Flow (gm/min)	Laser Spot Size (mm)	Layer Height (mm)
Tension Test	800	720	24	2	0.6

### 3.2.3 Procedimento di stampaggio

Per la realizzazione del provino cilindrico con le caratteristiche geometriche e dimensionali definite precedentemente sono state definite le coordinate del percorso utensile con cui animare il robot.

Anche in questo caso è stato necessario definire:





- Piano XY: il piano di lavoro (building platform);
- Direzione z: la direzione di accrescimento, perpendicolare al piano XY.

La strategia di scansione adottata è diversa per le due zone del provino: Bottom Zone e Central Zone.

Entrambe hanno visto la deposizione di layer con altezza pari a 0,6mm ma depositati in due differenti modalità (Figura 3.9).

La Bottom Zone come anche la Upper Zone è stata realizzata attraverso la deposizione di vari strati ognuno ottenuto con un movimento circolare del raggio laser della macchina di raggio pari a 2mm.

Terminata la deposizione di un layer il robot si sposta nella direzione Z per iniziare la deposizione successiva.

Una volta terminato lo stampaggio della zona di afferraggio si è passati alla creazione del tratto utile dove non è stato necessario adottare un movimento planare del robot.

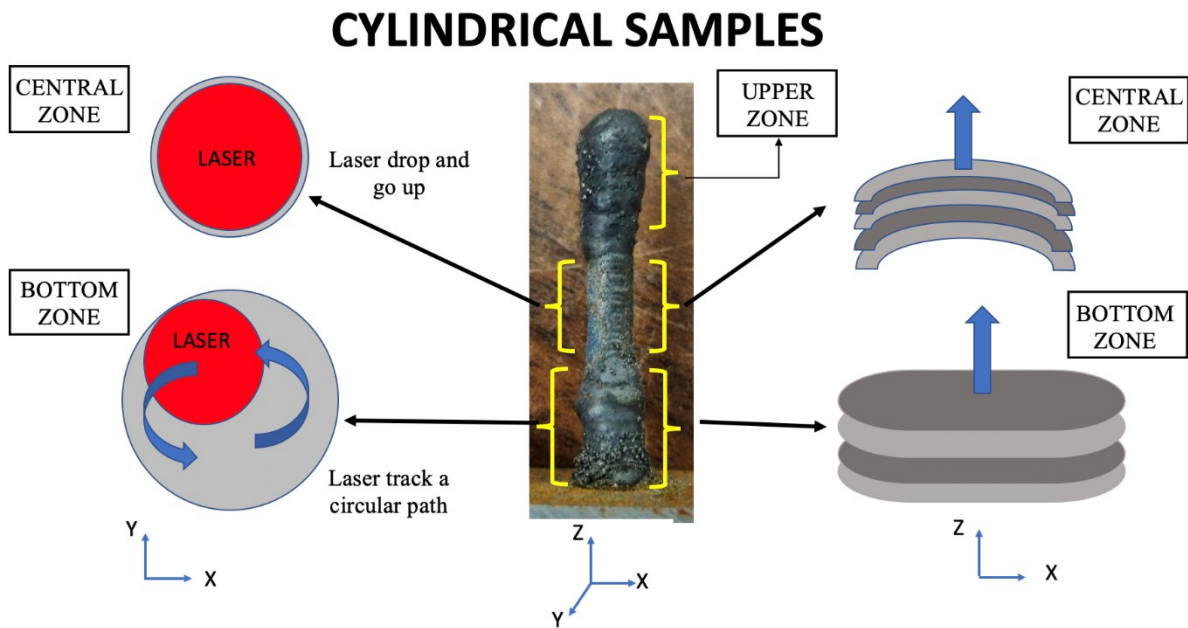
Infatti essendo il diametro del tratto utile pari alla dimensione del raggio laser si è pensato di realizzare tale zona per drop; infatti il robot si muove nella sola direzione z perpendicolare al piano di lavoro depositando gocce di materiale sovrapposti.

Quindi la Central Zone del provino è ottenuta attraverso la sovrapposizione di layer ottenuti mediante dei drop intervallati.

Infatti la deposizione dei vari strati avviene dopo uno stop di 2 secondi tra un layer e il successivo per far sì che il provino abbia il tempo per raffreddare e solidificare evitando quindi l'inflessione.

A seguito di ogni drop, il robot trasla verso l'alto per eseguire la nuova deposizione.

Nell'immagine successiva è schematizzato il movimento di stampaggio per la realizzazione dei provini cilindrici.



*Fig. 3.9: Schematizzazione del movimento del laser durante la deposizione dei provini cilindrici.*

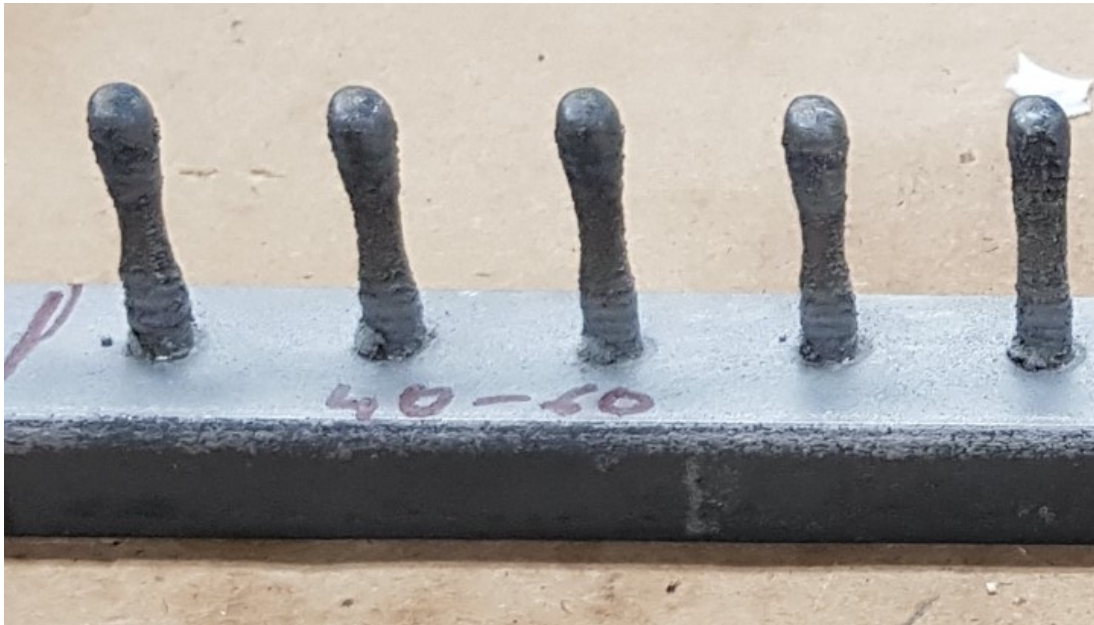
Nella figura precedente è possibile osservare la dimensione circolare del raggio laser e il movimento seguito durante la deposizione di materiale.

Al centro della foto è possibile osservare il provino cilindrico realizzato con la tecnica LMD dove è possibile distinguere i vari layer sovrapposti che lo costituiscono.

Il provino realizzato non rispecchia nel dettaglio le misure definite inizialmente ma ciò non è un problema perché l'obiettivo di tale lavoro di tesi è quello di testare questi provini così come ottenuti da processo senza sottoporli ad ulteriori lavorazioni.

Come si può osservare nell'immagine 4.8 la deposizione di materiale nella Bottom e Upper Zone si presenta come la sovrapposizione di layer piatti mentre nella Central Zone assumono una forma curva a causa della forte fluidità del materiale rilasciato mediante drop che quindi cola verso l'esterno.

Come detto in precedenza la deposizione dei vari provini è avvenuta in serie disponendo i vari provini in successione su un substrato metallico come mostrato in Figura 3.10.



*Fig. 3.10: Provini cilindrici depositati in serie sul substrato metallico.*

Ovviamente per lo svolgimento dei singoli test di trazione dei suddetti provini è stato necessario separarli gli uni dagli altri procedendo con il taglio del substrato attraverso l'utilizzo di una segatrice e nastro (Figura 3.11) presso l'officina meccanica (Machine Shop) della Wayne State University.



*Fig. 3.11: Rappresentazione del taglio del substrato mediante segatrice a nastro (provini cilindrici).*



### 3.3 Provini torniti

Durante lo svolgimento dei test di trazione sui provini cilindrici ottenuti a seguito dello stampaggio (as-built) sono state riscontrate delle problematiche.

Infatti si sono verificate diverse rotture nella zona di transizione, le quali hanno compromesso il risultato delle varie prove poiché i valori di deformazione raggiunti si discostavano notevolmente dai valori attesi.

Per questo motivo si è deciso di lavorare i provini cilindrici as-built al tornio così da conferire loro una geometria idonea all'esecuzione dei test di trazione.

#### 3.3.1 Dimensioni

La realizzazione dei provini cilindrici torniti ha avuto inizio con la definizione delle caratteristiche geometriche e dimensionali necessarie per realizzare la tornitura.

Si è deciso quindi di eseguire tale operazione sui provini cilindrici as-built e per tale motivo le dimensioni del provino finale sono state definite a partire da quest'ultimo.

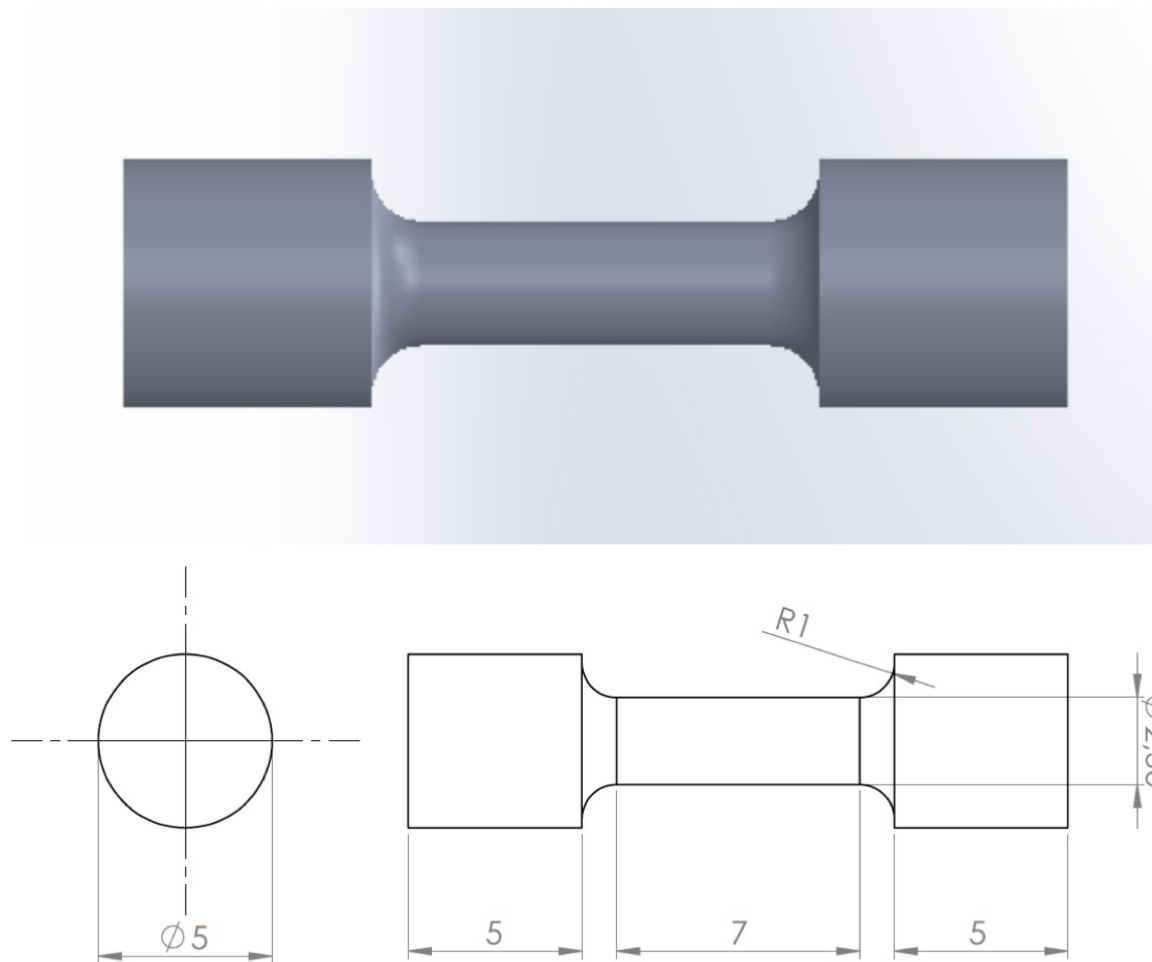
Per prima cosa è stato creato un CAD del provino in questione (Figura 3.12) definendo le dimensioni che verranno poi utilizzate per realizzare il provino al tornio.

Quindi cercando di ridurre al minimo il materiale asportato si è deciso di adottare dei diametri pari a 5 e 2,5mm rispettivamente per le zone di afferraggio e del tratto utile.

Dopodiché sono state definite le lunghezze delle due zone rispettivamente pari a 5mm per la Bottom e Upper Zone e 9mm per la Central Zone.

Infine si è scelto di raccordare le due zone con un raggio di raccordo pari a 1mm.

Le dimensioni del provino cilindrico lavorato al tornio sono mostrate nella Figura 3.12.



**Fig. 3.12:** *Rappresentazione CAD del provino cilindrico tornito (in alto). Disegno quotato del provino cilindrico tornito (in basso).*

### 3.3.2 Procedimento adottato

Per la realizzazione di questa tipologia di provini si è deciso di partire dai provini cilindrici precedentemente analizzati.

Infatti anziché realizzare nuovi provini da lavorare poi al tornio si è deciso di tornire i campioni già depositati (Figura 3.13) i quali hanno evidenziato problematiche durante i test di trazione.





*Fig. 3.13: Provino cilindrico depositato sul substrato con tecnica LMD.*

Prima di eseguire l'asportazione di materiale i provini sono stati separati dal substrato mediante un'operazione di taglio.

Dopodiché il provino è stato montato sul tornio di proprietà della Wayne State University e lavorato opportunamente fino ad ottenere le caratteristiche desiderate (Figura 3.14).



*Fig. 3.14: Tornio di proprietà della Wayne State University.*

I provini ottenuti a seguito dell'operazione di tornitura (Figura 3.15) rispettano perfettamente le caratteristiche geometriche definite mostrando un comportamento decisamente migliore durante i test di trazione.



*Fig. 3.15: Provini cilindrici ottenuti mediante tornitura.*

### 3.4 Provini Cilindrici per test di compressione

Per eseguire i test di compressione dinamica con il sistema Barra di Hopkinson è stato necessario realizzare dei provini con geometria e dimensioni specifiche.

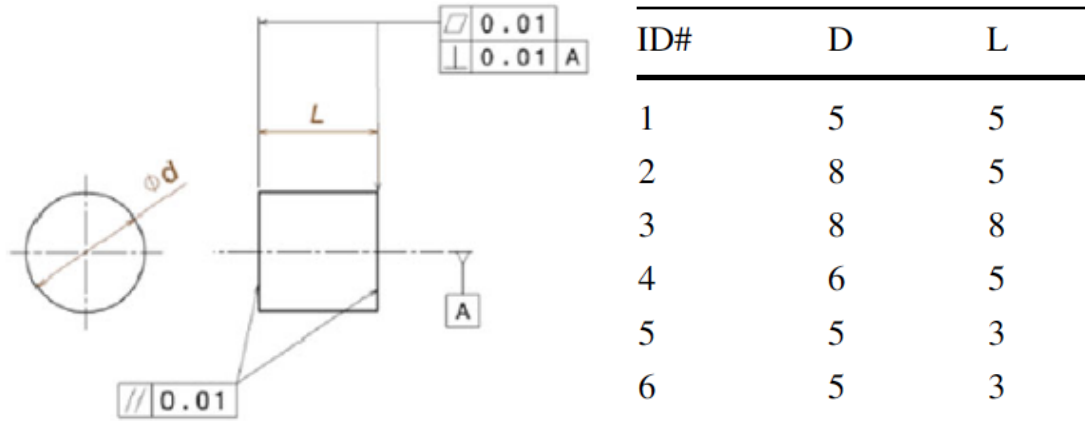
A tal proposito sono state seguite le indicazioni fornite dal gruppo di Costruzione di Macchine dell'Università Politecnica delle Marche per definire le dimensioni dei provini da testare.

#### 3.4.1 Dimensioni

Si è deciso di realizzare dei test di compressione utilizzando dei cilindri le cui dimensioni idonee per le prove dinamiche sono riportate nella tabella successiva.



**Tabella 3.3:** Caratteristiche dimensionali dei provini cilindrici per test di compressione sul sistema Barra di Hopkinson. [27].



Tra le varie possibilità mostrate nella tabella 3.3 sono state adottate le dimensioni del provino ID#1 caratterizzato da un diametro e una lunghezza di 5mm.

Per realizzare tali provini è stato necessario dapprima depositare il materiale mediante la tecnica Laser Metal Deposition per poi lavorare le parti stampate così da conferire loro le dimensioni specifiche definite.

A tal proposito si è deciso di stampare dei cilindri con diametro e lunghezza tali dai quali poter poi ricavare i provini per i test dinamici.

Quindi sono stati depositati dei campioni di diametro e lunghezza rispettivamente pari a 10mm e 100mm come mostrato in Figura 3.16.



**Fig. 3.16:** Cilindri stampati mediante Laser Metal Deposition.

### 3.4.2 Parametri di processo

La scelta dei parametri di processo da utilizzare per lo stampaggio di quest'altra tipologia di provini ha richiesto meno tempo in quanto le scelte effettuate per i provini flat e cilindrici si sono rivelate idonee anche per questa tipologia di campioni.

A tal proposito è stato utilizzato lo stesso set up di stampaggio riassunto nella tabella sottostante.

*Tabella 3.4: Parametri di processo per lo stampaggio di provini cilindrici in Inconel625 (In625).*

<b>Sample</b>	<b>Laser Power (Watt)</b>	<b>Travel Speed (mm/min)</b>	<b>Powder Flow (gm/min)</b>	<b>Laser Spot Size (mm)</b>	<b>Layer Height (mm)</b>
Tension Test	800	720	24	2	0.6

### 3.4.3 Procedimento di stampaggio

Per la realizzazione del provino cilindrico di partenza che dovrà poi essere tornito, sono state definite le coordinate del percorso utensile con cui movimentare il robot.

Anche in questo caso è stato necessario definire:

- Piano XY: il piano di lavoro (building platform);
- Direzione z: la direzione di accrescimento, perpendicolare al piano XY.

La strategia di scansione adottata è unica per tutto il campione.

Lo stampaggio dei vari cilindri mostrati in Figura 3.16 ha visto la sovrapposizione di layer di altezza pari a 0,6mm.

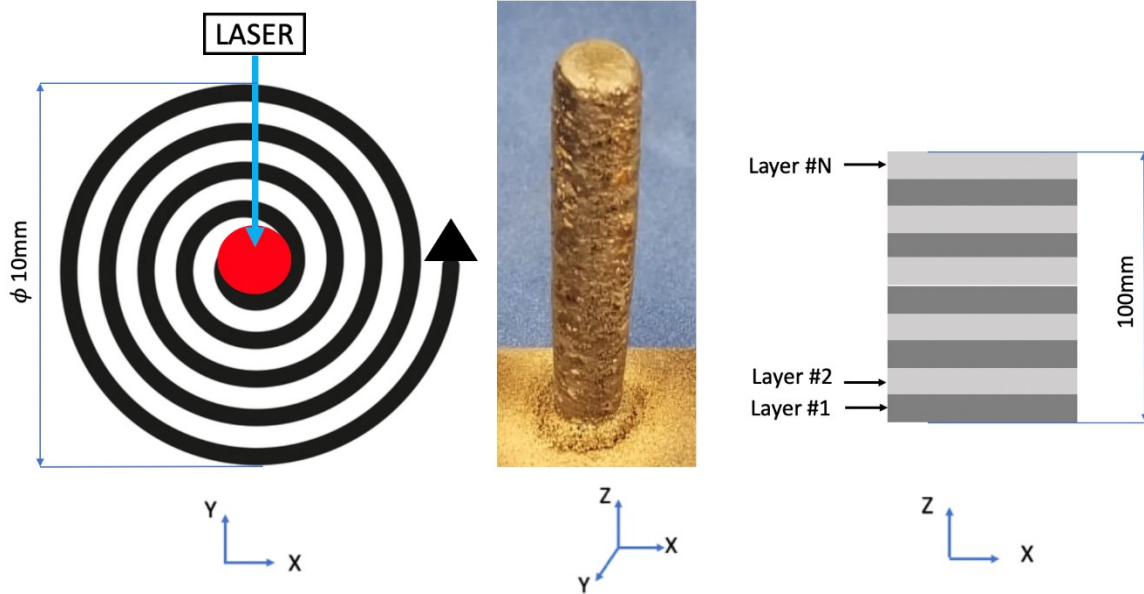
La deposizione dei vari strati è stata realizzata mediante un movimento a spirale del raggio laser della macchina.

Quindi il movimento dello spot laser ha inizio da un punto centrale e si allarga via via fino a disegnare una circonferenza finale di diametro pari a 10mm come mostrato nella Figura 3.18.

Terminata la deposizione di un layer il robot si sposta verso l'alto nella direzione Z per iniziare la deposizione successiva.

Il rilascio di materiale tra uno strato e il seguente è avvenuto in maniera intervallata con uno stop di 2 secondi tra un layer e il successivo per far sì che ciascuno di essi abbia il tempo per raffreddare e solidificare evitando quindi l'inflessione del cilindro.

Nell'immagine successiva è schematizzato il movimento di stampaggio per la realizzazione dei cilindrici in questione.

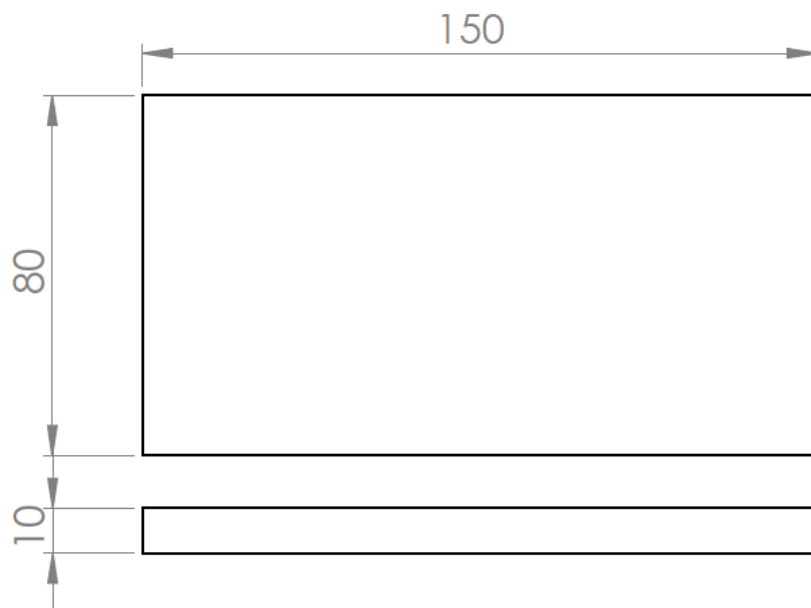


*Fig. 3.17: Schematizzazione del movimento del laser durante la deposizione dei cilindri in superlega di nichel IN625.*

Nella figura precedente è possibile osservare la dimensione circolare del raggio laser e il movimento seguito durante la deposizione di materiale.

I vari cilindrici sono stato prodotti in serie su un substrato dello stesso materiale di quello usato per le altre tipologie di provini ma con dimensioni differenti.

Nel caso specifico le dimensioni della base utilizzata sono mostrate nella figura successiva.



*Fig. 3.18: Disegno quotato del substrato utilizzato per la deposizione dei cilindri.*

#### 3.4.4 Lavorazioni eseguite

Come accennato in precedenza i provini utili alla realizzazione dei test dinamici con la Barra di Hopkinson hanno dimensioni ridotte rispetto ai cilindri ottenuti mediante LMD.

Per tale motivo è stato necessario lavorarli al tornio per ridurre il loro diametro da 10mm a 5mm.

Quindi sono stati prima separati dal substrato mediante un'operazione di taglio e poi sottoposti all'operazione di tornitura.

Il risultato di queste due operazioni è mostrato nella figura 3.20 dove è possibile osservare gli stessi cilindri di partenza privi del substrato e caratterizzati da un diametro minore rispetto a quello di partenza.



*Fig. 3.19: Cilindri in superlega di nichel IN625 ottenuti dopo l'operazione di tornitura.*

Successivamente i cilindri mostrati nella figura precedente sono stati tagliati per ricavare i provini da utilizzare per i test di compressione dinamica sulla Barra di Hopkinson.

Essendo questi ultimi caratterizzati da dimensioni molto ridotte è stato necessario eseguire l'operazione di taglio per elettroerosione in modo da essere sicuri di ottenere i provini senza rompere il cilindro di partenza.



*Fig. 3.20: Provini cilindrici ottenuti con taglio per elettroerosione.*

Durante le operazioni di tornitura i diametri dei vari cilindri sono stati ridotti maggiormente rispetto a quanto indicato al tecnico dell'officina.

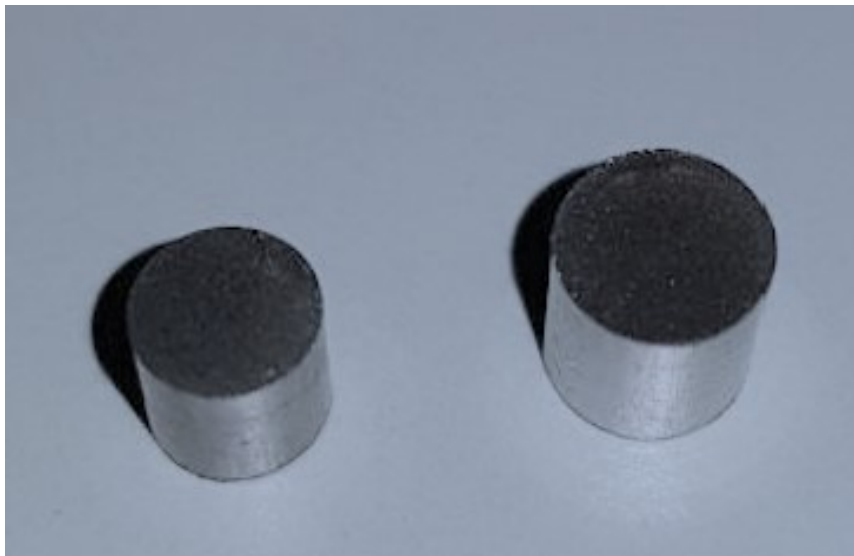
Per tale ragione si è deciso di modificare le dimensioni precedentemente definite adattando la lunghezza dei vari samples ai diametri a disposizione e realizzando quindi due set di questi ultimi con dimensioni diverse per valutare il comportamento del materiale in diverse condizioni di velocità di deformazione.

Quindi sono stati ricavati dei provini di dimensioni leggermente differenti da quelle indicate dal gruppo di Costruzione di Macchine.

Le dimensioni dei due set di campioni cilindrici sono rispettivamente pari a:

- 1° set: 4,5mm (diametro), 4,5mm (altezza)
- 2° set: 4mm (diametro), 4mm (altezza)

Le diverse tipologie di provini realizzati sono mostrati nella figura successiva.



*Fig. 3.21: Provini cilindrici per test dinamici: provino del primo set (a destra) e del secondo set (a sinistra).*

## 4 Prove sperimentali eseguite

L'obiettivo di questo lavoro è quello di caratterizzare il comportamento meccanico di questa tipologia di superlega di nichel (IN625) prodotta mediante Laser Metal Deposition.

Sono stati condotti test statici con la macchina MTS per le prove di trazione nel laboratorio della Wayne State University e test dinamici con la Barra di Hopkinson nei laboratori dell'Università Politecnica delle Marche.

### 4.1 Prova di trazione statica

Le prove di trazione uniaxiale dei materiali servono a determinare diverse caratteristiche del materiale in esame, tra cui la resistenza meccanica ( $R_m$ ), il modulo di Young o modulo di elasticità ( $E$ ), il carico unitario di snervamento ( $Y_S$ , *Yield Strength*), l'allungamento percentuale ( $A\%$ , *elongation*), la strizione percentuale ( $Z\%$ , *reduction of area*) [28].

La prova consiste nell'applicare una forza uniaxiale alle estremità di un campione normato. Per far ciò si adoperano macchinari appositi costituiti da un'incastellatura (formata da un basamento, da colonne portanti e da una traversa), un attuatore, una cella di carico (cioè il trasduttore per misurare la forza) e da organi di fissaggio del campione.

Inoltre si adopera un estensimetro applicato al provino o si fa utilizzo di tecniche digitali per misurare istante per istante la sua deformazione [3].

Lo schema di Figura 4.1 indica i componenti principali della macchina.

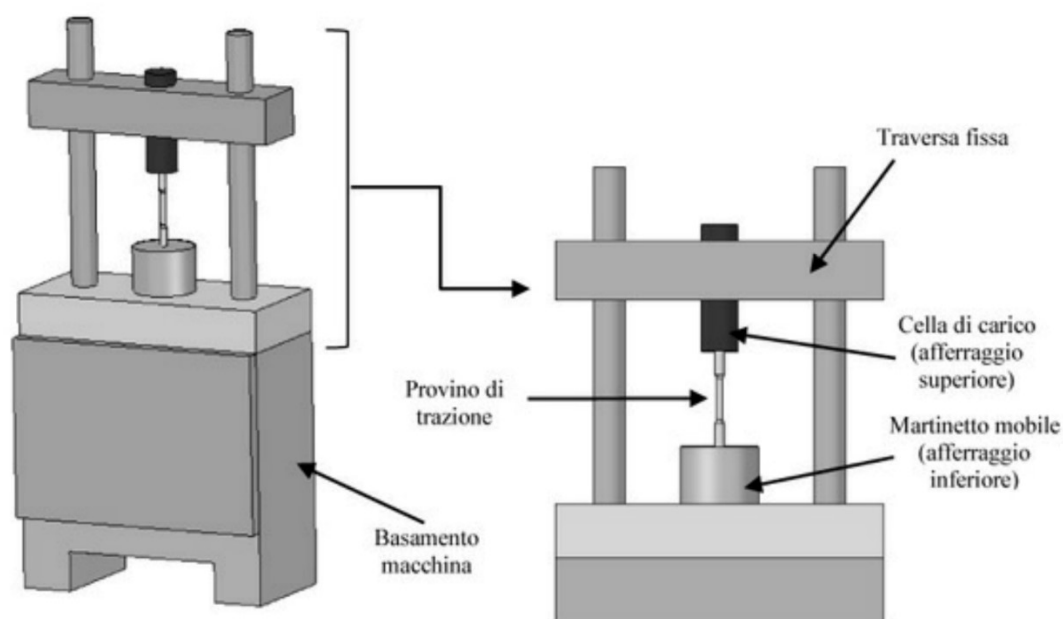


Fig. 4.1: Rappresentazione schematica di una macchina per prove di trazione.



La prova di trazione è una prova statica e rappresenta il più importante test convenzionale. Una prova si definisce statica quando presenta uno strain rate compreso tra  $10^{-2} \div 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , calcolabile nel modo seguente:

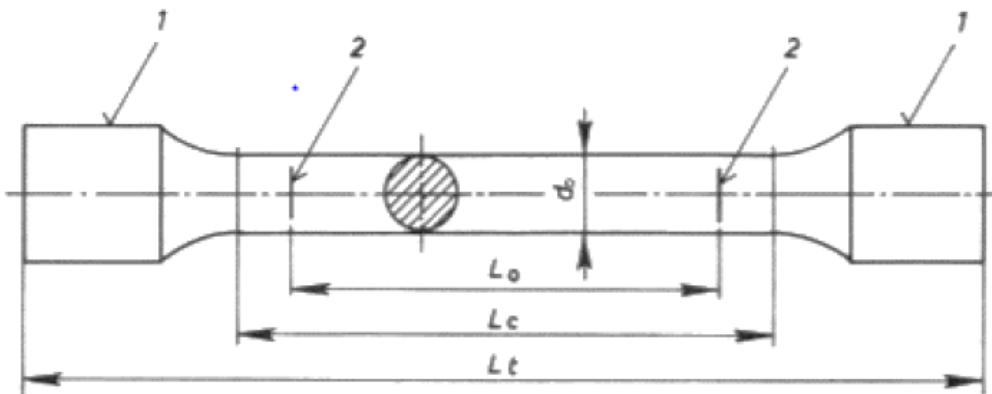
$$SR = \frac{L_0}{v_{testa}} \quad (5.1)$$

Tale prova fornisce informazioni molto importanti e impiegate nella progettazione e nell'applicabilità di processi tecnologici su un materiale.

Consiste nel sottoporre un provino di dimensioni standard (normate) del materiale in esame ad un carico monoassiale inizialmente nullo il quale viene incrementato fino a un valore massimo che determina la rottura del materiale.

La si usa soprattutto per materiali metallici e polimerici.

Il provino che viene testato deve avere una ben particolare geometria. È possibile distinguere le seguenti parti:



*Fig. 4.2: Schematizzazione del provino per la prova di trazione.*

- la lunghezza della cosiddetta "parte centrale calibrata"  $L_c$
- la lunghezza iniziale  $L_0$  tra i riferimenti (2), più breve della precedente
- il diametro  $d$  della parte calibrata a cui corrisponde una sezione  $S_0$  (nel caso di provette a sezione circolare, larghezza  $a$  e l'altezza  $b$  della sezione se questa è rettangolare)
- le teste di serraggio (1), che hanno forma e dimensioni tali da essere afferrate tra le ganasce della macchina con cui si effettua la prova
- i raccordi ad archi di cerchio tra la parte calibrata e le teste, necessari per evitare pericolose concentrazioni di sforzi che influirebbero sui risultati della prova
- la lunghezza totale  $L_t$





L'esperienza ha evidenziato che la forma e le dimensioni del provino influenzano notevolmente le deformazioni.

Per questo, è necessario assumere convenientemente la lunghezza  $L_0$  in modo da garantire un'uniforme distribuzione dello sforzo sull'intero tratto utile [28].

Le prove di trazione possono essere condotte in due modalità:

- a) In controllo di carico: la macchina ha una velocità di applicazione del carico costante, che aumenta quindi in maniera costante fino all'avvenuta rottura del provino.
- b) In controllo di deformazione: la prova è eseguita adoperando una velocità di deformazione del provino costante, con carico variabile.

Questa è la modalità con cui si sono condotte le prove di trazione in questo lavoro. In particolare si è adoperata velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}=8,10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

La macchina fornisce un diagramma sforzo-deformazione, che mette in relazione, appunto, tensioni e deformazioni ( $\sigma$  e  $\epsilon$ ).

Il valore della tensione ingegneristica  $\sigma$  è pari a:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.2)$$

Dove  $F$  è il carico applicato e  $A_0$  è la sezione iniziale del provino.

Il valore di deformazione ingegneristica è, invece, così calcolabile:

$$\epsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (5.3)$$

Dove  $L_f$  è la lunghezza finale e  $L_i$  è la lunghezza iniziale del provino.

Il diagramma che viene tracciato relazionando queste due grandezze prende il nome di *curva ingegneristica*.

In generale, possiamo riscontrare una prima fase in cui il comportamento del materiale è elastico e sussiste un legame di proporzionalità diretta tra deformazioni e tensioni.

Successivamente si ha un breve tratto in cui le deformazioni sul provino sono ancora elastiche e reversibili, ma viene a cadere il legame di linearità.

Infine, un tratto in cui le deformazioni sono permanenti e il legame tensione-deformazione è tipicamente non lineare.

Nel momento in cui si inizia a verificare la strizione (la deformazione è concentrata in un unico punto), la sezione resistente inizia a diminuire e di conseguenza anche il carico necessario a deformare il provino diminuisce (precedentemente a causa dell'incrudimento del materiale, la forza aumentava).

Il diagramma effettivo che rende i risultati indipendenti dal fenomeno della strizione ha per ordinate le tensioni vere e in ascisse le deformazioni vere; prende il nome di *curva vera*.

Per tensione vera si intende il carico applicato diviso l'effettiva sezione resistente (diversa da quella iniziale). Questo tipo di curva può essere ottenuto a seguito di considerazioni analitiche.

La tensione vera è pari a:

$$\sigma_t = \sigma (1+\varepsilon) \quad (5.4)$$

La deformazione vera è pari a:

$$\varepsilon_t = \ln (1+ \varepsilon) \quad (5.5)$$

Le due curve sono per il primo tratto coincidenti, cominciano a differenziarsi a partire dal carico di snervamento e si allontanano sempre di più per tutto il periodo delle grandi deformazioni; fino ad avere andamento del tutto opposto nel periodo della strizione.

La curva vera ha dunque andamento sempre crescente (Figura 4.3) [28].

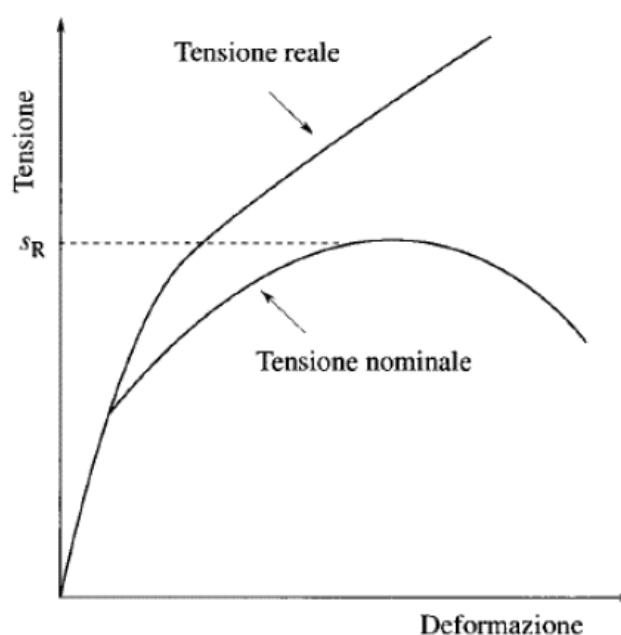
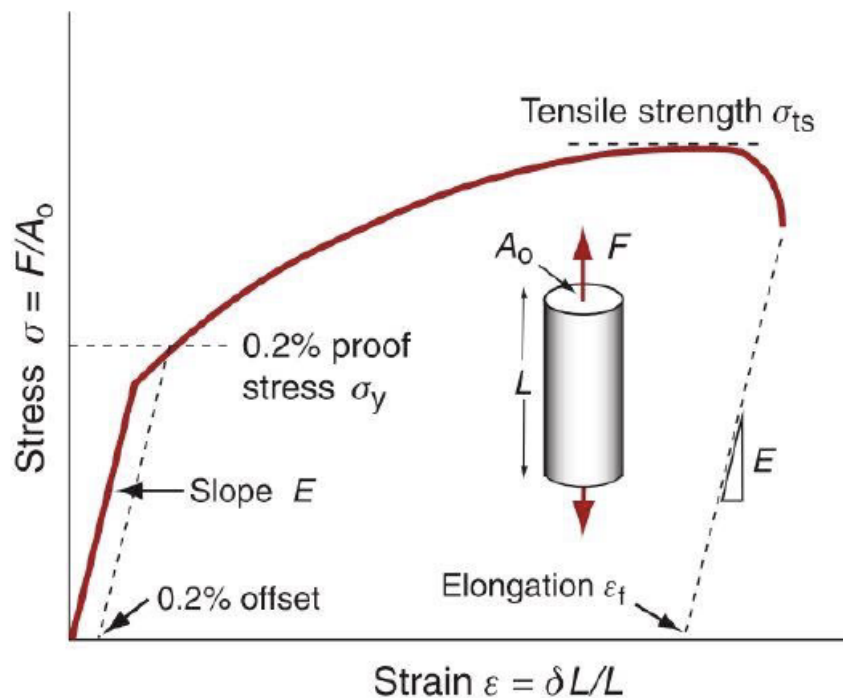


Fig. 4.3: Curva vera e curva ingegneristica.

Nota la curva è possibile determinare:

- Modulo di Young (E), la pendenza del tratto elastico
- Tensione di snervamento, tensione di fine tratto elastico
- Tensione di rottura
- Deformazione di snervamento
- Deformazione a rottura
- Energia di deformazione, area sottesa dalla curva.

Dall'analisi di questi grafici (Figura 4.3-4.4) è possibile dedurre i parametri fondamentali e il comportamento meccanico dei materiali dal campo elastico a quello plastico.



*Fig. 4.4: Grafico che mette in relazione la tensione ingegneristica e la deformazione ingegneristica. [3].*

La regione elastica di proporzionalità fornisce il valore del modulo elastico:

$$E = \frac{\Delta S}{\Delta e} \quad (5.6)$$

Il valore di tensione a snervamento (indicato nel grafico con  $\sigma_y$ ) si deduce da questa formulazione matematica:



$$R_p(0,2) = \frac{F_p(0,2)}{A_0} \quad (5.7)$$

in cui  $F_p(0,2)$  è il carico a cui corrisponde lo scostamento della proporzionalità dello 0,2%, ovvero il carico che produce una deformazione plastica residua dello 0,2%.

Il valore della tensione a rottura ( $\sigma_{ts}$ ) o del carico unitario a rottura si ricava da:

$$R_R = \frac{F_R}{A_0} \quad (5.8)$$

in cui  $F_R$  è il carico massimo registrato durante la prova.

L'allungamento a rottura si definisce come:

$$\epsilon_f = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (5.9)$$

in cui  $L_u$  è la lunghezza del campione a rottura.

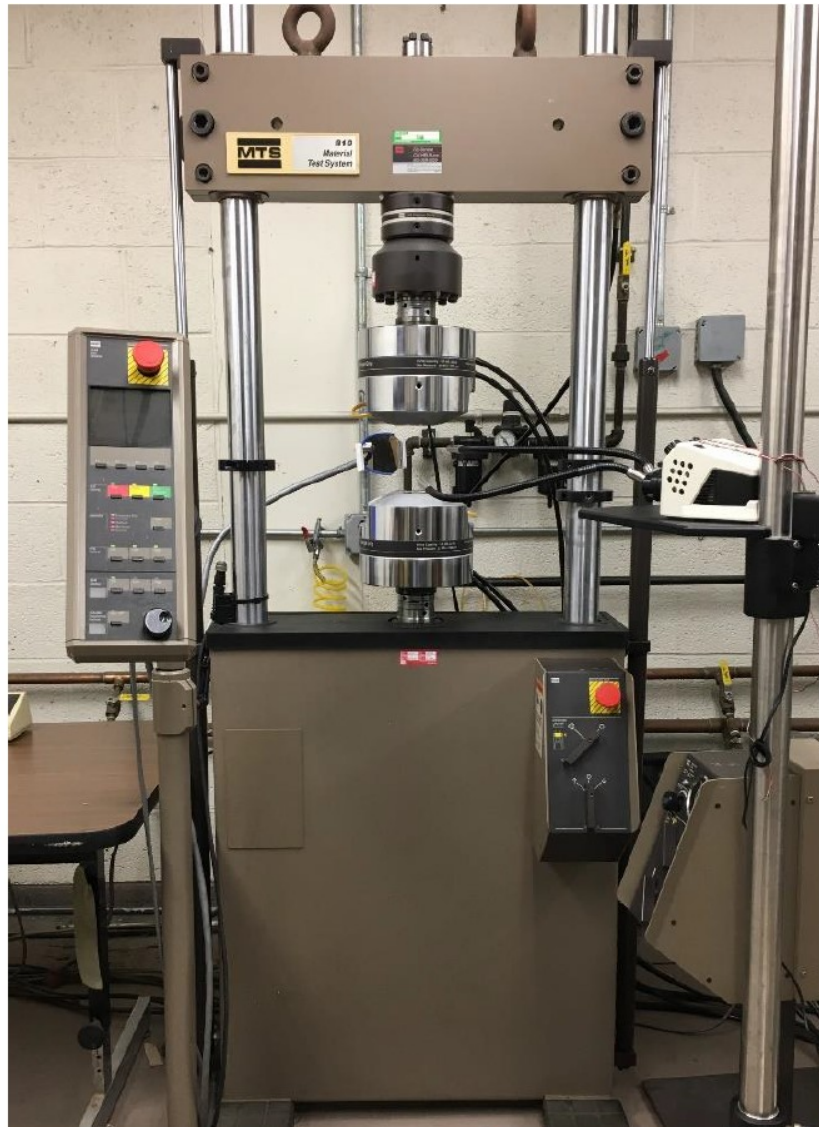
Infine la strizione percentuale è calcolata come segue:

$$Z = \frac{(A_0 - A_u)}{A_0} \times 100 \quad (5.10)$$

in cui  $A_u$  è l'area della sezione dopo la rottura del campione [3].

#### 4.1.1 Setup statici

La macchina impiegata per le prove di trazione statiche è la MTS 810 Material Test System situata nei laboratori della Wayne State University (Figura 4.5).



*Fig. 4.5: MTS per le prove statiche.*

Per la misura delle deformazioni è stata impiegata la tecnica digitale chiamata Digital Image Correlation (DIC, vedi paragrafo 5.1.2).

Essa è basata fundamentalmente sull'analisi di deformazione attraverso l'analisi delle immagini raccolte durante la prova.

Pertanto il set up prevedeva anche l'installazione di una telecamera ad alta risoluzione in grado di registrare una serie di immagini del provino durante l'esecuzione del test.



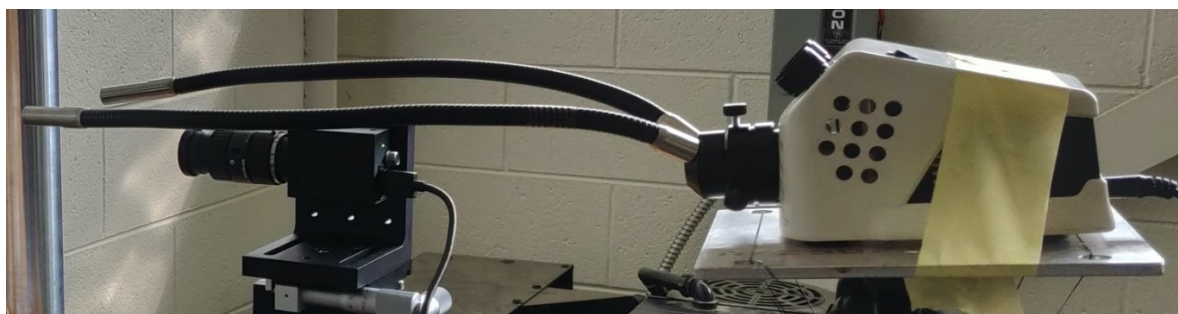
*Fig. 4.6: Telecamera Basler acA2000-165.*



*Fig. 4.7: Ottica telecentrica M7528-MP*

La telecamera utilizzata è una Basler acA2000-165 alla quale è stata applicata l'ottica telecentrica M7528-MP della Computar (Figura 4.6 e Figura 4.7).

Oltre ai componenti descritti precedentemente è stata utilizzata una sorgente di luce alla quale sono state collegate due fibre ottiche per illuminare i provini durante lo svolgimento dei test di trazione così da poter acquisire delle immagini migliori (Figura 4.8).

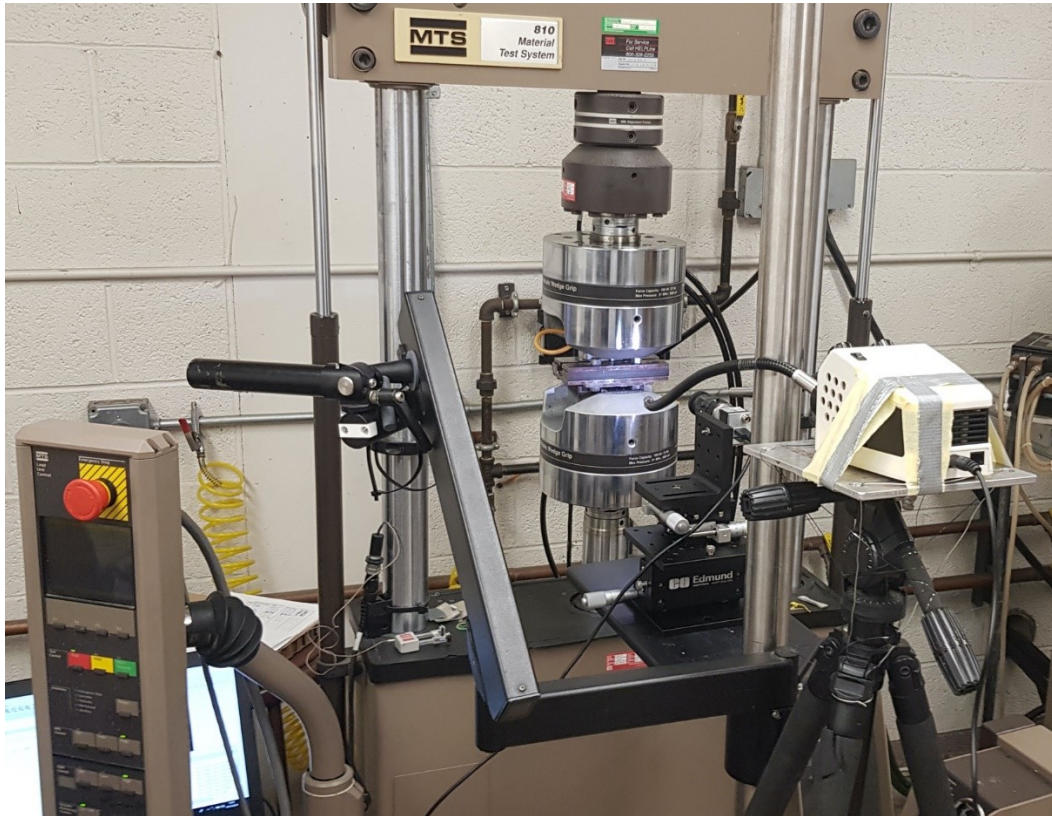


*Fig. 4.8: Sistema di illuminazione con sorgente di luce e fibre ottiche.*

Il tutto è stato posizionato tramite un cavalletto ad una certa distanza del provino.



Nella Figura 5.9 è possibile osservare tutti i componenti precedentemente descritti assemblati e posizionati durante lo svolgimento del test di trazione.



*Fig. 4.9: Set-Up prove statiche.*

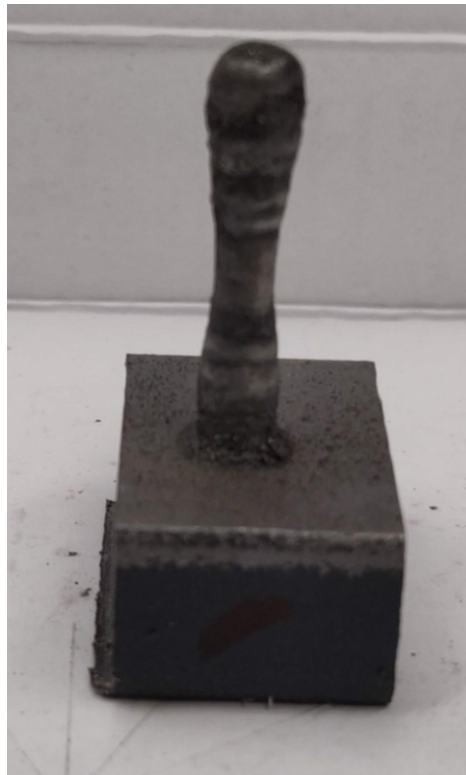
Le prove sono state condotte sulle due tipologie di provini: flat (paragrafo 4.1, Figura 4.5) e cilindrici (paragrafo 4.2, Figura 4.9).

La macchina è stata impostata in controllo di spostamento e la velocità di avanzamento della testa è stata impostata tra 0.3 mm/min in modo tale da rientrare in un range di strain rate tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ .

Inoltre i test di trazione sono stati realizzati senza che i provini fossero stati separati dal substrato (Figura 4.10) per evitare di rompere il campione durante un'eventuale operazione di taglio.

Inoltre testando i provini dotati della propria base di deposizione è stato possibile anche testare la resistenza di collegamento nell'interfaccia tra il primo layer e il substrato.





*Fig. 4.10: Provino cilindrico dotato del substrato.*

Nelle condizioni precedentemente descritte il provino presenta delle problematiche di montaggio sulla MTS poiché risulta impossibile bloccare il provino con gli afferraggi di cui la macchina è dotata.

Infatti la massima apertura di questi ultimi è pari a 15mm mentre la larghezza del substrato di ciascun provino è pari a 25mm.

Per questo motivo è stato necessario realizzare un sistema di afferraggio che potesse essere contenuto dagli afferraggi della macchina e che permettesse il bloccaggio del provino.

Il sistema realizzato è mostrato in Figura 4.11 dove è possibile osservare come sia dotato di uno spazio idoneo per l'alloggiamento dei provini.



*Fig. 4.11: Sistema di afferraggio dei provini dotati del substrato.*

I test di trazione sono stati condotti inserendo al centro di tale supporto un provino come mostrato in Figura 4.12.



*Fig. 4.12: Alloggiamento di un singolo provino nel supporto.*

Una volta posizionato il provino all'interno del supporto quest'ultimo viene montato sulla macchina per le prove di trazione e viene bloccato dagli afferraggi della macchina come mostrato nell'immagine successiva.



*Fig. 4.13: Set-Up del sistema di afferraggio e del provino per i test di trazione.*

#### 4.1.2 Digital Image Correlation

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica di misura senza contatto, basata sull'elaborazione numerica di immagini digitali, per l'analisi di campi di spostamento e deformazione.

In altre parole, è una tecnica che consente attraverso la registrazione digitale di una prova, di valutarne spostamenti e deformazioni. Quindi, sono necessarie sensori in grado di acquisire, con adeguata risoluzione, le immagini durante il test [29].

Mediante l'utilizzo di una sola camera è possibile analizzare campi di spostamento e deformazione bidimensionali (DIC 2D).

Per analizzare campi tridimensionali è stata sviluppata una tecnica 3D (DIC 3D) che sfrutta i principi della stereoscopia e prevede l'uso di due telecamere.

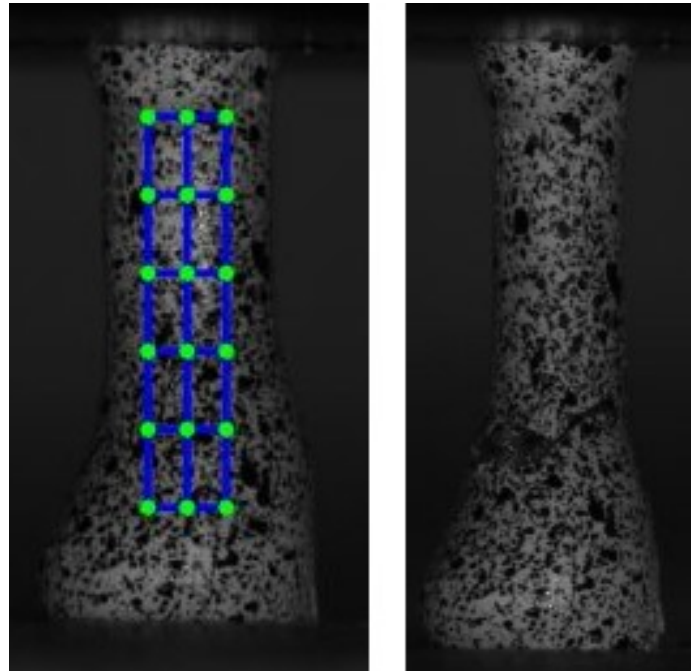
Focalizzando l'attenzione sulla tecnica bidimensionale, è molto importante che il sensore CCD/CMOS sia disposto in modo tale da essere parallelo alla superficie da registrare.

Questa condizione è fondamentale ed è importante che resti verificata per l'intera durata della prova, poiché, eventuali movimenti fuori dal piano potrebbero generare deformazioni apparenti che si sommerebbero a quelle realmente presenti con l'effetto di produrre una misurazione affetta da un errore.

Il principio di funzionamento prevede che attraverso la fotocamera vengano acquisite diverse immagini, almeno una per ogni condizione di deformazione che deve essere indagata, oltre ad una iniziale che ritrae il corpo in esame nella condizione di riferimento (detta immagine di riferimento), che tipicamente è rappresentata dalla configurazione indeformata.

La successiva analisi mediante tecnica DIC confronta l'immagine di riferimento con quelle acquisite con il provino nelle diverse condizioni deformate al fine di calcolarne gli spostamenti relativi e derivarne le deformazioni.

Spiegando più in dettaglio la tecnica, una volta selezionata l'area da analizzare (o ROI, region of interest), all'interno dell'immagine di riferimento, questa viene suddivisa in sottoregioni (subsets) mediante una griglia virtuale con celle di grandezza definibile di volta in volta: gli spostamenti vengono calcolati per ogni punto di intersezione della stessa griglia (Figura 4.14).



*Fig. 4.14: Esempio di subsets.*

Come è possibile notare dall'immagine precedente e ancora meglio nella Figura 4.15, sulla superficie analizzata è stato applicato un pattern con il quale si creano delle zone ad alto contrasto (punti bianchi e neri di piccole dimensioni).



**Fig. 4.15:** *Provino flat su cui è stato realizzato lo speckle.*

Tale pattern, fondamentale per l'analisi DIC, prende il nome di *speckle*.

Lo speckle è molto importante perché consente di realizzare dei subset molto diversi tra loro, contenenti ognuno svariati pixel con una combinazione di livelli di grigio pressoché univoca.

Per ciascun subset viene calcolato lo spostamento riferito al punto centrale una volta che è stata trovata la corrispondenza del medesimo subset, nelle diverse immagini acquisite durante la prova (Figura 4.16).



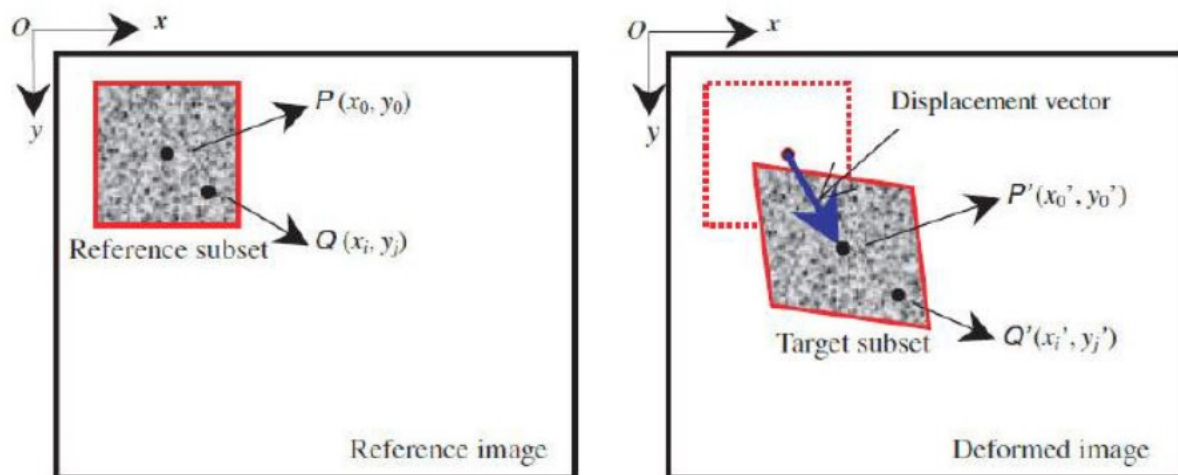


Fig. 4.16: Funzionamento DIC.

Per una corrispondenza univoca è necessario che il subset sia sufficientemente grande da risultare diverso da tutti gli altri, ma, nello stesso tempo, subsets troppo elevati condurrebbero ad errori sistematici di approssimazione ingenti.

Per quanto detto si evince come ci siano due esigenze contrastanti che portano a ricercare una soluzione di compromesso tra l'utilizzo di subset di grandi e piccole dimensioni.

Per ritrovare la corrispondenza fra ogni singolo subset delineato nell'immagine di riferimento (subset di riferimento) e la corrispondente porzione dell'immagine acquisita durante uno stato deformato del corpo in esame (target subset) è prevista un'operazione di cross-correlazione con ricerca del massimo o in alternativa la minimizzazione di una funzione di errore come una *sum-squared difference*.

Una volta rintracciato il target subset, ovvero quello deformato, risulta determinato anche il suo centro che, confrontato con la posizione del centro del subset di riferimento, conduce all'identificazione del vettore di spostamento.

Va però considerato che, a seguito delle deformazioni subite dal provino in analisi il subset di riferimento non può più essere ritrovato come indeformato all'interno delle immagini acquisite.

Risulta quindi necessario un passaggio in cui il subset di riferimento venga via via virtualmente deformato per la ricerca della miglior corrispondenza con il target subset ricercato.

Quest'operazione di deformazione indotta avviene mediante *funzioni di forma*.

Tali funzioni trasformano le coordinate dei pixel appartenenti al subset di riferimento in modo da deformare in un particolare modo il subset in esame.

Possono essere di diverso ordine: più l'ordine è elevato e maggiormente si arriva ad una correlazione tra i diversi subset, data la capacità di deformare in vario modo il subset di riferimento.

Sebbene funzioni di ordine basso siano affette da maggiori problemi di correlazione per campi di deformazione più complessi, è dimostrato che funzioni di forma del primo o meglio del secondo ordine siano approssimazioni sufficienti adottando dimensioni del subset di riferimento adeguatamente piccole.

Tra i principali criteri impiegati nell'*image matching* ci sono quelli basati sulla somma dei quadrati delle differenze, *sum-squared differences*.

Si introducono ora tre dei principali metodi di correlazione facenti parte del gruppo dei criteri della somma dei quadrati delle differenze che evidenziano un grado di robustezza molto vario fra loro [30].

Il primo, più semplice, è richiamato col nome di *sum of squared differences criterion*:

$$C_{SSD} = \sum_i^N \sum_j^N [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2 \quad (5.11)$$

dove N è la dimensione del subset in pixel, mentre f e g sono i valori di grigio del pixel rispettivamente nel subset di riferimento e in quello di target.

Come intuibile una formulazione del genere non permette di tener conto di alcun cambiamento di luminosità (esempio variazione di luce durante una prova) ed è pertanto sensibile a qualsiasi sua variazione. Va da sé che è un criterio particolarmente veloce ma non robusto e per questo generalmente se ne sconsiglia l'utilizzo.

Il secondo è invece detto *normalized sum of squared differences criterion*:

$$C_{NSSD} = \sum_i^N \sum_j^N \left[ \frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2 \quad (5.12)$$

Dove,

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_i^N \sum_j^N [f(x_i, y_j)]^2} \quad (5.13)$$



$$\bar{g} = \sqrt{\sum_i^N \sum_j^N [g(x'_i, y'_j)]^2}. \quad (5.14)$$

In questo caso i benefici della normalizzazione conducono ad un'insensibilità della formulazione da variazioni di scala della luminosità.

Il criterio risulta essere più robusto del precedente e viene consigliato per la gran parte delle analisi.

L'ultimo criterio ad essere presentato è lo *zero-normalized sum of squared differences criterion* e risulta essere il più sofisticato dei tre:

$$C_{ZNSSD} = \sum_i^N \sum_j^N \left[ \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (5.15)$$

Dove,

$$\Delta f = \sqrt{\sum_i^N \sum_j^N [f(x_i, y_j) - f_m]^2}. \quad (5.16)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_i^N \sum_j^N [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}. \quad (5.17)$$

Dove  $f_m$  e  $g_m$  sono i valori di grigio medi dei rispettivi subset di riferimento e di target.

La particolare formulazione consente al criterio un'insensibilità sia ai cambiamenti della scala sia di offset della luminosità e per questa ragione è in assoluto il criterio più robusto.

Con queste tecniche il programma DIC è in grado di restituire il campo di spostamenti cui è sottoposto un provino durante la prova. Attraverso la differenziazione numerica è possibile trovare i valori di deformazione.

Il programma DIC utilizzato per questa tesi è stato messo appunto dal gruppo di Costruzione di Macchine dell'Università Politecnica delle Marche e presenta un'interfaccia come quella mostrata in Figura 4.17.

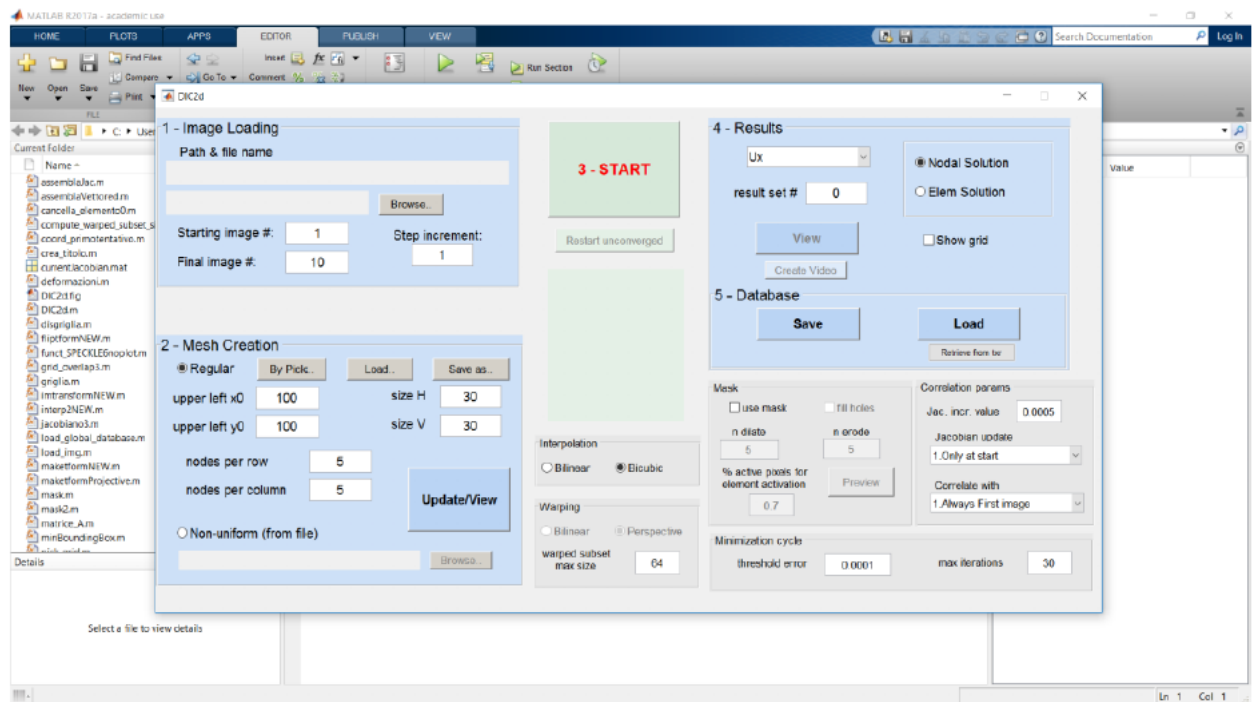


Fig. 4.17: Finestra del programma DIC.

Nella sezione 1 (Figura 4.18) è possibile andare a selezionare il gruppo di immagini da analizzare.

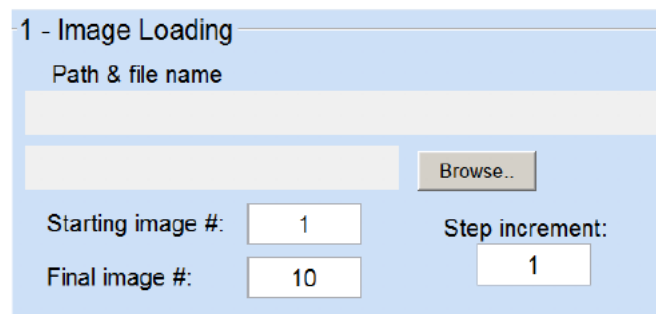


Fig. 4.18: Sezione 1 - DIC.

Nella sezione 2 si definisce la griglia e tutte le informazioni relative ai subset (Figura 4.19).

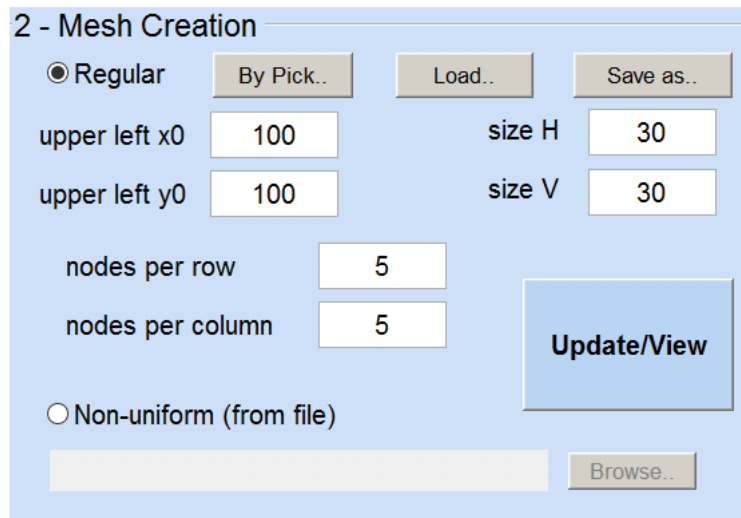


Fig. 4.19: Sezione 2 - DIC.

Nelle sezioni 4 e 5 si sceglie quali risultati visualizzare e quali calcoli, svolti precedentemente, caricare (Figura 4.20).

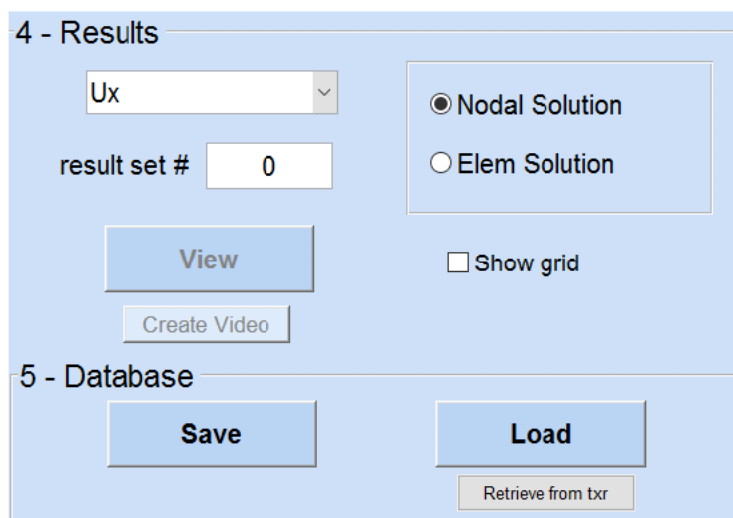


Fig. 4.20: Sezione 4e5 - DIC.

Nell'ultima sezione si stabiliscono i parametri di calcolo, come ad esempio, la modalità di valutazione dello Jacobiano e il numero massimo di iterazioni per giungere a convergenza (Figura 4.21). Quindi si avvia il calcolo.

Al termine del calcolo è possibile andare a visualizzare campo di spostamento e deformazione piano per ogni singolo set, ovvero per ogni singola immagine (Vedi Capitolo 6).

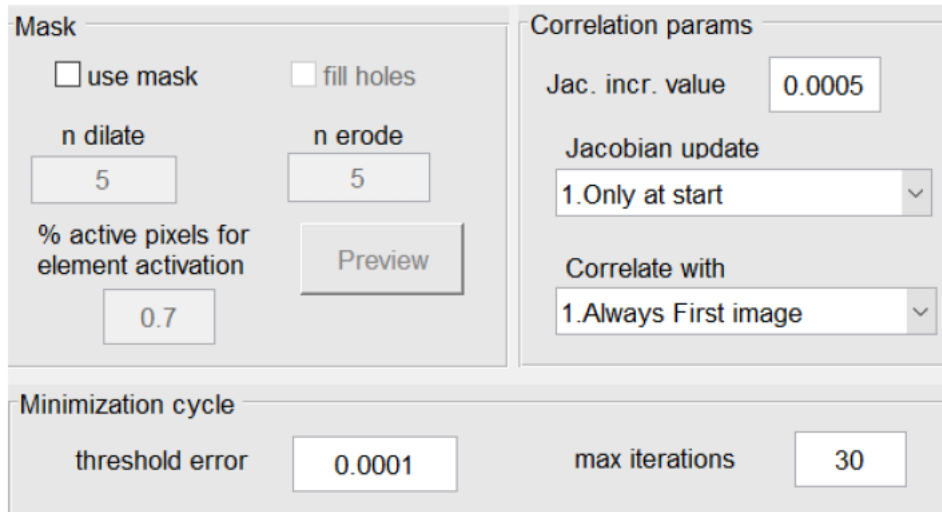


Fig. 4.21: Sezione 5 - DIC.

#### 4.1.3 Calcolo delle dimensioni dei provini

Come già spiegato precedentemente i provini realizzati per i test di trazione mediante Laser Metal Deposition sia nella geometria flat che cilindrica non hanno dimensioni perfette e quindi necessitano di essere misurati prima di eseguire i vari test.

In particolare è necessario andare a valutare la lunghezza del tratto utile così da poter valutare lo strain rate di ogni test e la sezione del provino per il calcolo delle tensioni.

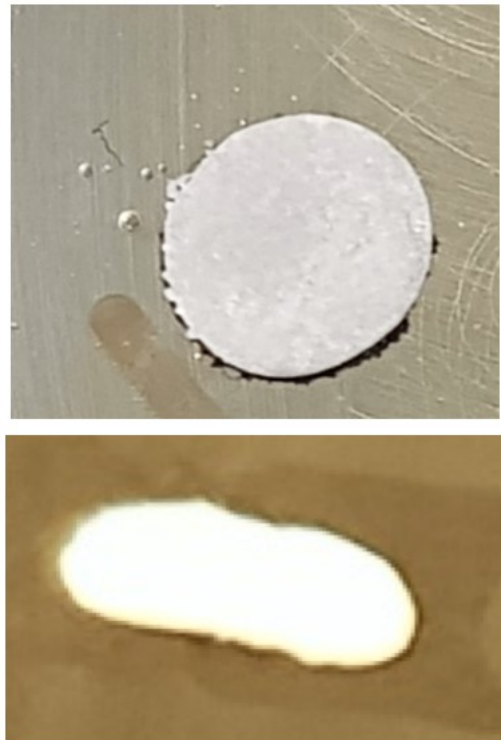
Quindi attraverso l'utilizzo di un calibro sono state calcolate le dimensioni sopra citate; in particolare la lunghezza del tratto utile è stata ottenuta direttamente.

Per quanto riguarda la misura dell'area del provino flat sono stati misurati lo spessore T (Thickness) e la larghezza W (Width) e poi moltiplicati tra di loro:  $A_{flat}=W*T$ .

Nel caso del campione cilindrico è stato misurato il diametro d nel tratto utile per poi calcolare il valore della sezione resistente come:  $A_{cylindrical}=\frac{\pi d^2}{4}$ .

Quindi, utilizzando le formule mostrate sopra, le sezioni dei due provini sono state ritenute rispettivamente di forma rettangolare e circolare e questo ci ha portato a commettere un errore.

Infatti le sezioni dei due provini differiscono notevolmente da quelle indicate precedentemente poiché in realtà risultano essere, in entrambi i casi, di forma ellittica (Figura 4.22).

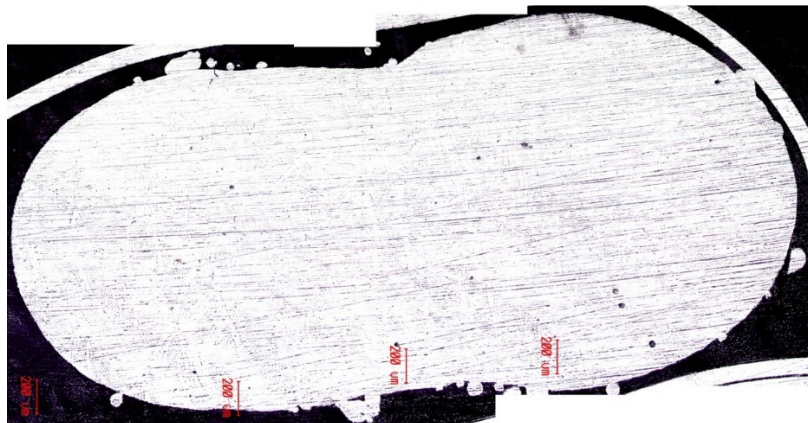


*Fig. 4.22: Sezione dei provini: flat (in basso) e cilindrico (in alto).*

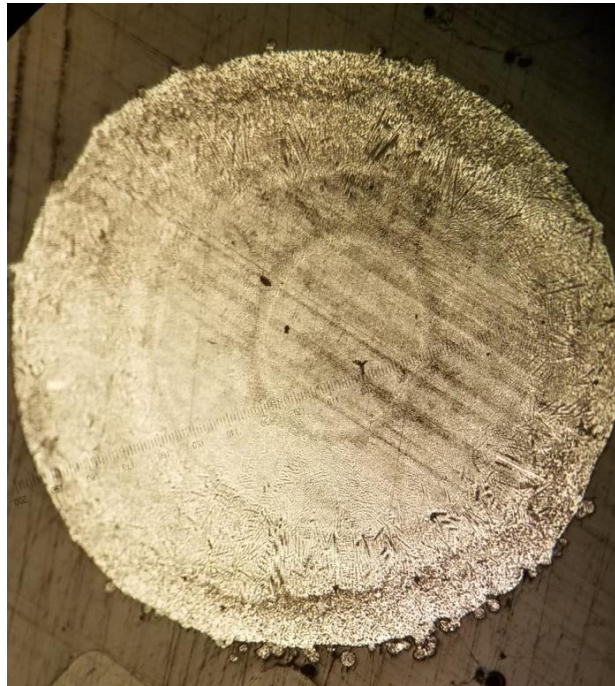
Per questo motivo il calcolo dell'area precedentemente realizzato è affetto da un errore che favorisce una sovrastima della reale sezione dei provini.

A tal proposito si è cercata una soluzione per poter valutare l'area corretta dei campioni testati tentando di determinare l'errore commesso.

Quindi alcuni dei campioni depositati sono stati tagliati trasversalmente all'asse longitudinale di accrescimento e analizzati al microscopio ottico mediante il quale si è riusciti ad ottenere delle immagini dettagliate e in scala delle sezioni dei vari provini (Figura 4.23 – 4.24).



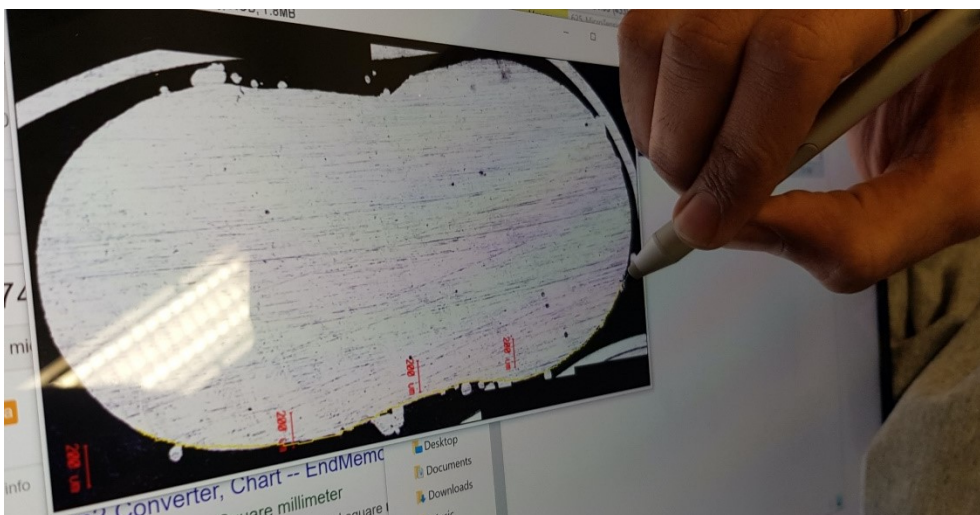
*Fig. 4.23: Sezione del provino flat vista al microscopio ottico.*



*Fig. 4.24: Sezione del provino cilindrico vista al microscopio ottico.*

Successivamente mediante l'utilizzo del software ImageJ (Image Processing and Analysis in Java) il quale è un software "open source" di elaborazione delle immagini sviluppato dalla National Institutes of Health, che può essere utilizzato per analizzare la microstruttura dei campioni e che permette di calcolare misure di aree dopo averne tracciato il profilo.

Quindi sono stati tracciati i profili delle superfici dei campioni analizzati (Figura 4.25) così da ottenere i valori di area corretti.



*Fig. 4.25: Disegno del profilo della sezione di un provino flat.*

Ripetendo tale operazione su un numero di campioni sufficienti è stato individuato l'errore commesso sia sui flat samples sia sui cylindrical sample.



In particolare sui provini flat il valore di area calcolato con le misure realizzate con il calibro erano affette da un errore del 20-25% mentre quelle dei provini cilindri da una sovrastima circa del 15-20%.

A tal proposito i valori precedentemente calcolati sono stati corretti in modo da poter essere poi utilizzati per il calcolo delle tensioni.

#### 4.2 Prova di compressione statica

Le prove di compressione sono molto simili a quelle di trazioni e quindi anch'esse permettono di determinare diverse proprietà del materiale in esame, come il modulo di Young o modulo di elasticità (E), il carico unitario di snervamento ( $Y_S$ , *Yield Strength*) e le proprietà plastiche relative alle condizioni di carico applicato.

La prova di compressione viene eseguita comprimendo un provino di forma cilindrica fra due superfici piane e parallele (Figura 4.26).

In molte lavorazioni per deformazione plastica (stampaggio, laminazione, estrusione), la deformazione si ottiene principalmente tramite un'azione di compressione esercitata sul pezzo da deformare.

La prova di compressione riproduce uno stato di tensione paragonabile a quello impresso al pezzo durante le lavorazioni predette ed è perciò indicativa ai fini del comportamento del materiale.

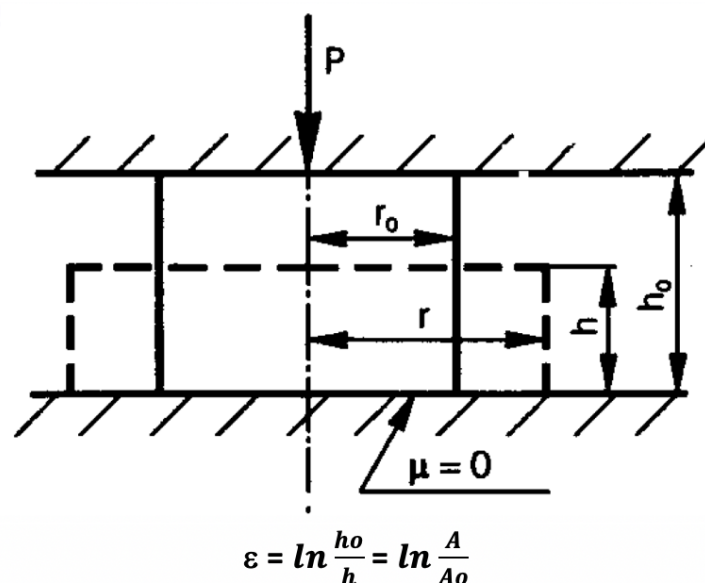


Fig. 4.26: Schematizzazione di una prova di compressione.



Per far ciò si adoperano macchinari appositi costituiti da un'incastellatura (formata da un basamento, da colonne portanti e da una traversa), un attuatore, una cella di carico (cioè il trasduttore per misurare la forza) e da organi di fissaggio del campione (Figura 4.1).

Inoltre si adopera un estensimetro applicato al provino per misurare istante per istante la sua deformazione.

Sono in genere prove molto complicate dal fatto che tra provino e i piatti della macchina l'attrito crea tensioni tangenziali che introducono uno stato di tensione tridimensionale creando anche il fenomeno di imbarilimento o barreling come mostrato in Figura 4.27).

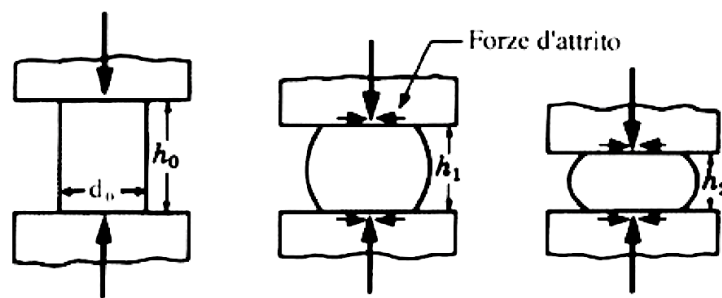


Fig. 4.27: Rappresentazione del fenomeno di barreling.

Il valore in modulo della tensione di snervamento a trazione ed a compressione per i metalli è simile (simmetria rispetto allo snervamento).

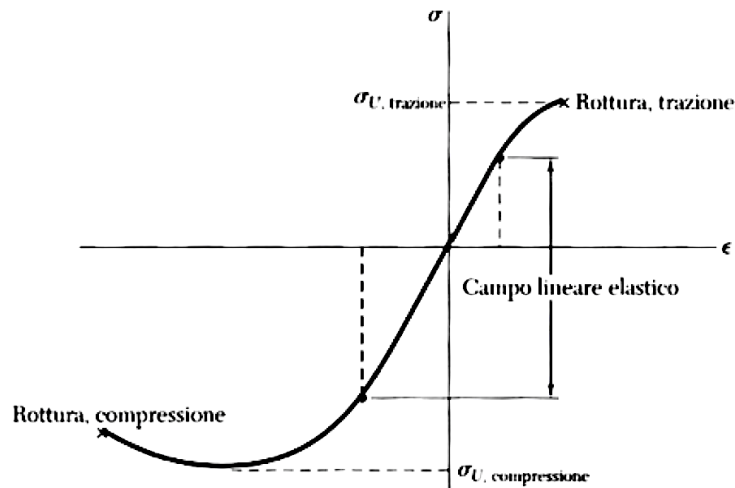


Fig. 4.28: Andamento della curva di compressione e trazione a confronto.

Il comportamento dei provini sottoposti a prova di compressione dipende dalla tipologia di materiale testato; infatti solo i materiali fragili e quelli poco duttili si rompono a compressione mentre i materiali duttili si deformano vistosamente senza rompersi.

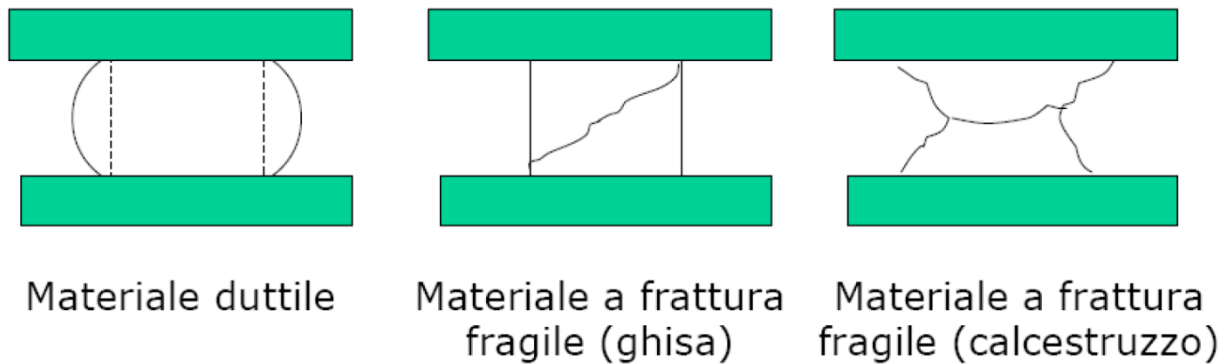


Fig. 4.29: Comportamento a compressione di diverse tipologie di materiali.

La prova di compressione è una prova statica e si definisce tale quando presenta uno strain rate compreso tra  $10^{-2} \div 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , calcolabile nel modo seguente:

$$SR = \frac{L_0}{V_{testa}} \quad (5.18)$$

Le prove di trazione possono essere condotte in due modalità:

- a) In controllo di carico: la macchina ha una velocità di applicazione del carico costante, che aumenta quindi in maniera costante fino all'avvenuta rottura del provino o del massimo sforzo applicabile nel caso di materiale duttile.
- b) In controllo di deformazione: la prova è eseguita adoperando una velocità di deformazione del provino costante, con carico variabile.

Questa è la modalità con cui si sono condotte le prove di trazione in questo lavoro. In particolare si è adoperata velocità di deformazione  $\dot{\epsilon} = 8,10 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

La macchina fornisce un diagramma sforzo-deformazione, che mette in relazione, appunto, tensioni e deformazioni ( $\sigma$  e  $\epsilon$ ).

In una generica sezione di una trave soggetta a compressione semplice la tensione ingegneristica  $\sigma$  si calcola con la relazione

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.19)$$



in cui  $F_n$  è la forza normale e negativa in modulo rispetto alla direzione esterna della superficie del corpo a cui è applicata e  $A_0$  è l'area della sezione trasversale iniziale del provino.

Il valore di deformazione ingegneristica è, invece, così calcolabile:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (5.20)$$

Dove  $L_f$  è la lunghezza finale e  $L_i$  è la lunghezza iniziale del provino.

Il diagramma che viene tracciato relazionando queste due grandezze prende il nome di *curva ingegneristica*.

In generale, possiamo riscontrare una prima fase in cui il comportamento del materiale è elastico e sussiste un legame di proporzionalità diretta tra deformazioni e tensioni.

Successivamente si ha un tratto in cui le deformazioni sono permanenti e il legame tensione-deformazione è tipicamente non lineare.

A differenza della prova di trazione in questo caso non si manifesta la strizione del provino e quindi la sezione resistente anziché diminuire tende ad aumentare e di conseguenza anche il carico necessario a deformare il provino tende ad aumentare.

Il calcolo delle tensioni vere quindi è calcolabile come:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.21)$$

dove  $F$  è il carico descritto precedentemente e  $A$  è la sezione istantanea del campione sotto esame, la quale come già detto, tende ad aumentare portando le tensioni vere ad assumere valori più bassi rispetto a quelli ingegneristici.

Quindi il diagramma effettivo che rende i risultati indipendenti dal fenomeno di espansione ha per ordinate le tensioni vere e in ascisse le deformazioni vere; prende il nome di *curva vera*. Questo tipo di curva può essere ottenuto a seguito di considerazioni analitiche.

La tensione vera è pari a:

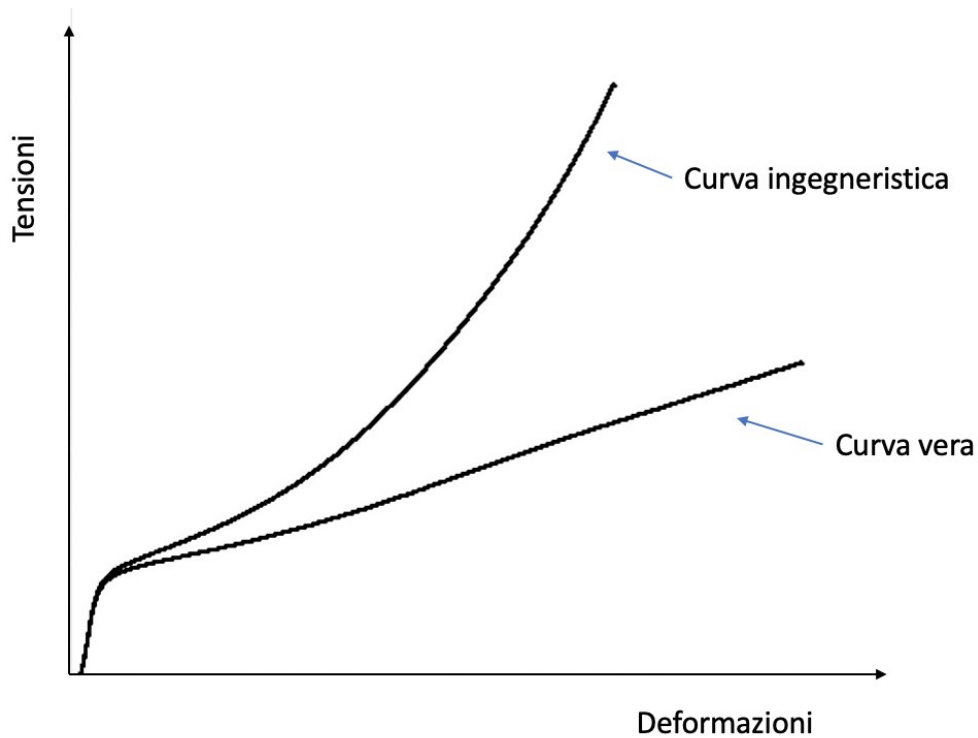
$$\sigma_t = \sigma (1 - \varepsilon) \quad (5.22)$$

La deformazione vera è pari a:

$$\varepsilon_t = \ln(1 - \varepsilon) \quad (5.23)$$

Le due curve sono per il primo tratto coincidenti, cominciano a differenziarsi a partire dal carico di snervamento e si allontanano sempre di più per tutto il periodo delle grandi deformazioni.

La curva vera ha dunque andamento sempre più basso rispetto a quello ingegneristico (Figura 4.30).



*Fig. 4.30: Curva vera e ingegneristica a confronto.*

#### 4.2.1 Setup statici

La macchina impiegata per le prove di compressione statiche situata nei laboratori dell'Università Politecnica delle Marche (Figura 4.31).



*Fig. 4.31: Macchina per prove di compressione UNIVPM.*

Per la misura delle deformazioni è stato utilizzato un estensometro (extensometer), un particolare tipo di estensimetro adatto principalmente a misurare la deformazione media di un provino.

Tale meccanismo è costituito da due coltelli (o due afferraggi), disposti su di un'apposita incastellatura ad una distanza prefissata che costituisce la base di misura dell'estensimetro (Figura 4.32).



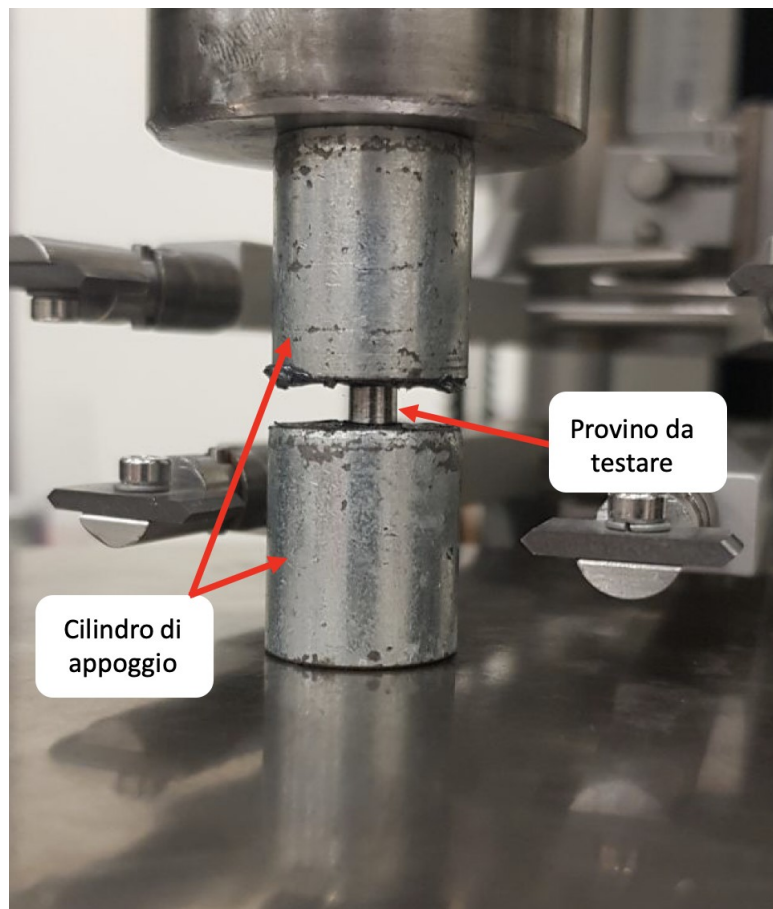
*Fig. 4.32: Estensometro.*

Lo spostamento del coltello mobile rispetto al coltello fisso consente di determinare la deformazione.

Dopodiché il trasduttore di misura, che trasforma lo spostamento tra i coltelli in un segnale amplificato.

Per la misura dei valori di forza applicati al campione è stata utilizzata una cella di carico da 50kN (Figura 4.34).

I provini utilizzati per la prova di compressione statica, descritti nel Paragrafo 4.1.1, sono stati posizionati tra due cilindri di dimensioni maggiori a loro volta collocati sul piatto metallico di base della macchina (Figura 4.33).



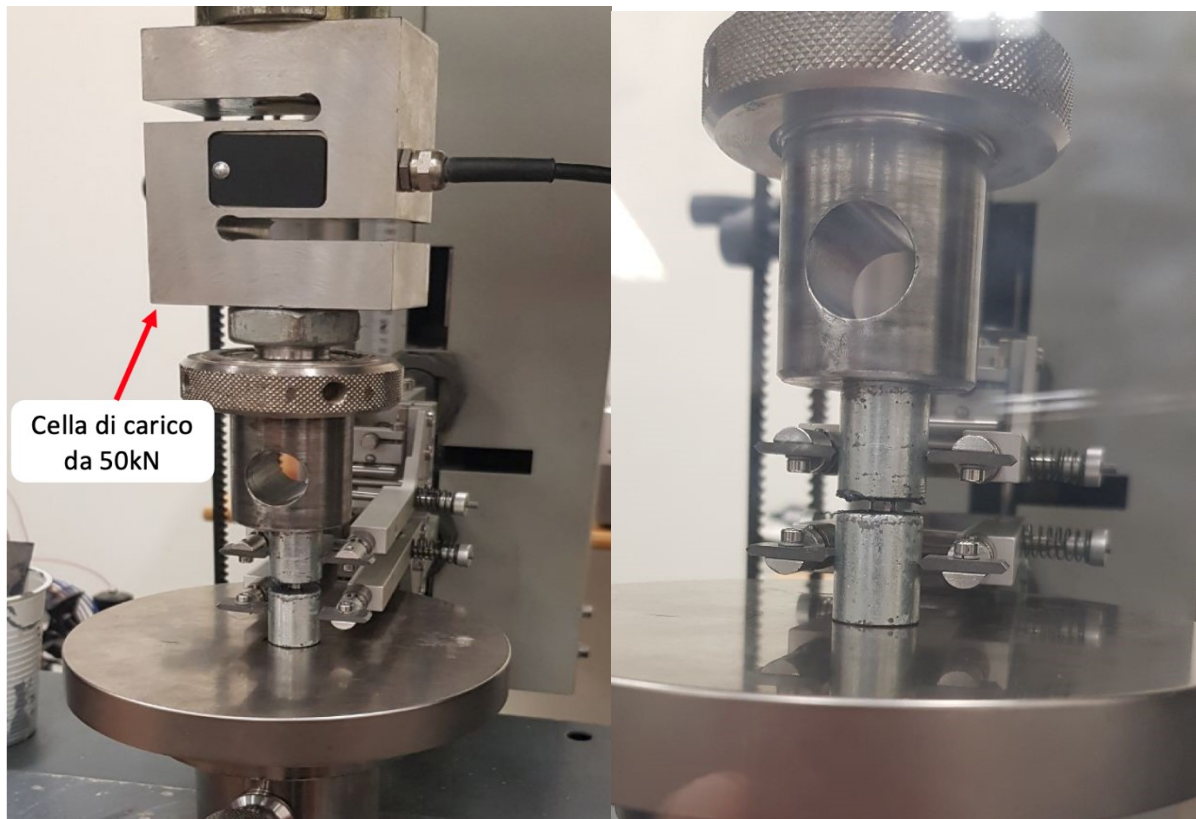
*Fig. 4.33: Rappresentazione del provino posizionato tra due cilindri.*

Dal momento che le dimensioni dei campioni da testare sono molto ridotte è possibile utilizzare questi due cilindri per misurare le deformazioni durante la prova in quanto permettono di essere afferrati mediante i coltelli dell'estensometro.

Inoltre i provini da testare sono stati sporcati con del grasso nelle superfici di base prima di essere inseriti tra i cilindri più grandi così da eliminare o perlomeno ridurre il fenomeno della barilottatura.

Nella figura successiva è possibile osservare tutti i componenti precedentemente descritti assemblati e posizionati durante lo svolgimento del test di trazione.





*Fig. 4.34: Set-Up per la prova di compressione statica.*

Le prove sono state condotte sui provini cilindrici di due differenti misure:

- 1)  $d_o=4,5$  mm;  $l_o=4,5$ mm
- 2)  $d_o=4$  mm;  $l_o=4$  mm

La macchina è stata impostata in controllo di spostamento e la velocità di avanzamento della testa è stata impostata tra 0.3 mm/min così da rientrare in un range di strain rate tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ .

### 4.3 Prova di compressione dinamica

Oltre alle prove di trazione e compressione statiche sono state condotte delle prove di compressione dinamiche, per valutare il comportamento a strain rates più elevati e quindi analizzare la sensibilità alla velocità di deformazione del materiale in esame.

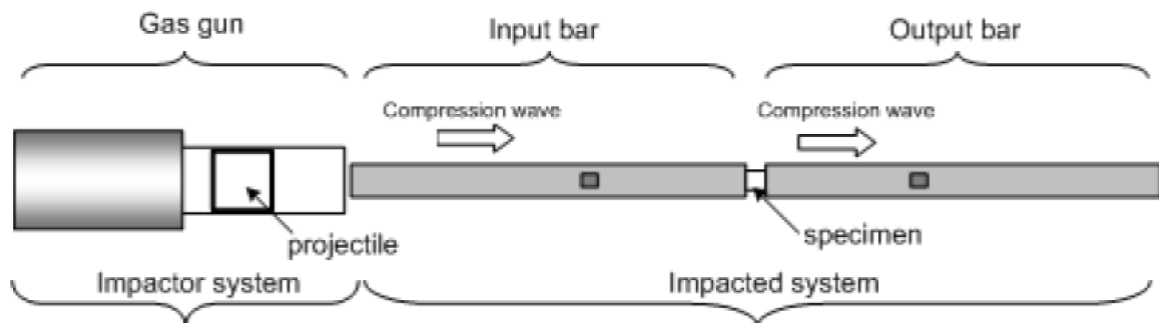
Lo strumento impiegato per tali prove è la *Barra di Hopkinson* sviluppata dal gruppo di Costruzione di Macchine dell'Università Politecnica delle Marche.

Nei successivi paragrafi saranno approfonditi i discorsi relativi alla Barra di Hopkinson ed alla sensibilità dei materiali in generale allo strain rate.

#### 4.3.1 La barra di Hopkinson

La Barra di Hopkinson è uno dei metodi più idonei per la misura delle proprietà meccaniche ad elevati strain rates dei materiali attraverso la registrazione delle onde che si propagano a seguito di un impatto [31].

La versione tradizionale della barra di Hopkinson, Figura 4.35, risale ai pionieristici lavori di ricerca condotti nel 1914 da Bertram Hopkinson (figlio di John Hopkinson, che fu il primo negli ultimi anni dell'800 a verificare sperimentalmente l'incremento di resistenza dei materiali soggetti ad impatto), nel 1948 da R. M. Davis, nel 1949 da H. Kolsky e più recentemente da U.S. Lindholm.



*Fig. 4.35: Barra di Hopkinson tradizionale.*

La barra di Hopkinson classica genera onde di compressione provocate dall'impatto di un proiettile lanciato su una barra solitamente di sezione trasversale circolare chiamata input bar o barra incidente, la quale trasferisce l'impulso al provino inserito tra l'input bar ed un'altra barra detta output bar o barra di trasmissione.

Durante il test, il provino si deforma plasticamente fino a rottura mentre le barre, incidente e di trasmissione, rimangono in campo elastico.

Il proiettile viene generalmente sparato per mezzo di un piccolo apparato pneumatico a gas. Quando il proiettile impatta la barra incidente viene generato un impulso di compressione di ampiezza costante all'estremo della barra incidente e del proiettile.

L'onda elastica piana di compressione incidente si propaga lungo l'input bar, raggiunge l'interfaccia barra-provino e carica dinamicamente quest'ultimo.

Il risultato dell'interazione tra onda incidente e provino è governata dalle rispettive impedenze acustiche dipendenti dal materiale e dalle sezioni.

Parte dell'onda viene riflessa, parte invece continua a viaggiare nel provino e nella barra di trasmissione.

La descrizione analitica si basa sulle seguenti ipotesi di base:

- Il diametro delle barre deve essere piccolo rispetto alla lunghezza dell'impulso in modo che la trasmissione delle onde avvenga senza alcuna dispersione (le barre rimangono sempre in campo elastico);
- La lunghezza del provino deve essere piccola in modo che il tempo impiegato dall'onda per propagarsi al suo interno è trascurabile rispetto alla durata totale del test.

Questa condizione permette all'interno del provino le riflessioni necessarie per raggiungere una distribuzione omogenea delle tensioni e delle deformazioni in tutta la lunghezza del provino, il che significa anche condizioni di equilibrio delle forze agenti sulle estremità del provino.

Rispettando le due condizioni sopracitate e rimanendo le due barre in campo elastico, può essere applicata la teoria della propagazione delle onde elastiche al sistema input bar-provino-output bar.

In questo modo si possono ottenere le tre relazioni che permettono di calcolare la tensione, la deformazione e lo strain-rate nel materiale del provino in funzione del tempo misurando in maniera diretta l'impulso incidente, riflesso e trasmesso di ampiezza rispettivamente  $\epsilon_I$ ,  $\epsilon_R$ ,  $\epsilon_T$ .

Si consideri la Figura 4.36 che rappresenta il sistema input bar, provino, output bar.

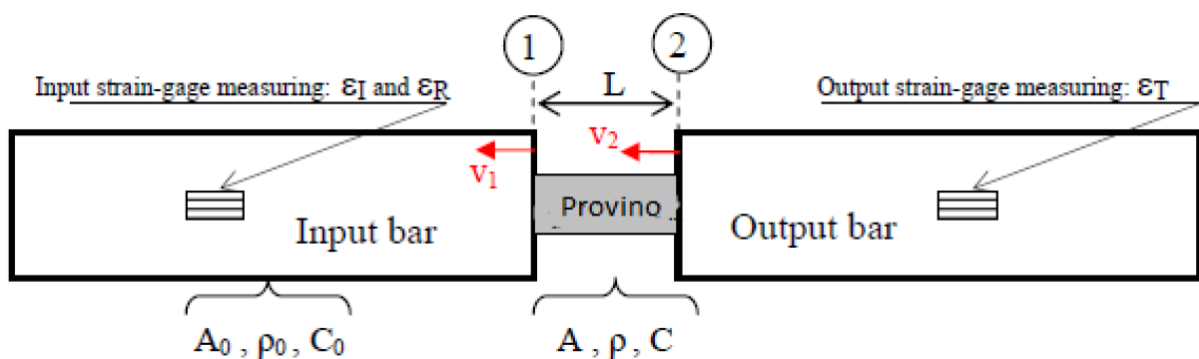


Fig. 4.36: Schematizzazione input e output bar e provino.

Dalla teoria della propagazione delle onde uni-dimensionali si ha:

$$\sigma = \rho v C \quad (5.24)$$



Dove  $\sigma$  è la tensione,  $\rho$  è la densità del materiale,  $v$  è la velocità della particella,  $C$  è la velocità del suono nel mezzo.

L'equazione costitutiva del materiale in campo elastico è la legge di Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.25)$$

Mentre la velocità del suono nel materiale vale:

$$C^2 = E/\rho \quad (5.26)$$

Da cui si ottiene:

$$v = C\varepsilon \quad (5.27)$$

Da queste due relazioni, misurando  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_T$  è possibile calcolare la velocità di impulso alle due estremità del provino:

Interfaccia 1:  $v_1 = C_0 \varepsilon_I$  per  $t=0$

Interfaccia 2:  $v_2 = C_0 \varepsilon_T$

Per  $t > 0$  la velocità nell'interfaccia 1 decresce perché parte dell'onda incidente viene riflessa, allora si avrà:

Interfaccia 1:  $v_1 = C_0 (\varepsilon_I - \varepsilon_R)$  per  $t > 0$

La velocità di deformazione si definisce come:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{L} \quad (5.28)$$

Andando a sostituire le precedenti relazioni,



$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C_0(\varepsilon_I - \varepsilon_R) - C_0(\varepsilon_T)}{L} = \frac{C_0}{L}(\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) \quad (5.29)$$

Integrando nell'intervallo di tempo  $[0; t]$  si ottiene la deformazione del materiale

$$\varepsilon = \frac{C_0}{L} \int_0^t (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) dt \quad (5.30)$$

Per ottenere la tensione agente nel provino si impone l'equilibrio delle forze agenti all'interfacce per cui si ha

$$\sigma = \frac{F_1(t) - F_2(t)}{2A} \quad (5.31)$$

Le forze alle interfacce valgono,

$$\text{Interfaccia 1} \rightarrow F_1 = A_0 E_0 (\varepsilon_I + \varepsilon_R)$$

$$\text{Interfaccia 2} \rightarrow F_2 = A_0 E_0 (\varepsilon_T)$$

Quindi,

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{2A} (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (5.32)$$

Dato che nel provino sussiste l'equilibrio,  $\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (5.33)$$

$$\varepsilon = -\frac{C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (5.34)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (5.35)$$

Le precedenti sono le formule utilizzate per la costruzione dei legami costitutivi dei materiali soggetti ad alte velocità di deformazione.

Dal punto di vista tecnico esisto varie versioni in grado di poter eseguire prove di trazione, compressione e taglio su provini polimerici o di metallo sia a temperatura ambiente che per valori molto bassi o estremamente elevati. Queste tipologie di barra di Hopkinson sono:

- Una versione classica usata principalmente per prove di compressione ad elevata velocità di deformazione soprattutto per piccoli provini di metallo. Questo tipo di apparecchiatura permettere di eseguire prove negli intervalli di velocità di deformazione che vanno da 100 a 2000 s<sup>-1</sup> (estendibili a 50 s<sup>-1</sup> per il limite inferiore e fino a 50000 s<sup>-1</sup> per sollecitazione di taglio). Usando la barra di Hopkinson classica equipaggiata per test dinamici sarebbe necessario lanciare un proiettile lungo più di 10m per ottenere un'onda di durata pari a qualche millisecondo, compito difficile in particolar modo per la realizzazione dell'impatto piano tra il proiettile e la input bar. Quest'ultima, infatti, costituisce una condizione assolutamente necessaria per generare onde piane elastiche di tensione necessarie per la corretta analisi dei dati della barra di Hopkinson attraverso la teoria della propagazione delle onde elastiche piane.
- Una versione pretensionata o diretta che ha il vantaggio di una maggiore compattezza dell'apparato, in quanto viene a mancare il sistema di lancio della striker bar, permettendo così di avere onde molto lunghe a parità di ingombro totale. Di contro, l'onda di stress in input ha un'intensità pari a metà del pretensionamento ed ha una forma leggermente più *spanciata* se paragonata alla forma quasi rettangolare che è tipica della versione classica. Questo dipende dalla rigidità e fragilità dell'elemento sacrificale, che per quanto sia alta non presenta una rottura perfettamente istantanea.



Ottenere quindi un'onda il più simile ad un'onda quadra rappresenta un aspetto importante per la qualità dei risultati [28].

### **Laboratorio UNIVPM**

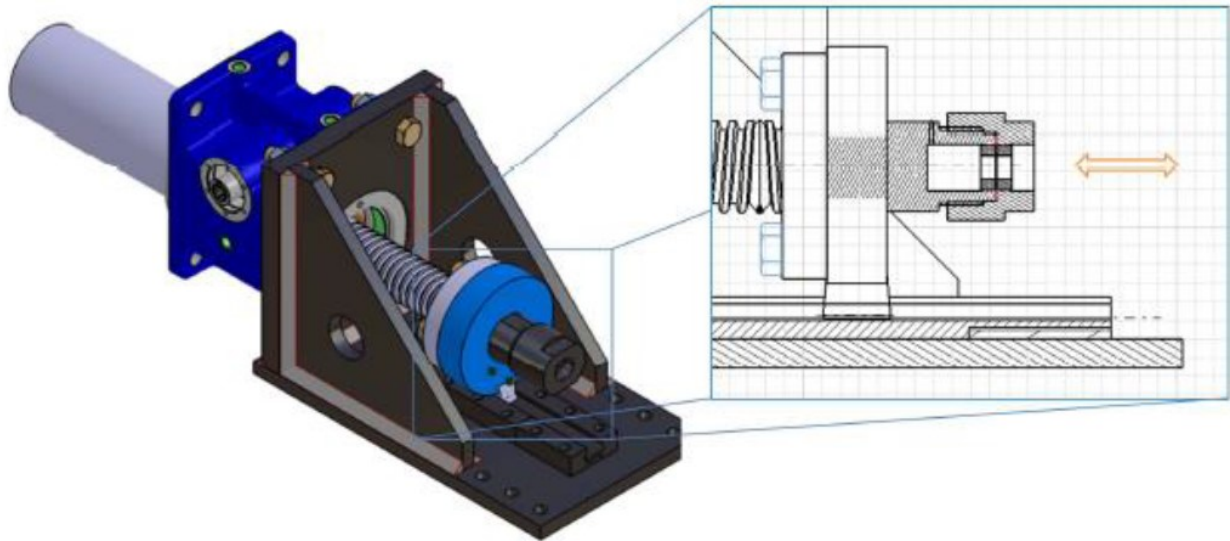
Nel laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche, progettata dal gruppo di Costruzione di Macchine, vi è una versione di barra diretta con un sistema innovativo di generazione dell'onda di input basato sulla tranciatura di un disco a taglio di spessore variabile da 0,3 a 0,8 mm (Figura 4.37), come elemento sacrificale, in grado di generare onde di compressione e di trazione, nominata Slip Hopkinson Tension Compression Bar (SHTCB) [31].



*Fig. 4.37: Elemento sacrificale.*

Nella versione a trazione diretta, l'input bar viene in parte pretensionata (pretensioned) mediante un martinetto (Figura 4.38) ed un sistema di blocco (Figura 4.39), quest'ultimo posizionato ad una distanza pari alla metà della lunghezza dell'onda che si vuole generare.

Il martinetto funge da sistema di pretensionamento che va a tranciare a taglio un disco cavo, mentre il sistema di blocco è formato da un nottolino che, collegato alle due barre, viene mandato a battuta su un sistema di arresto.



*Fig. 4.38: Martinetto e sistema di blocco per Hopkinson a trazione diretta.*

Il martinetto tira indietro, facendola traslare, la barra pretensionata fino a provocare la rottura dell'elemento sacrificale.

Ora, l'altra estremità della barra pretensionata è collegata alla Input bar tramite un nottolino filettato che impegna le due estremità delle stesse.

Il nottolino è collocato all'interno di un profilato (Figura 4.39) che svolge sia la funzione di appoggio che di ostacolo per la barra pretensionata che verrà quindi messa in tensione quando si azionerà il martinetto.

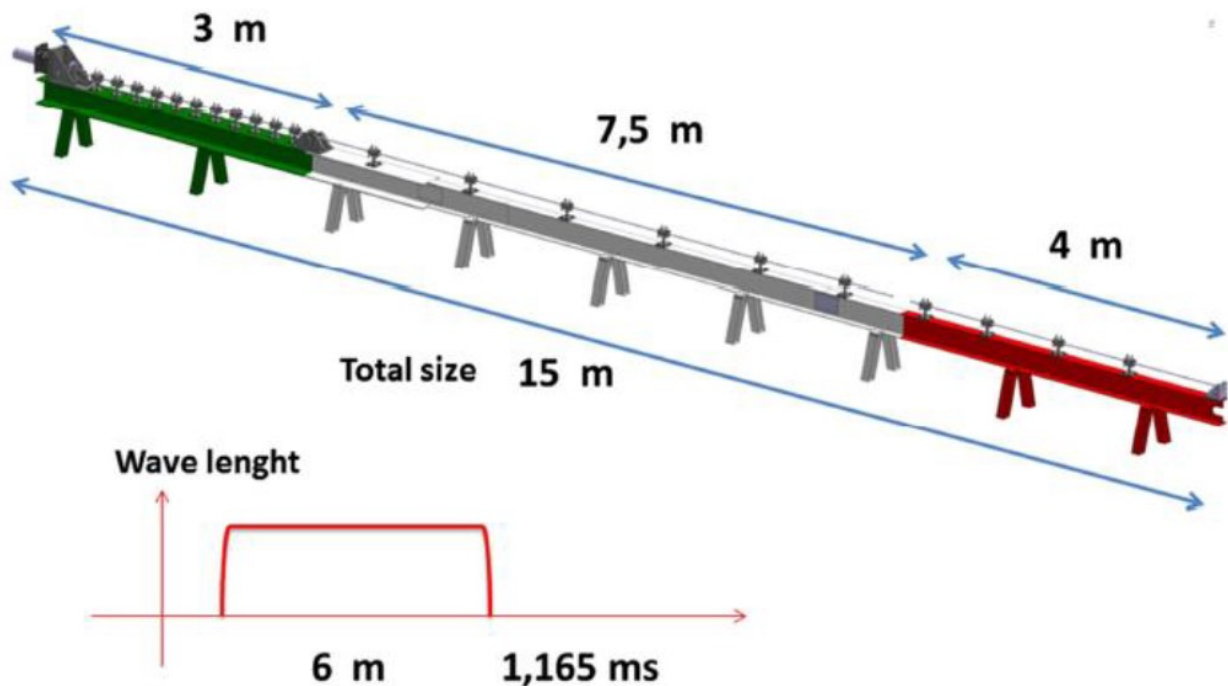


*Fig. 4.39: Profilato e Nottolino.*

Di conseguenza alla rottura dell'elemento sacrificale la barra così pretensionata accelererà in direzione opposta a quella in cui veniva tirata dal martinetto andando ad impattare la Input bar.

In questa versione della barra si ha il vantaggio di una compattezza maggiore, poiché non c'è il sistema di lancio della Strike Bar e consente di avere onde molto lunghe a parità di ingombro totale.

L'apparato è rappresentato nella Figura 4.40 sottostante dove con le dimensioni indicate (diametro barra 18mm) si riesce ad ottenere un'onda teorica di 6 m e della durata di 1.165 ms, che permette di coprire un range di velocità di deformazione che va dai circa  $200 \text{ s}^{-1}$  ai circa  $1700 \text{ s}^{-1}$ , con un carico massimo di pretensionamento di 100kN.



*Fig. 4.40: UNIVPM - Hopkinson Bar.*

Come si può vedere in Figura 4.40, ad ogni metro viene posto un supporto di acciaio con all'interno del materiale polimerico (Figura 4.41), che riducono l'instabilità elastica della barra ammettendo poco attrito.



*Fig. 4.41. Supporto in acciaio dotato di elemento in materiale polimerico.*

Sulle barre incidente e di trasmissione, ad una certa distanza dal provino, vengono applicati degli estensimetri elettrici a resistenza in semi-conduttori che convertono le deformazioni sulle barre in segnali elettrici analogici proporzionali alle deformazioni alle quali sono soggette le barre durante la trasmissione delle onde di tensione elastiche.

In questo modo è possibile registrare le deformazioni:

- $\epsilon_I$  provocate dall'impulso incidente
- $\epsilon_R$  causate da una parte dell'onda incidente riflessa all'interfaccia input bar-provino
- $\epsilon_T$  provocata dall'aliquota di onda incidente che viene impressa al provino e quindi trasmessa nell'output bar.

Lo schema del sistema di acquisizione utilizzato è mostrato nella figura successiva.

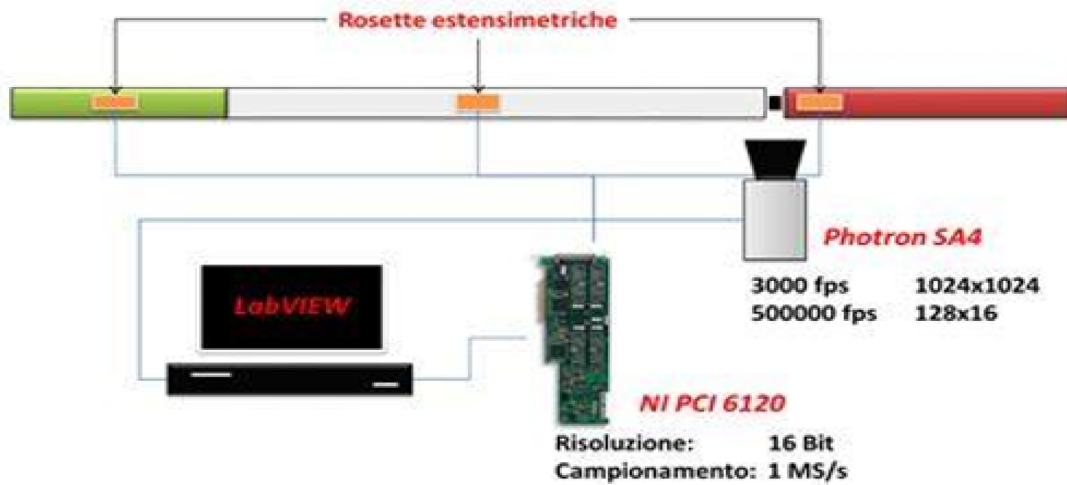


Fig. 4.42: Sistema di acquisizione.

I segnali vengono registrati e analizzati al fine di ricavare la curva caratteristica tensione-deformazione del materiale testato.

Le onde sono valutate in termini di tempi di salita e confrontate con un'onda generata con il nuovo sistema e l'onda ottenuta con la versione classica della Split Hopkinson bar.

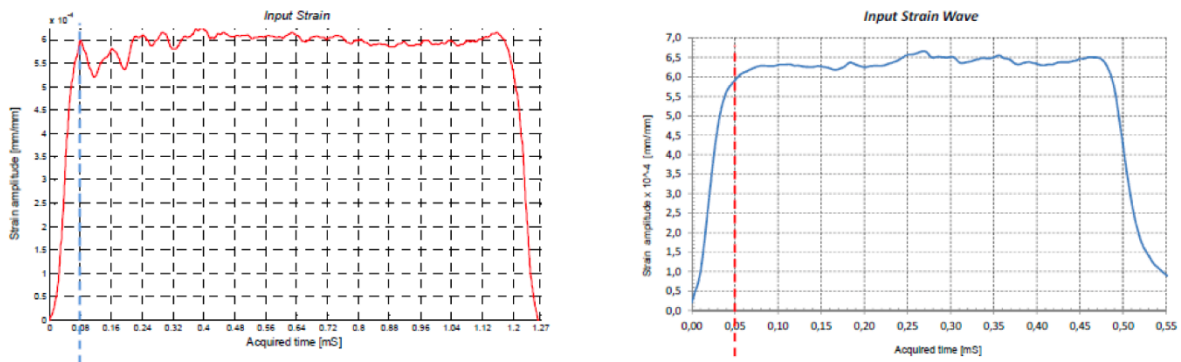


Fig. 4.43: Confronto tra le onde a trazione diretta (a destra) e classica (a sinistra).

Come si può osservare nella Figura 4.43 i tempi di salita sono molto vicini per le due onde; in particolare si tratta di 80μs della versione a trazione diretta contro i 50μs della versione classica.

Questo evidenzia come la generazione dell'onda mediante rottura a taglio dell'elemento sacrificale permetta di ottenere ottimi risultati, che potrebbero essere migliorati ulteriormente nella misura in cui l'elemento sia il più fragile possibile e che gli attriti del sistema di tranciatura siano i più bassi possibili.

L'apparato SHB a trazione diretta in generale non permette di eseguire test di trazione-compressione mediante la sola rottura a monte dell'elemento sacrificale a causa: dell'instabilità elastica che si verifica quando si comprime una barra lunga e sottile e per i limiti del sistema di rottura vero e proprio.

Nel nostro caso avendo deciso di utilizzare una rottura a taglio questa può essere fatta sia trazionando che comprimendo; inoltre l'inconveniente del buckling è stato superato, entro certi limiti di carico, inserendo un elevato numero di supporti sulla parte pretensionata al fine di ridurre ad un valore accettabile la lunghezza del tratto di barra che risulterebbe interessato dall'instabilità.

I test eseguiti, tutti senza campione, pre-comprimendo a circa 2,5 tonnellate hanno permesso di ottenere buoni risultati.

Sebbene il livello di precompressione raggiunto non sia molto elevato, il risultato ottenuto è abbastanza soddisfacente; altri test, a livelli di carico maggiori, dovranno essere fatti prestando attenzione a che il fenomeno del buckling non si inneschi.

Qualora aumentando il carico di pretensionamento ci si accorgesse che i supporti non sono più in grado di impedire il fenomeno, è stato comunque previsto un sistema di rottura a valle della pretensionata, funzionante con le stesse modalità di quello a monte [28].

Riguardo i test condotti sul materiale in esame, l'input bar è stata pretrazionata in modo da generare un'onda di compressione (Figura 4.44) in seguito alla rottura dell'anello sacrificale [28].

(c) Compression test: Pre-stressed in tension, upstream release

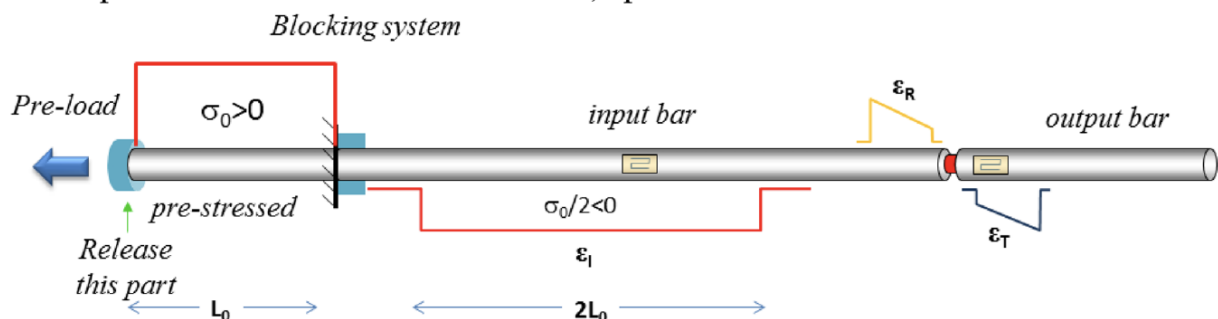


Fig. 4.44: Schematizzazione del funzionamento della Hopkinson Bar a trazione diretta.

Essendo i test eseguiti sul materiale in esame dei test di compressione non è stato necessario utilizzare dei particolari afferraggi per bloccare il provino.



Infatti come si può osservare nella figura successiva il campione testato ha forma cilindrica ed è stato collocato tra le due barre (Input e Output Bar) e tenuto in posizione da un leggero carico di compressione applicato da quest'ultime.



*Fig. 4.45: Provino posizionato tra le due barre (Input e Output Bar).*

#### 4.3.2 Comportamento meccanico ad elevato Strain-Rate

I carichi impulsivi, come impatti o esplosioni, che inducono alte velocità di deformazione nei materiali, sono eventi che raramente possono avvenire durante la vita utile delle strutture. Tipico esempio di sollecitazioni impulsive sono le collisioni tra veicoli, navi o aeromobili con ponti, banchine, edifici o sovrastrutture, esplosioni nelle vicinanze o all'interno delle strutture [32].

In tali situazioni a queste strutture sono applicati carichi dinamici, ovvero ad alto strain rate. Tipicamente si spazia da velocità di deformazione dell'ordine di  $\sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  per i terremoti a strain-rate di  $\sim 10^2 \text{ s}^{-1}$  che si realizzano per forti esplosioni (Figura 4.46).

Quindi, diventa sempre più necessario che gli effetti della velocità di deformazione nella risposta meccanica dei materiali siano considerati per prevedere in modo realistico la risposta strutturale.

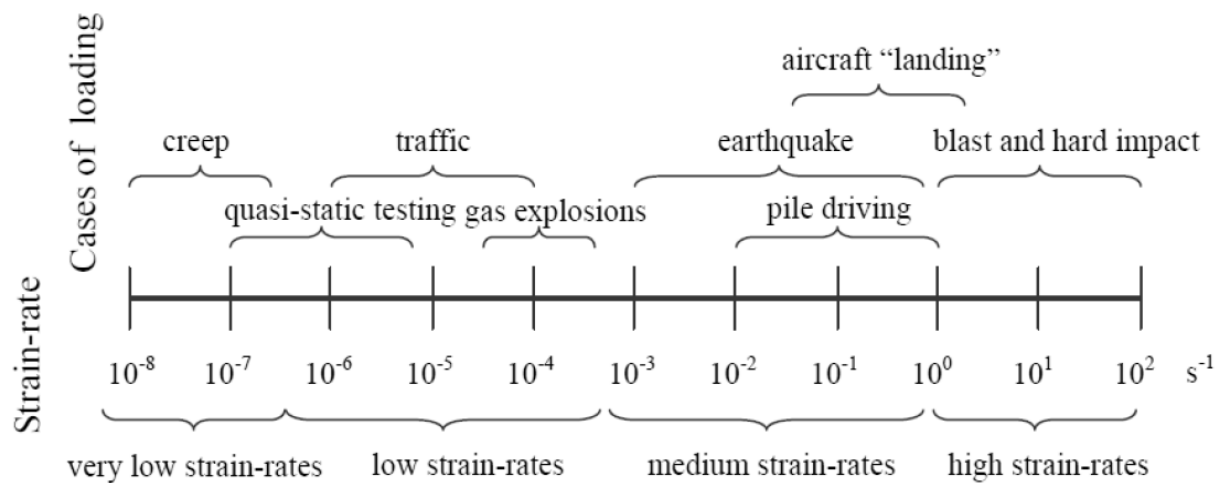


Fig. 4.46: Strain rate relativo alle differenti relazioni di carico.

Nel processo progettuale occorre conoscere le caratteristiche dei materiali ed il loro conseguente comportamento meccanico ad un range di deformazione ampio.

In generale, le onde di tensione che si propagano all'interno della struttura modificano la risposta meccanica dei materiali ad elevati strain-rate innescando un cambiamento della microstruttura che differisce così da quella che si avrebbe con velocità di deformazione quasi-statiche tali da causare una variazione del legame costitutivo tensione-deformazione.

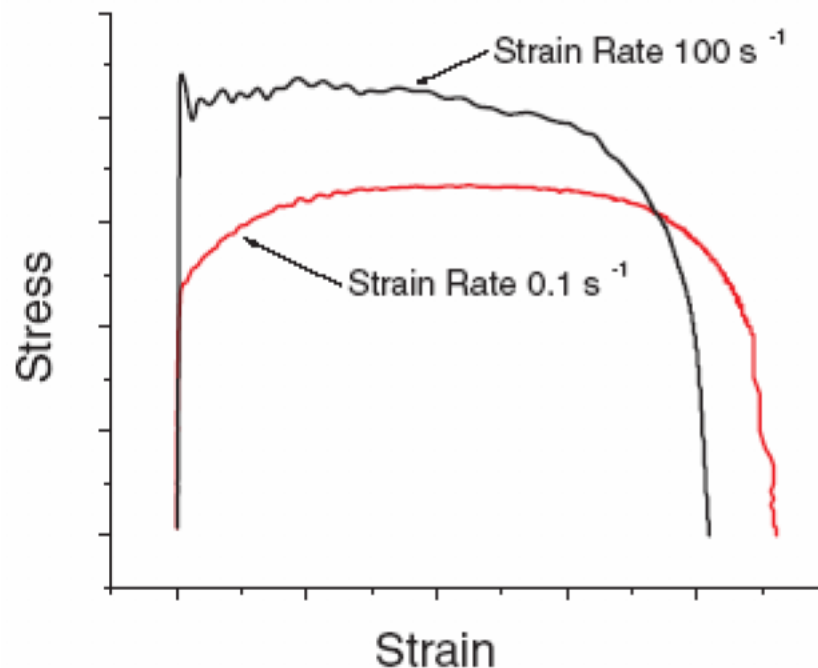
Le proprietà dei metalli mostrano una sensibilità alla velocità di deformazione da cui risultano positivamente influenzate al crescere della stessa.

La causa più importante è rappresentato dalle dislocazioni, piccolissime imperfezioni geometriche, che però hanno un grande peso nella determinazione delle proprietà meccaniche finali del metallo, e dalla densità e dimensione dei grani.

Un'importante caratteristica di queste imperfezioni è la relativa libertà di movimento all'interno del materiale che determina a scala macroscopica una maggiore o minore rigidità del metallo.

Gli effetti positivi che si risentono sulla risposta meccanica dei metalli sottoposti ad elevate velocità di deformazione sono principalmente (Figura 4.47):

- un incremento della tensione di snervamento (Yield stress);
- un incremento della tensione di rottura (Ultimate stress);
- un incremento della deformazione in condizioni di rottura (Ultimate strain);
- un incremento della deformazione uniforme;
- un incremento della duttilità del materiale.



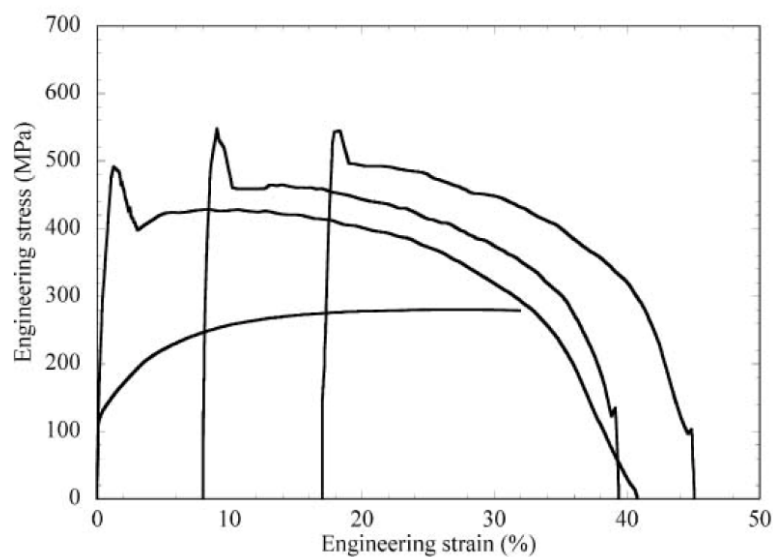
*Fig. 4.47: Evoluzione del legame costitutivo dell'acciaio in funzione dello strain-rate.*

Rimane invece inalterata la rigidità elastica del materiale che non risente della sensibilità alla velocità di deformazione: questa indifferenza può essere soprattutto imputata al fatto che il comportamento elastico del metallo è da attribuire alla densità di dislocazioni e grani presenti, che sono indipendenti dallo strain-rate.

La velocità di deformazione, invece, influenza solo il prolungamento della fase elastica, dovuto ad una maggiore apertura delle dislocazioni presenti, e per quanto riguarda il ramo plastico, il ritardo dello sviluppo di nuovi difetti all'interno del metallo, riduce l'allungamento a rottura. Inoltre, non possono essere trascurati due ulteriori importanti fenomeni che condizionano la risposta meccanica dei provini metallici ad elevati strain-rate:

- L'effetto Joule, consiste nel fatto che durante i test, se la velocità di deformazione è sensibilmente elevata, dell'ordine di  $10^2 \div 3s^{-1}$ , il provino subisce una trasformazione non isoterma a causa della trasformazione dell'energia meccanica in flussi di calore. Per questo motivo, il legame costitutivo presenta due distinti valori di snervamento che si susseguono dopo la caduta di tensione provocata dal decadimento delle caratteristiche meccaniche, mostrate in Figura 4.48.

Ciò è dovuto al fatto che all'interno del campione, la grande quantità di energia sviluppata, provoca un innalzamento della temperatura che porta al peggioramento delle caratteristiche meccaniche ed in alcuni casi al "rammollimento" del materiale. Quindi, nel caso in cui non fossimo interessati alla reale risposta del materiale con annessi gli effetti provocati dal riscaldamento del provino, ma lo studio fosse orientato alla conoscenza dei meccanismi alla base della risposta meccanica del metallo dovremmo operare una correzione dei risultati sperimentali rendendo il modello teorico indipendente dalla temperatura.



*Fig. 4.48: Variazione della tensione di snervamento per effetto Joule.*

- L'altro aspetto da non trascurare per la corretta interpretazione della sensibilità allo strain-rate è l'evoluzione del processo deformativo ed il fenomeno della strizione che, pur presentandosi in modo relativamente diffuso nel provino, presenta diverse velocità di assottigliamento con un massimo nella parte centrale.

Questi due aspetti fanno sì che il diagramma delle effettive tensioni nel provino sia sensibilmente diverso rispetto a quello senza correzioni restituito dalle prove.

Infatti, se come risultato dei test si ottengono curve decrescenti dopo il picco di snervamento, apportando le dovute correzioni alla reale superficie resistente durante tutto il processo, il legame costitutivo riacquista la forma tipica incoercibile con ramo plastico crescente.

I fattori che influenzano il comportamento dei materiali metallici ad alta velocità di deformazione e che, quindi, determinano risposte meccaniche diverse a seconda del metallo considerato sono molteplici e possono essere individuati facendo riferimento ai differenti cicli di produzione a cui sono sottoposti [28].

Oltre al sistema della Barra di Hopkinson mostrato nel Paragrafo 5.4.1, ci sono altri sistemi idonei per valutare le proprietà dinamiche dei materiali nei diversi intervalli di strain rates.

Nella Tabella 4.1 sono riportate le principali strumentazioni e i relativi intervalli di applicabilità.

*Tabella 4.1: Dispositivi per i diversi livelli di strain rates.*

Strain-rate	Intervallo di strain-rate [s <sup>-1</sup> ]	Criticità	Tecnica sperimentale
Basso	$10^{-7} \div 10^{-4}$	- allineamento del sistema - rigidità della macchina	macchina universale
Medio	$10^{-4} \div 100$	- inerzia - effetti delle vibrazioni	macchina idro-pneumatica
Alto	$> 100$	- propagazione delle onde	<i>Hopkinson bar</i>

#### 4.4 Prove di durezza

##### 4.4.1 La durezza

In generale si definisce durezza la resistenza di un materiale alla deformazione localizzata, sia essa provocata mediante indentazione, graffio, taglio o flessione

Nei metalli, nei materiali ceramici e nei polimeri si considera la deformazione plastica, mentre per gli elastomeri (e qualche polimero), la durezza assume il significato di resistenza alla deformazione elastica.

Il fatto che per la durezza non esista una definizione univoca (come invece accade per altre proprietà meccaniche) lascia supporre che essa non rappresenti una caratteristica fondamentale del materiale.

Piuttosto si potrebbe affermare che la durezza rappresenta una sorta di effetto combinato originato da resistenza di snervamento, di rottura, incrudimento, modulo di Young, ecc.

Le misure di durezza sono ampiamente utilizzate nel processo di controllo di qualità dei materiali perché semplici e rapide da eseguire.



Si considerano non distruttive (o semi-distruttive) quando vengono effettuate in regioni caratterizzate da bassi regimi di sforzo.

La durezza di un materiale è generalmente definita come resistenza che esso oppone alla penetrazione di un altro corpo (di durezza maggiore e di definita geometria) al quale è applicato lentamente un determinato carico nella direzione perpendicolare alla superficie da esaminare

È una condizione necessaria affinché il componente metallico possenga le caratteristiche di progetto, ma non sufficiente.

Infatti se la durezza non è corretta il componente non sarà certamente idoneo, ma in caso contrario non è certo che le altre caratteristiche siano conformi a quanto desiderato.

La durezza influenza la resistenza all'usura, all' incisione, al taglio e talvolta anche alla corrosione.

- Nei materiali metallici la durezza può essere interpretata dunque come la resistenza alla deformazione plastica permanente (a sua volta correlabile empiricamente al carico di rottura)
- Mentre nei materiali lapidei (concetto mineralogico) la durezza esprime la resistenza della superficie alla scalfittura (scala Mohs)

In sostanza, la durezza esprime la resistenza all'indentatura permanente della superficie

I vantaggi della prova di durezza risiedono nella sua facilità e rapidità, nella sua economicità visti anche i bassi costi delle apparecchiature usate e infine nel fatto di non essere una prova distruttiva (che quindi può essere ripetuta in più punti del provino).

#### 4.4.2 Test di durezza

Le prove di macro e microdurezza prevedono l'applicazione di un determinato carico "F" perpendicolare alla superficie, per un determinato periodo di tempo.

Ciò provoca lo snervamento localizzato del materiale e la comparsa di un'impronta con geometria specifica a seconda della forma dell'indentatore e del materiale con cui è realizzato. È consuetudine effettuare più indentazioni a distanze consone sul campione, per ottenere un valore medio che sia affidabile.

Dalle impronte, a seconda della norma utilizzata e tramite l'ausilio di un microscopio ottico, si ricavano determinati parametri geometrici che vengono utilizzati in formule matematiche per ricavare i valori effettivi di durezza.



La durezza di un materiale è indicata con il carattere "H", con un pedice o una seconda lettera variabile a seconda del tipo di test di durezza adoperato.

Ad esempio, i valori di durezza Vickers si indicano con "HV".

L'unità di misura della durezza non è il MPa, ma convenzionalmente vengono usate altre unità di misura come ad esempio, per la Vickers e la Brinell si usa  $kg/mm^2$ .

Spesso si cerca una connessione tra i dati ottenuti e lo snervamento del materiale, ma non c'è alcuna correlazione matematica; i valori di durezza sono comunque sempre maggiori rispetto allo snervamento (di circa tre volte nel caso degli acciai) perché il materiale reagisce all'indentazione offrendo come resistenza la porzione di volume attorno al punto di contatto che non si deforma.

Esistono diverse prove di durezza, sia macro che micro a seconda del carico applicato [3].

Tra le diverse tipologie, le più note sono la Brinell e la Rockwell (Figura 4.8), mentre tra le seconde la Vickers e la Knoop.

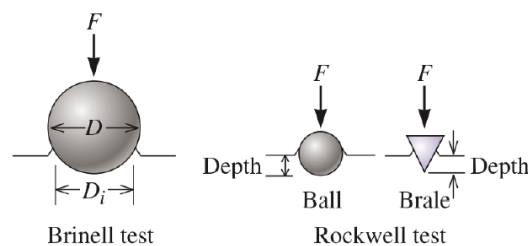


Fig. 4.49: Geometrie degli indentatori Brinell e Rockwell.

In questo lavoro di tesi sono state effettuati test di microdurezza Vickers, tutte sul piano xz dei provini cilindrici descritti nel Paragrafo 4.2.

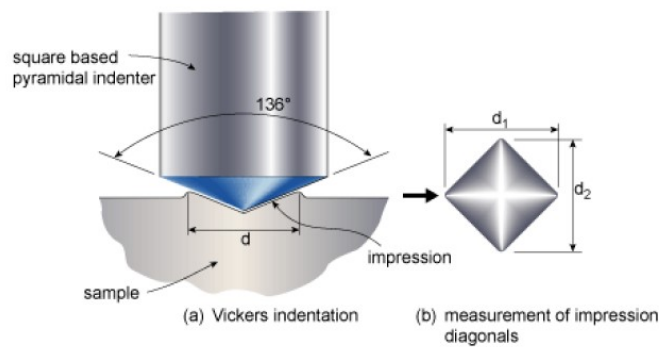
#### 4.4.3 Prova Vickers

La prova di durezza Vickers, definita dalla norma UNI EN 6507, si esegue applicando sul provino un carico mediante un opportuno penetratore a forma piramidale e misurando la superficie di impronta.

La durezza Vickers è proporzionale al rapporto tra il carico di prova e la superficie dell'impronta (F in Newton, S in  $mm^2$ ).

$$HV = \frac{F}{S} = 0,102 \left( \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \right) = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (5.36)$$

Il penetratore ha forma piramidale retta a base quadrata ed è realizzato in diamante.



**Fig. 4.50:** Schematizzazione di un indentatore Vickers e della sua impronta.

L'errore massimo ammesso nella realizzazione della punta è di soli 2 micron.

Il metodo Vickers estende e perfeziona la prova Brinell in quanto ha un campo di applicazione illimitato sia per la durezza che per lo spessore del pezzo da provare senza la necessità di cambiare il penetratore, con la sola modifica del carico di prova.

- La prova deve essere eseguita su una superficie liscia, libera da ossidazione ed esente da alterazioni dovute, ad esempio, a riscaldamento o incrudimento.
- La finitura della superficie deve essere tale da permettere un'accurata misurazione delle diagonali dell'impronta.
- I carichi possono variare da 1.9 a 980.7 N
- Il penetratore viene premuto sul materiale con un carico  $F$  gradualmente crescente, in un tempo variabile tra 2 e 10 s e mantenuto per 10-15 s.
- Una volta rimosso il carico, si visualizza su un apposito schermo l'impronta (che ha forma quadrata) e si misurano le lunghezze delle due diagonali, la cui media aritmetica viene impiegata per il calcolo della superficie  $S$  dell'impronta.

È stata misurata la durezza del campione cilindrico usando un tester di microdurezza Vickers AFM sviluppato dalla NIMS usando Carico di 500g per un tempo di sosta di 10 s.

Il valore di durezza finale è stato calcolato calcolando la media dei dati da cinque rientri.

## 5 Analisi Microstrutturale

L'analisi microstrutturale è stata eseguita sulle due tipologie di provini, flat e cilindrici, testati staticamente a trazione per poter interpretare meglio i risultati ottenuti.

Infatti nei due campioni è stata osservata una diversa risposta del materiale per quanto riguarda i valori di tensione e deformazione.

A tal proposito l'analisi metallografica fornisce informazioni aggiuntive che possono spiegare il comportamento meccanico di ogni campione testato giustificando le differenze individuate.

### 5.1 Preparazione provini (Preparazione metallografica)

Prima di eseguire l'indagine al microscopio è necessario preparare il provino attraverso una serie di step così da poter andare a visualizzare nel migliore dei modi la superficie d'interesse dello stesso.

Gli step seguiti sono analizzati nel dettaglio successivamente.

#### 5.1.1 Taglio dei provini

La prima operazione eseguita per preparare i provini all'analisi metallografica è stata quella di tagliare gli stessi così da ottenere le superfici da analizzare.

Quindi i campioni sono stati tagliati mediante l'utilizzo di un'abrasive cutter presente nel laboratorio di additive manufacturing della Wayne State University.

Entrambe le tipologie di provini, flat e cilindrici, sono stati tagliati sia longitudinalmente (piano ZX) che trasversalmente (piano XY) come mostrato ad esempio in Figura 5.1, così da analizzare la struttura microscopica da due differenti punti di vista.



*Fig. 5.1: Provino Flat tagliato trasversalmente (piano XY).*

### 5.1.2 Hot Mounting Machine

Una volta tagliati opportunamente i provini, sono stati inglobati attraverso l'utilizzo di una Hot Mounting Machine (Figura 5.2).

Tale macchina permette infatti di incorporare il campione all'interno di una resina termoplastica grazie ad un innalzamento di temperatura e pressione.



*Fig. 5.2: Hot Mounting Machine.*

Innanzitutto è necessario predisporre il provino in modo che le superfici da analizzare sia rivolte nella stessa direzione e a tal proposito sono stati utilizzati dei supporti in modo da mantenere in posizione fissa i campioni durante l'operazione come mostrato nella figura successiva.



*Fig. 5.3: Posizionamento dei provini.*

Dopodiché il pistone della macchina sul quale sono stati collocati i samples viene fatto scendere all'interno di una camera dove viene inerita la resina termoplastica che andrà a riempire i vuoti (Figura 5.4).

A questo punto è possibile chiudere il sistema mediante l'apposito coperchio e attivare la macchina favorendo un innalzamento di temperatura e di pressione.



*Fig. 5.4: Inserimento della resina termoplastica nella camera di reazione.*

Ciò consente alla resina di fondere e di compattarsi attorno ai campioni da inglobare.

Nel processo eseguito il sistema è stato portato ad una temperatura di 120°C e una pressione compresa tra 7-8 ksi e mantenuto in queste condizioni per un intervallo di tempo di 15 minuti al termine del quale il tutto è stato lasciato raffreddare così da favorire la solidificazione del materiale termoplastico.

Infine l'ultima operazione vede l'estrazione dei provini inglobati che si presentano come mostrato nella figura successiva.



Fig. a)

Fig. b)

*Fig. 5.5: Provini inglobati nella resina termoplastica. Fig. a) sezione longitudinale dei provini cilindrico (a sinistra) e flat (a destra). Fig. b) sezione trasversale dei provini flat (in alto) e cilindrico (in basso).*

Tale procedimento permette quindi di incorporare i campioni in questi cilindri plastici che favoriscono un miglioramento del contrasto durante l'analisi al microscopio.

Inoltre in queste condizioni i provini risultano essere caratterizzati da una migliore presa che favorisce e semplifica la successiva fase di lappatura.

### 5.1.3 Lappatura provini

Il terzo step che consente di preparare i provini all'analisi metallografica riguarda la lucidatura delle sezioni dei provini attraverso l'utilizzo di una macchina lucidatrice (Polishing Machine).

I campioni precedentemente inglobati sono quindi stati sottoposti a lucidatura come mostrato in Figura 5.6.





*Fig. 5.6: Lucidatura dei provini.*

Per tale processo è stata utilizzata della carta abrasiva di diversa grana (320, 400, 600, 1200, 2400), in modo tale da poter passare dalla più grossolana (180) alla più fine (2400).

Successivamente, i provini sono stati lucidati a specchio utilizzando del tessuto di alcantara sul quale è stata spalmata della pasta diamantata fino a  $1\mu\text{m}$ .

La lucidatura permette di preparare il provino per un'analisi metallografica ottimale.

#### 5.1.4 Soluzione acida (Attacco Acido)

Infine, l'ultima operazione eseguita prima di sottoporre i campioni ad un'analisi al microscopio è stata quella di sottoporli ad un attacco chimico mediante l'utilizzo di una speciale soluzione acida adatta alle superleghe base nichel.

Essa è stata preparata dosando all'interno di un becher i tre reagenti: 10ml di acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ), 15ml di acido cloridrico ( $\text{HCl}$ ) e 10ml di acido acetico ( $\text{CH}_3\text{-COOH}$ ).

Dopodiché i provini è stato inseriti all'interno del contenitore e immersi nella soluzione (Figura 5.7) per un tempo compreso tra i 30 e i 60 secondi.





*Fig. 5.7: Provino sottoposto ad attacco chimico.*

Una volta terminato l'attacco chimico i campioni sono stati immersi in acqua per lavarli e poi asciugati con della carta.

## 5.2 Microscopio ottico

Per le analisi microscopiche si è adoperato il microscopio Olympus K23008949 (Figura 5.8)

Esso è stato usato per ottenere le micrografie ad ingrandimenti di 50x, 100x, 200x, 500x.

Le micrografie sono state ottenute per poter analizzare la microstruttura dei campioni depositati nelle due differenti geometrie flat e cilindrici in modo da poter spiegare la differenza di risultati di sforzo-deformazione ottenuti nei test di trazione.

Una maggiore attenzione, quindi, è stata rivolta alle strutture dendritiche nelle due diverse tipologie di provini analizzandone la dimensione, la densità e l'orientazione.



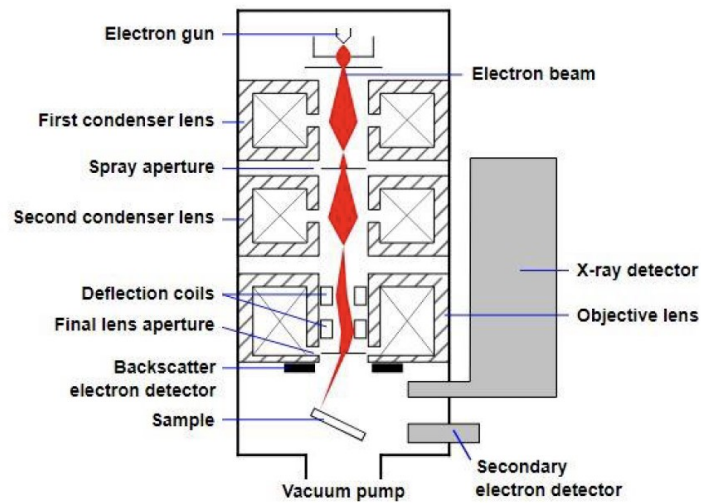
*Fig. 5.8: Microscopio ottico Olympus K23008949.*

### 5.3 Microscopia Elettrica a scansione SEM

I microscopi elettronici a scansione, di cui uno schema semplificato è mostrato in Figura 5.9, sono degli strumenti di analisi che utilizzano un fascio elettronico generato comunemente per effetto termoionico da un filamento di tungsteno o da monocristalli di esaboruro di lantanio (LaB6) o di cesio (CeB6).

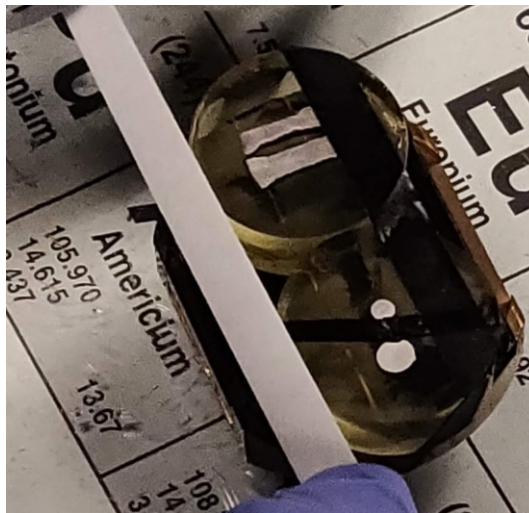
Il fascio elettronico è accelerato (da un voltaggio variabile tra 0,3 kV a 30 kV) in una colonna messa in alto vuoto ( $<10^{-3}$ Pa) e collimato e fatto scansionare sul campione con un complesso sistema di condensatori e lenti elettromagnetiche.

La risoluzione fornita da questi dispositivi è strettamente legata al diametro del fascio elettronico, che è dell'ordine dei nanometri ( $<1\text{nm} - 10\text{ nm}$ ) [3].



*Fig. 5.9: Visione schematica di un microscopio elettronico a scansione.*

Per quel che riguarda la preparazione dei campioni da analizzare, essi devono essere conduttivi e messa a terra (Figura 5.10), affinché non si verifichi accumulo di carica schermante per il segnale elettronico.



*Fig. 5.10: Preparazione dei provini per l'analisi SEM.*

Gli elettroni accelerati vengono proiettati sul campione dove interagiscono con le nubi elettroniche degli atomi superficiali e cedono la loro energia in seguito agli urti o venendo assorbiti.

Ciò avviene in uno spessore del materiale variabile da qualche nanometro fino a 5  $\mu\text{m}$ .

Da queste interazioni, si generano un certo numero di segnali (principalmente altri elettroni e raggi X), ognuno dei quali è registrato da altrettanti sensori.

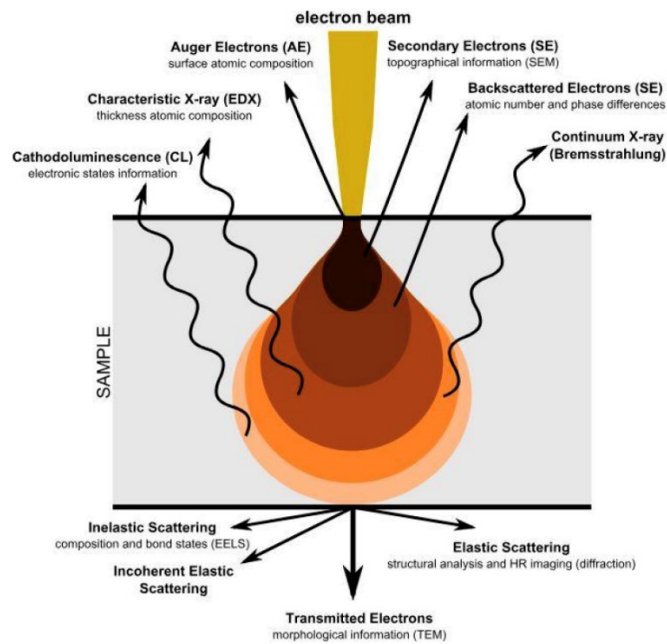
Questi segnali derivano da regioni del materiale più o meno profonde in funzione della loro energia e della composizione chimica del campione (in particolare del numero atomico).



In Figura 5.11 è illustrata una tipica regione di interazione detta “a pera”, e i segnali rilevabili.

Tra questi se ne distinguono quattro principali:

- **Auger:** sono elettroni con bassa energia compresa tra i 50eV e i 1000eV, derivanti dai primi strati atomici più superficiali: 1nm – 5nm. L’analisi spettroscopica superficiale associata è chiamata AES, Auger Electron Spectroscopy e serve a dare una valutazione qualitativa delle specie chimiche presenti;
- **Elettroni Secondari (SE):** elettroni a bassa energia (0eV – 50eV) che forniscono un segnale di migliore risoluzione dagli strati atomici compresi tra i 5nm e i 50nm. Ciò permette all’analista di studiare con dettaglio la topografia del campione con forte effetto tridimensionale;
- **Elettroni retrodiffusi:** detti anche elettroni back-scattered (BSE), sono elettroni che urtano elasticamente il campione ed hanno capacità di penetrazione (centinaia di nanometri) ed energia maggiori (20keV – 30keV). Dato l’elevato volume di interazione, le informazioni topologiche e morfologiche sono di scarsa qualità, mentre le informazioni qualitative sulle fasi presenti (in funzione del numero atomico “Z” degli elementi) sono attendibili;
- **Raggi X:** sono segnali caratteristici di ogni atomo, di energia compresa tra 0.1keV a 20keV, che provengono da sezioni del materiale maggiore (dell’ordine dei micron). Essi vengono rilevati dall’ EDS (detto anche EDX), un rivelatore tradizionalmente a base Si:Li o più innovativo SDD (Silicon Drift Detector). Il suo compito è quello di fornire sia informazioni quantitative che qualitative delle fasi presenti nel campione [3].



*Fig. 5.11: Segnali emessi da differenti parti del volume di interazione.*

In questo lavoro di tesi si è adoperato un FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) JEOL JSM-7600F presente all'interno dei laboratori della Wayne State University per valutare dimensioni e morfologia delle strutture dendritiche e dei precipitati.



*Fig. 5.12: FESEM JEOL JSM 7600F.*



## 6 Risultati prove sperimentali

In questo capitolo saranno mostrati i risultati delle prove sperimentali condotte.

Riepilogando brevemente, sono stati eseguiti test statici e dinamici sulla superlega di nichel Inconel 625 (IN625) prodotta mediante il sistema di produzione additiva Laser Metal Deposition (LMD) della Wayne State University.

Nel dettaglio sono state eseguite prove statiche di trazione/compressione e prove dinamiche di compressione.

Le geometrie dei provini impiegati per le diverse prove sono state presentate nel Paragrafo 4. Inoltre per spiegare meglio i risultati delle prove di trazione, svolte su provini con due differenti geometrie, sono state condotte delle analisi metallografiche i cui risultati verranno esposti successivamente.

Infine sono state eseguite delle prove di durezza per valutare la microdurezza del materiale Inconel 625 prodotto mediante Laser Metal Deposition confrontando il valore ottenuto con la tensione di snervamento dello stesso.

### 6.1 Prove di trazione statiche

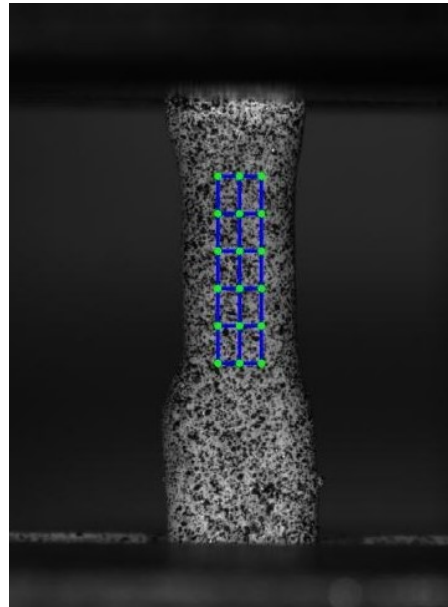
#### 6.1.1 Risultati provini flat

Le prime prove di trazione sono state eseguite sulla geometria flat e i risultati del primo test realizzato sul Provino #1 sono mostrati nelle seguenti figure.

Innanzitutto nella figura successiva è possibile osservare il provino ancora indeformato sul quale è stata posizionata la griglia per l'analisi DIC.

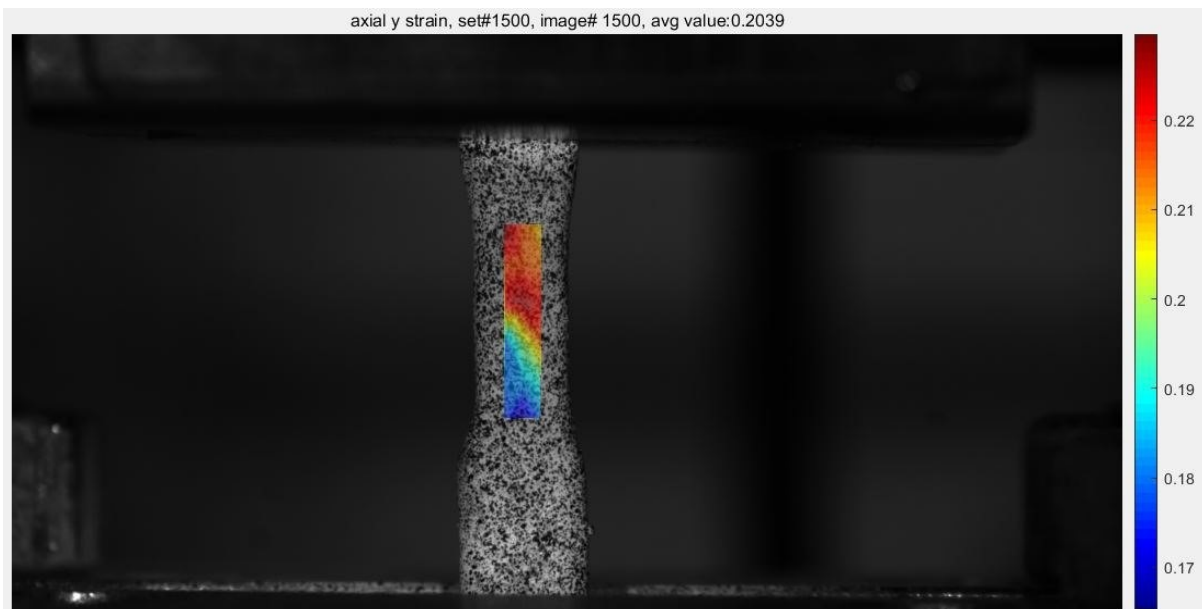
Per evitare che la griglia uscisse fuori dai bordi del campione durante l'analisi, non permettendo di portare a termine lo studio, è stata posizionata al centro del campione mantenendo un'adeguata distanza dai bordi del provino come mostrato nell'immagine successiva.



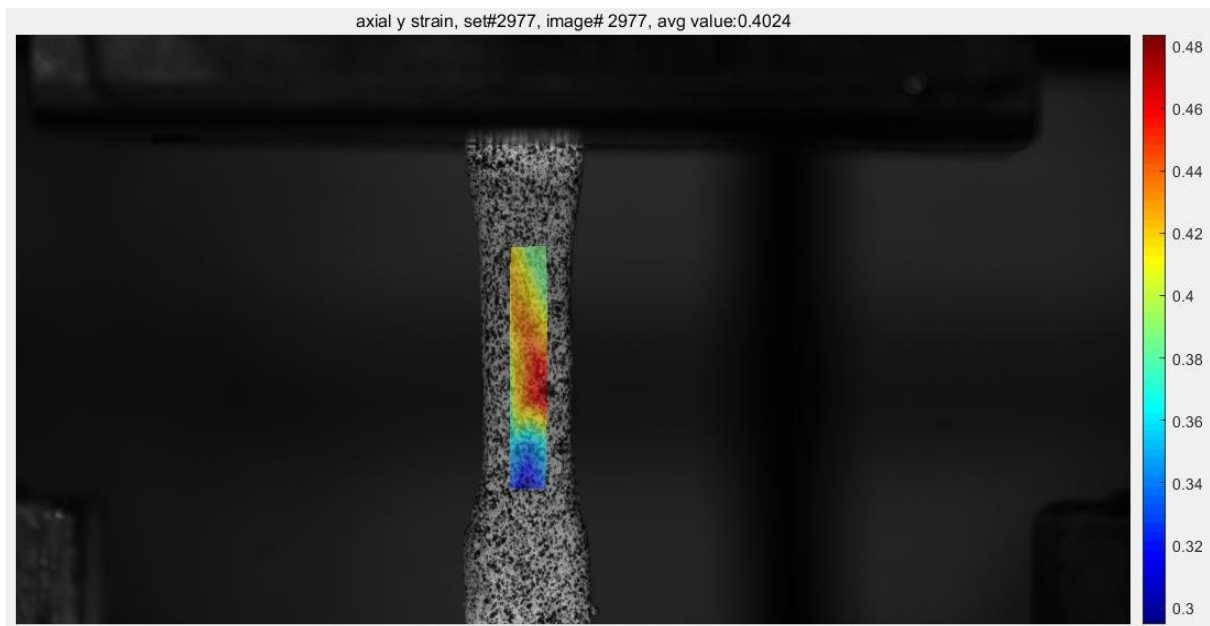


*Fig. 6.1: Posizionamento griglia nel tratto utile (Provino flat #1).*

Quindi è stata avviata l'analisi delle deformazioni ed è possibile osservare come inizialmente la deformazione risulti essere omogenea su un'ampia zona del tratto utile (Figura 6.2) per poi localizzarsi in prossimità di una fascia in cui si manifesterà la rottura del provino (Figura 6.3).



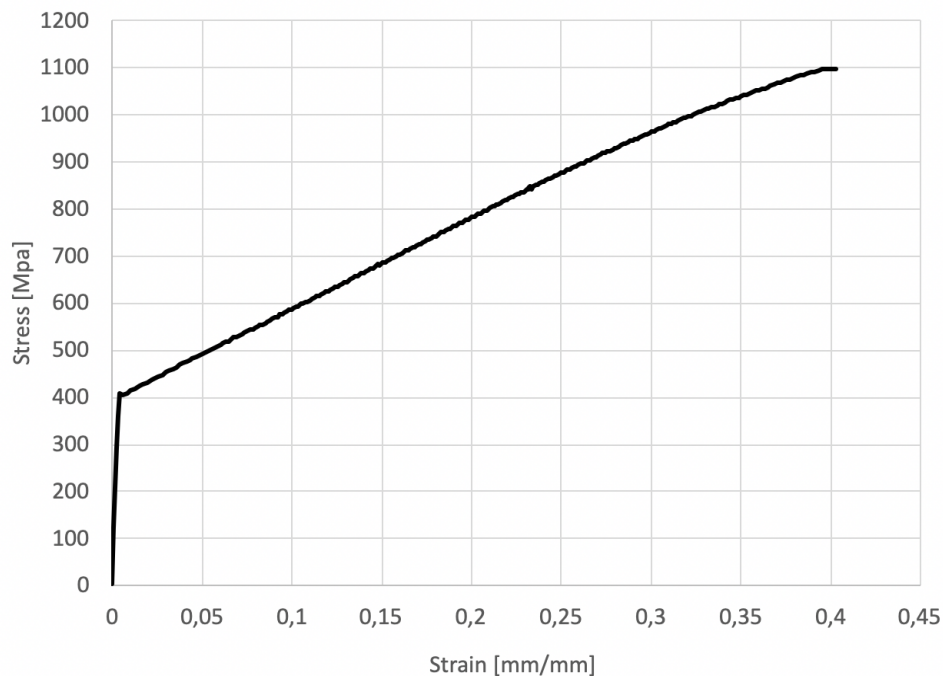
*Fig. 6.2: Provino flat; mappa delle deformazioni a metà test.*



*Fig. 6.3: Provino flat; mappa delle deformazioni a fine test.*

La figura 6.3 mostra la mappa di deformazione nell'ultimo set elaborato dalla DIC, immediatamente prima della rottura.

È possibile osservare un valore di deformazione media del 40%, con un massimo nella zona di strizione pari circa al 48%.



*Fig. 6.4: Stress-Strain\_Test#1\_Provino#1*

Il grafico tensione deformazione è stato realizzato prendendo dalla DIC i valori di deformazione i quali sono stati associati ai valori di carico e quindi di tensione forniti dalla macchina.

Poiché la DIC restituisce i valori di deformazione vera, la tensione ingegneristica è stata anch'essa riportata in tensione vera.

Analizzando, quindi, il grafico tensione-deformazione vera mostrato in Figura 6.4, è possibile notare ad un valore di  $\varepsilon = 0,20\%$  un cambio di pendenza, dovuto allo snervamento della superlega Inconel 625.

Il valore di deformazione massimo raggiunto e mostrato nel grafico è pari  $\varepsilon = 40\%$  e il valore massimo di tensione che ha portato a rottura il campione è pari a 1100 Mpa.

Nell'immagine successiva è mostrato il provino rotto nel quale è possibile osservare la linea di frattura caratterizzata da un'inclinazione a  $45^\circ$ .



*Fig. 6.5: Provino #1 rotto.*

Su questa tipologia di provini sono stati condotti un totale di 6 test all'interno di uno strain rate compreso tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ .

Tutti i test hanno mostrato una buona ripetibilità e i risultati sono riassunti nella Tabella 6.1.

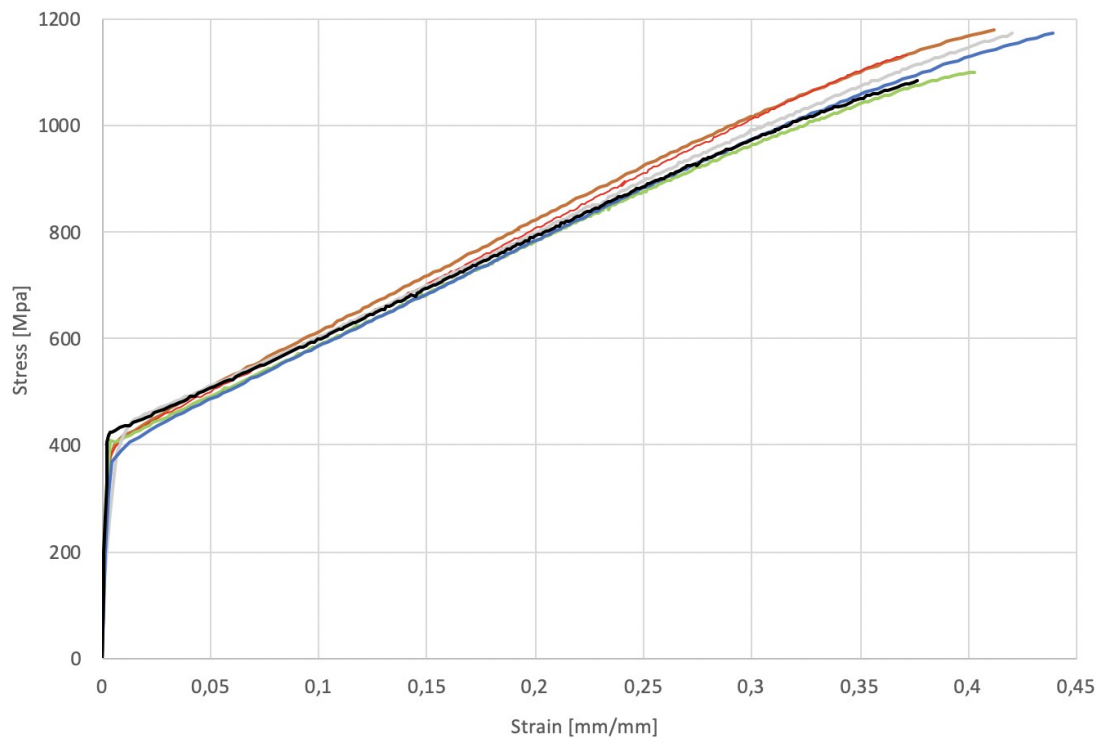
*Tabella 6.1: Risultati delle prove sui Provini flat.*

		Test #1	Test #2	Test #3	Test #4	Test #5	Test #6
Strain % [mm/mm]	AVG	42	38	42	48	48	40
	MAX	48	48	55	65	67	62
	$\sigma_{\max}$ [Mpa]	1173	1131	1098	1173	1174	1084

Analizzando i risultati di questi test:

- $\epsilon_{\max}$  (AVG) =  $43\% \pm 5$
- $\epsilon_{\max}$  (MAX) =  $43\% \pm 5$
- $\sigma_{\max}$  =  $1140 \pm 44$  MPa
- $E$  =  $145 \pm 10$  GPa
- $\sigma_y$  =  $390 \pm 15$  MPa

Nelle Figura 6.6 sono riportate le curve di tutti i test dove è possibile osservare i vari andamenti, i quali presentano una ottima ripetibilità.



*Fig. 6.6: Stress-Strain, prove eseguite su 6 campioni.*

#### 6.1.2 Risultati provini cilindrici

Le prove di trazione sono state eseguite, successivamente, sui provini cilindrici e i risultati del primo test realizzato sul Provino #1 sono mostrati nelle seguenti figure.

Innanzitutto nella figura successiva è possibile osservare il provino ancora indeformato sul quale è stata posizionata la griglia per l'analisi DIC.

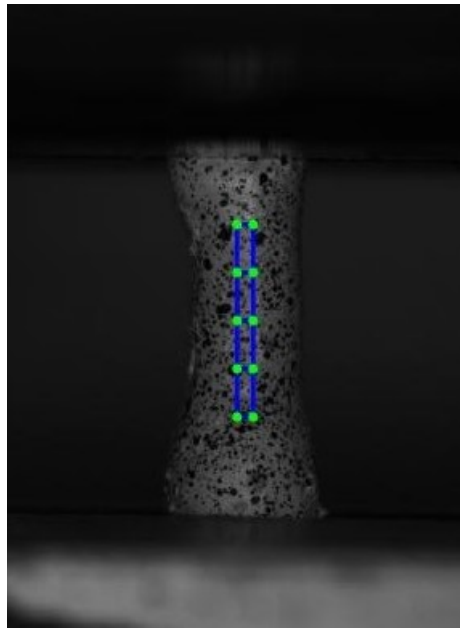
Per evitare che la griglia uscisse fuori dai bordi del campione durante l'analisi, non permettendo di portare a termine lo studio, è stata posizionata al centro del campione mantenendo un'adeguata distanza dai bordi del provino come mostrato nell'immagine successiva.

Inoltre, a differenza della geometria flat, la griglia è assai sottile e tale scelta è dovuta al fatto che il provino in questione è cilindrico e quindi utilizzando una griglia troppo larga si eseguirebbe un'analisi DIC scorretta.

Infatti nel caso di provini cilindrici, a differenza dei provini piatti, non si ha a disposizione un piano frontale sul quale collocare la griglia per l'analisi delle deformazioni poiché è come se ci fossero più piani uno dietro l'altro.

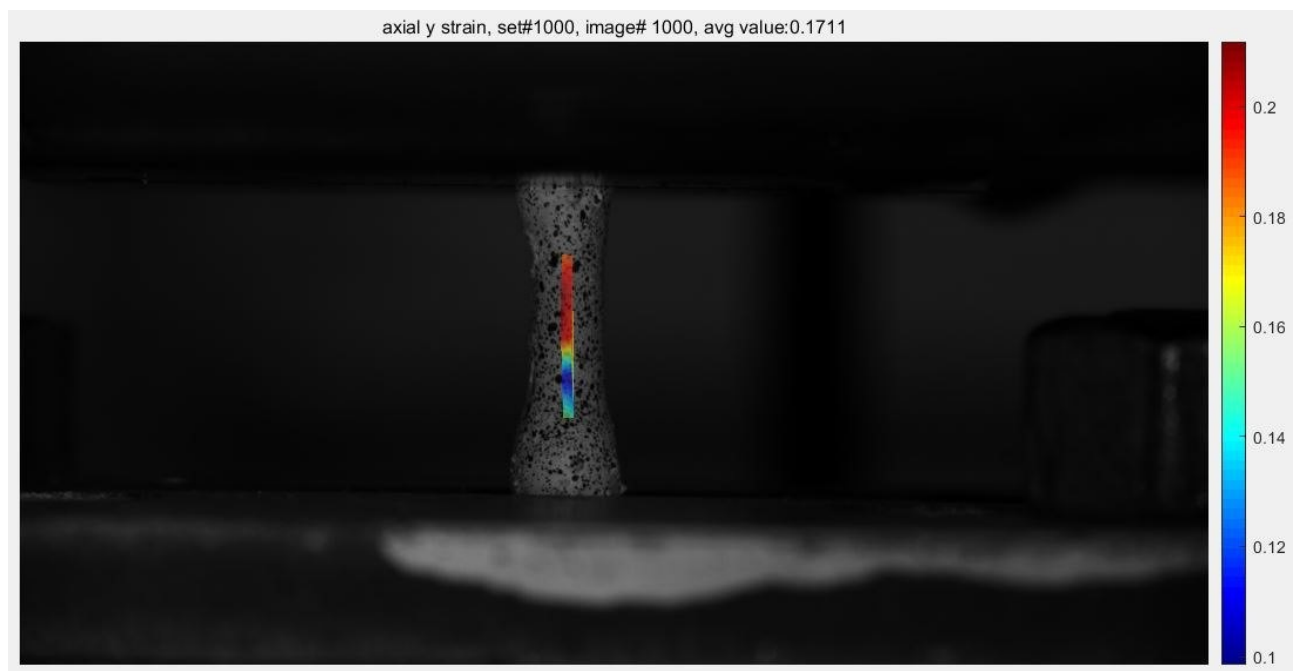
Questo aspetto oltre a causare problematiche di messa fuoco potrebbe portare ad ottenere valori di deformazioni affetti da un errore.

A tal proposito è stata utilizzata una griglia lunga quanto il tratto utile del provino e stretta così da cogliere la linea centrale del provino.

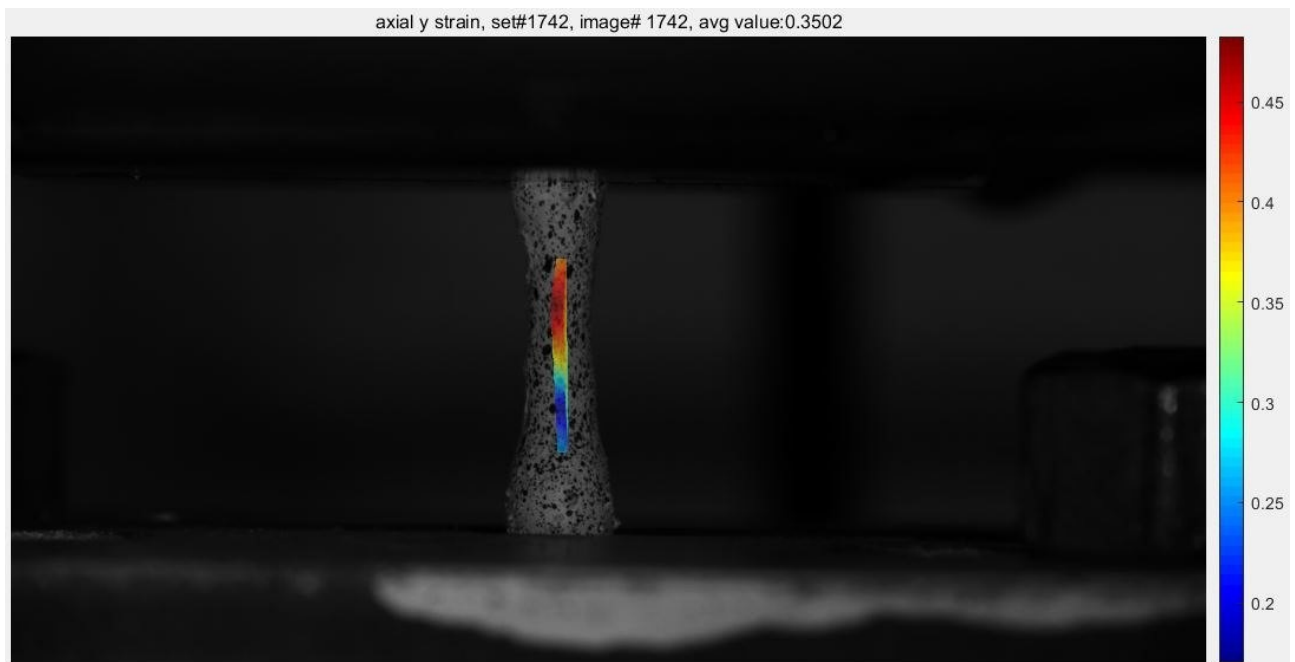


*Fig. 6.7: Posizionamento griglia nel tratto utile (Provino cilindrico #1).*

Quindi è stata avviata l'analisi delle deformazioni ed è possibile osservare come inizialmente la deformazione risulti essere omogenea sul una zona ampia del tratto utile (Figura 6.8) per poi localizzarsi in prossimità di una fascia in cui si manifesterà la rottura del provino (Figura 6.9).



*Fig. 6.8: Provino cilindrico; mappa delle deformazioni a metà test.*



*Fig. 6.9: Provino cilindrico; mappa delle deformazioni a fine test.*

La figura 6.9 mostra la mappa di deformazione nell'ultimo set elaborato dalla DIC, immediatamente prima della rottura.

È possibile osservare un valore di deformazione media del 37%, con un massimo nella zona di strizione pari circa al 45%.

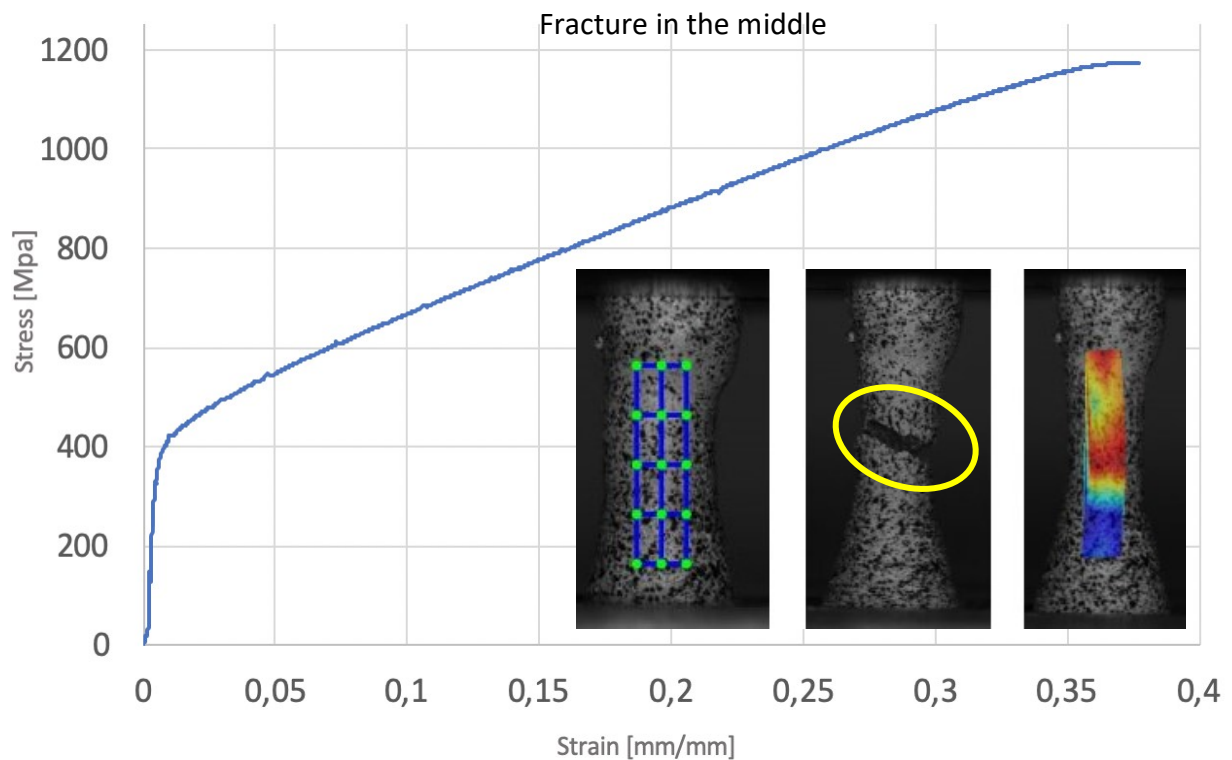
In realtà il comportamento meccanico dei provini cilindrici è diverso a seconda del provino testato, o meglio a seconda della zona in cui avviene la rottura.

Infatti è possibile distinguere i provini cilindrici testati a seconda della zona in cui si è manifestata la rottura:

- 1°) Fracture in the middle: provini dove la rottura si è manifestata nella zona centrale del tratto utile.
- 2°) Fracture in the transition zone: provini dove la rottura si è manifestata nella zona di transizione.

Analizzando il grafico Stress-Strain della prima tipologia possiamo osservare:





*Fig. 6.10: Stress-Strain\_Test#1\_Provino#1.*

Nella Figura precedente è possibile osservare come la rottura sia avvenuta nella zona centrale del campione testato fornendo un valore di deformazione media a rottura pari al 37%.

Il grafico tensione deformazione è stato realizzato prendendo dalla DIC i valori di deformazione i quali sono stati associati ai valori di carico e quindi di tensione forniti dalla macchina.

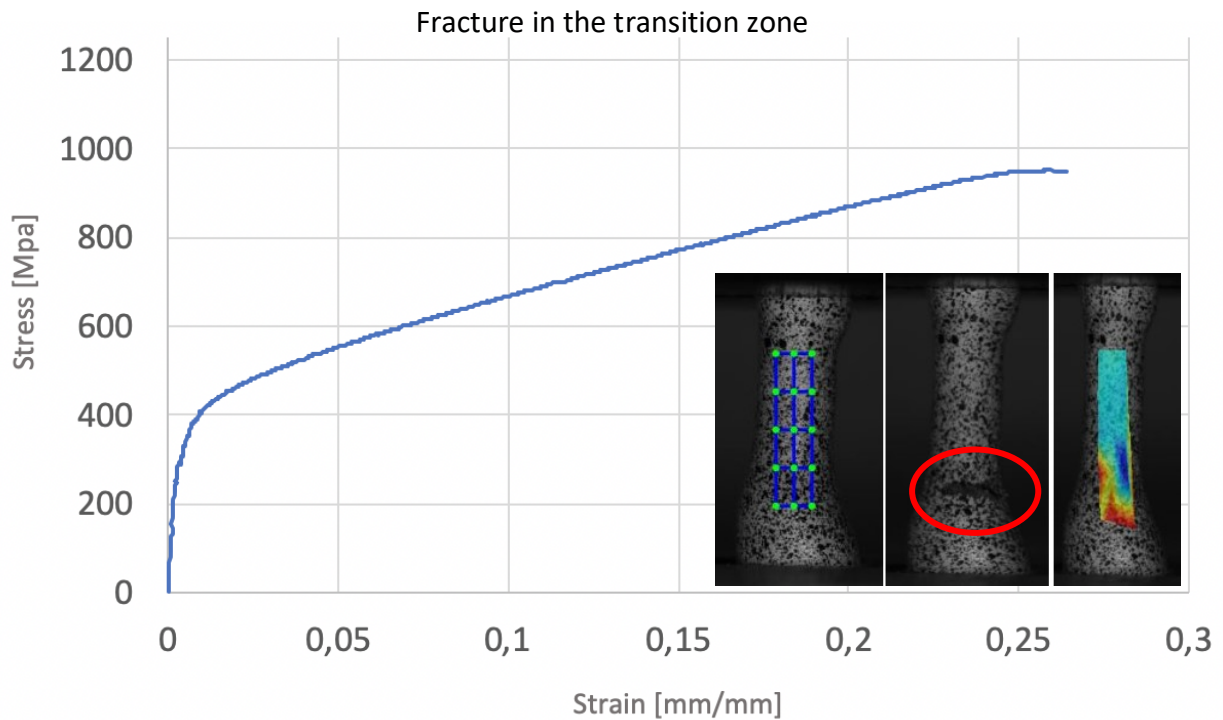
Poiché la DIC restituisce i valori di deformazione vera, la tensione ingegneristica è stata anch'essa riportata in tensione vera.

Analizzando, quindi, il grafico tensione-deformazione vera mostrato in Figura 6.10, è possibile notare ad un valore di  $\epsilon = 0,20\%$  un cambio di pendenza, dovuto allo snervamento della superlega Inconel 625.

Il valore massimo di tensione che ha portato a rottura il campione è pari a 1175Mpa.

Nell'immagine 7.10 è mostrato il provino rotto nel quale è possibile osservare la linea di frattura caratterizzata da un'inclinazione a 45°.

Quindi possiamo analizzare il grafico dei campioni che hanno riportato la rottura in corrispondenza della zona di transizione:



*Fig. 6.11: Stress-Strain\_Test#2\_Provino#2.*

Nella Figura precedente è possibile osservare come la rottura sia avvenuta nella zona di transizione del campione testato fornendo un valore di deformazione media a rottura pari al 27%.

Il grafico tensione deformazione è stato realizzato prendendo dalla DIC i valori di deformazione i quali sono stati associati ai valori di carico e quindi di tensione forniti dalla macchina.

Poiché la DIC restituisce i valori di deformazione vera, la tensione ingegneristica è stata anch'essa riportata in tensione vera.

Anche in questo caso nel grafico tensione-deformazione vera mostrato in Figura 6.11, è possibile notare ad un valore di  $\epsilon = 0,20\%$  un cambio di pendenza, dovuto allo snervamento della superlega Inconel 625.

Il valore massimo di tensione che ha portato a rottura il campione è pari a 950Mpa.

Nell'immagine 7.11 è mostrato il provino rotto nel quale è possibile osservare la linea di frattura.

Il manifestarsi della rottura nella zona di transizione non permette al provino di esprimere al meglio le sue caratteristiche in quanto risente dell'effetto di amplificazione delle tensioni.

Infatti la geometria del provino testato, come già spiegato nel paragrafo 4.2, non risulta essere una geometria perfetta per cui tale fenomeno è giustificato.

Su questa tipologia di provini sono stati condotti un totale di 7 test all'interno di uno strain rate compreso tra 10<sup>-4</sup> e 10<sup>-5</sup>.

I test nei quali la rottura è avvenuta al centro del tratto utile hanno mostrato una buona ripetibilità mentre i risultati dell'altra tipologia (Fracture in the middle) sono caratterizzati da un andamento simile delle tensioni manifestando la rottura a valori diversi da caso a caso.

Nella tabella successiva sono riassunti i risultati dei test eseguiti i quali sono stati divisi a seconda della tipologia di rottura.

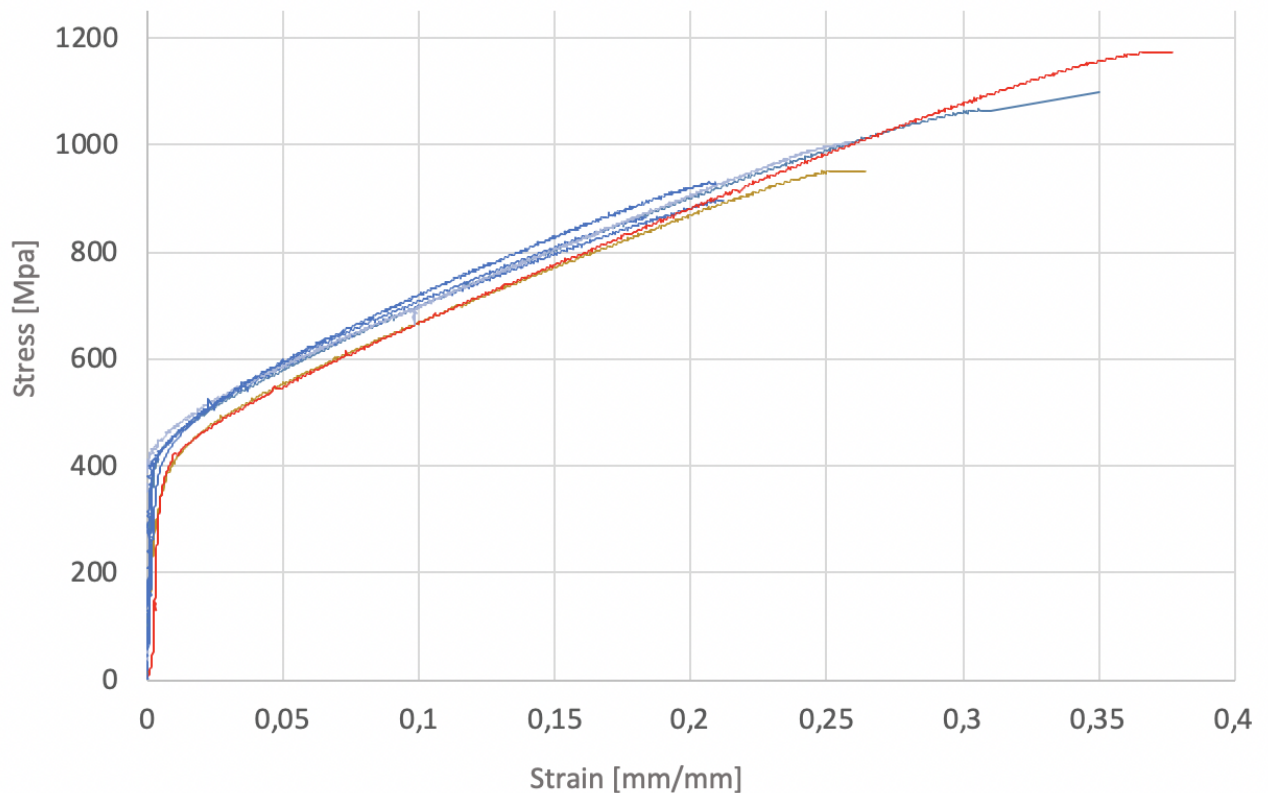
*Tabella 6.2: Risultati delle prove sui Provini Cilindrici.*

		Fracture in the central zone		Fracture in the transition zone				
		Test #1	Test #2	Test #3	Test #4	Test #5	Test #6	Test #7
Strain % [mm/mm]	AVG	36	35	18	21	26	25	21
	MAX	51	59	39	32	38	42	32
	$\sigma_{max}$ [Mpa]	1175	1100	863	897	950	1003	928

Analizzando i risultati dei test che hanno riportato una rottura del primo tipo:

- $\epsilon_{max}$  (AVG) = 35.5% ± 0.5
- $\epsilon_{max}$  (MAX) = 55% ± 4
- $\sigma_{MAX}$  = 1138 ± 37 MPa
- E = 145 ± 10 GPa
- $\sigma_y$  = 420 ± 10 MPa

Nelle Figura 6.12 sono riportate le curve di tutti i test dove è possibile osservare i vari andamenti dove è possibile osservare tutte le informazioni descritte precedentemente.



*Fig. 6.12: Stress-Strain, prove eseguite su 7 campioni.*

### 6.1.3 Risultati provini torniti

Dal momento che i risultati ottenuti sui provini cilindrici risultano essere diversi tra loro a causa dell'effetto di amplificazione delle tensioni, che in alcuni casi ha favorito la rottura dei campioni compromettendo le prove, sono stati eseguiti dei test sugli stessi provini cilindrici lavorati al tornio.

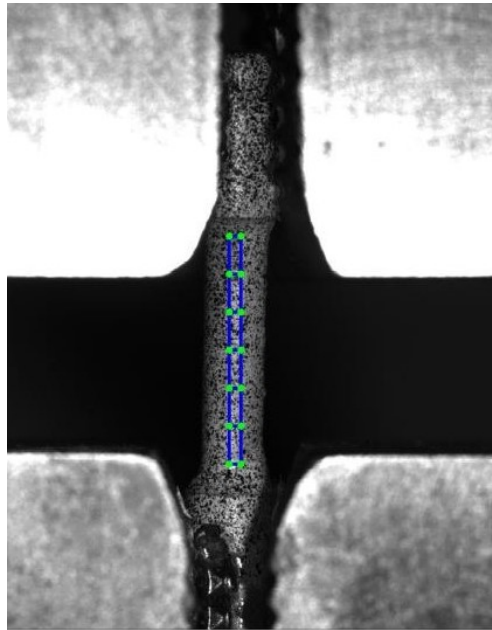
Infatti grazie alla tornitura è stato possibile conferire ai samples cilindrici una geometria tale da non risentire dell'effetto indesiderato precedentemente descritto.

Quindi le prove sono state eseguite sui provini torniti e i risultati del primo test realizzato sul Provino #1 sono mostrati nelle seguenti figure.

Innanzitutto nella figura successiva è possibile osservare il provino ancora indeformato sul quale è stata posizionata la griglia per l'analisi DIC.

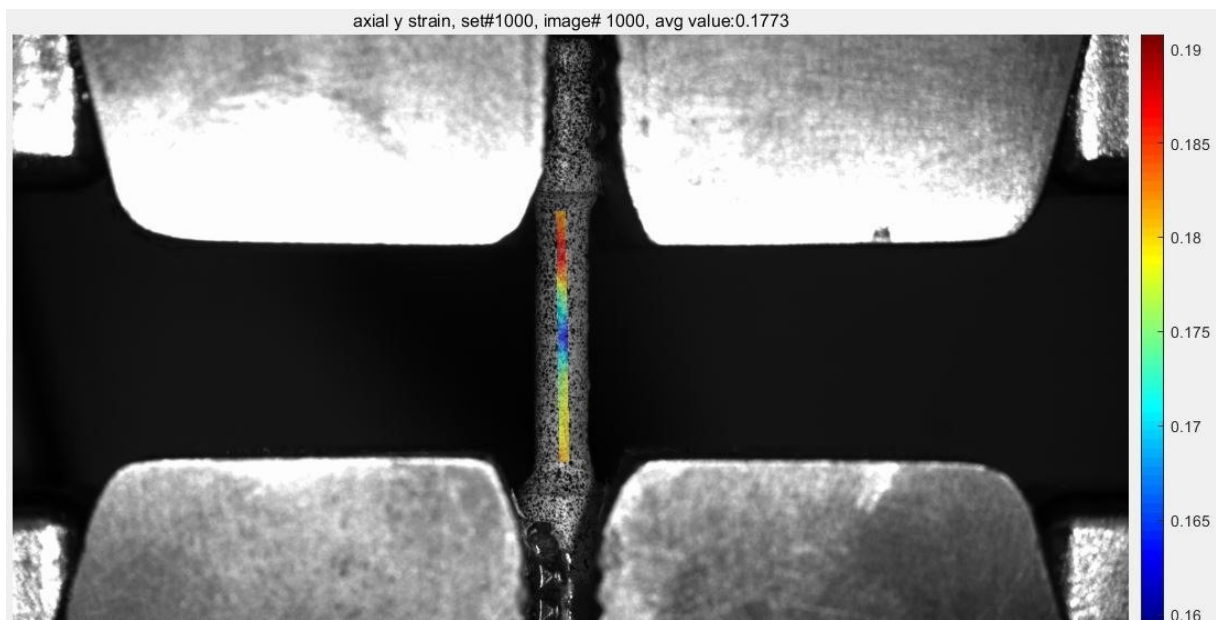
Anche in questo caso, dal momento che i provini sono cilindrici come nel caso precedente, la griglia è stata posizionata nella zona centrale del tratto utile cercando di minimizzare la sua larghezza in modo da evitare di condurre un'analisi affetta da errori di messa a fuoco.

A tal proposito è stata utilizzata una griglia lunga quanto il tratto utile del provino e stretta così da cogliere la linea centrale del provino.

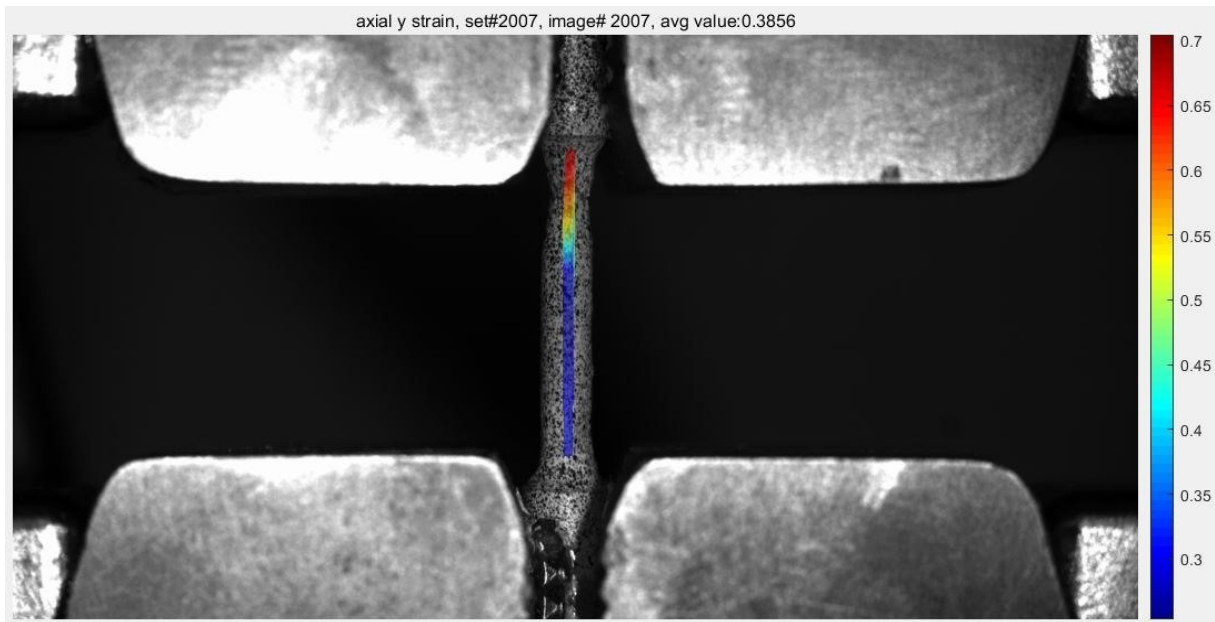


*Fig. 6.13: Posizionamento griglia nel tratto utile (Provino tornito #1).*

Quindi è stata avviata l'analisi delle deformazioni ed è possibile osservare come inizialmente la deformazione risulti essere omogenea sul una zona ampia del tratto utile (Figura 6.14 per poi localizzarsi in prossimità di una fascia in cui si manifesterà la rottura del provino (Figura 6.15).



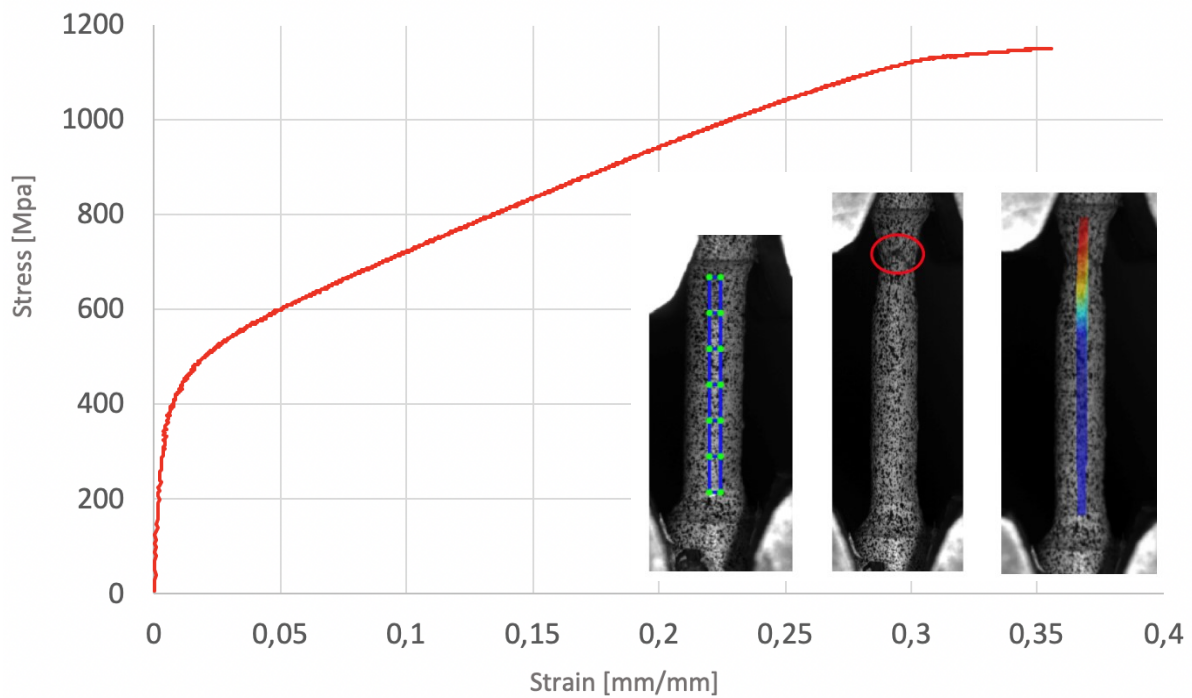
*Fig. 6.14: Provino tornito; mappa delle deformazioni a metà test.*



*Fig. 6.15: Provino tornito; mappa delle deformazioni a fine test.*

La figura 6.15 mostra la mappa di deformazione nell'ultimo set elaborato dalla DIC, immediatamente prima della rottura.

È possibile osservare un valore di deformazione media del 38%, con un massimo nella zona di strizione pari circa al 70%.



*Fig. 6.16: Stress-Strain\_Test#1\_Provino#1.*

Nella Figura precedente è possibile osservare come la rottura sia avvenuta nella zona centrale del campione testato fornendo un valore di deformazione media a rottura pari al 37%.



Il grafico tensione deformazione è stato realizzato prendendo dalla DIC i valori di deformazione i quali sono stati associati ai valori di carico e quindi di tensione forniti dalla macchina.

Poiché la DIC restituisce i valori di deformazione vera, la tensione ingegneristica è stata anch'essa riportata in tensione vera.

Analizzando, quindi, il grafico tensione-deformazione vera mostrato in Figura 6.16, è possibile notare ad un valore di  $\epsilon = 0,20\%$  un cambio di pendenza, dovuto allo snervamento della superlega Inconel 625.

Il valore massimo di tensione che ha portato a rottura il campione è pari a 1151Mpa.

Nell'immagine 7.16 è mostrato il provino rotto nel quale è possibile osservare la linea di frattura caratterizzata da un'inclinazione a  $45^\circ$ .

Come è possibile dal grafico i valori di deformazione e tensione registrati sono confrontabili con quelli ottenuti nei provini cilindri che hanno riportato la frattura nella zona centrale del tratto utile.

Questo conferma quindi che nei provini rotti in corrispondenza della zona di transizione i risultati sono affetti dall'errore dovuto all'amplificazione delle tensioni, il quale sui provini torniti è stato eliminato.

Su questa tipologia di provini sono stati condotti un totale di 2 test all'interno di uno strain rate compreso tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ , i quali hanno mostrato una buona ripetibilità e i cui risultati sono riassunti nella Tabella 6.3.

**Tabella 6.3:** Risultati delle prove sui Provini Cilindrici torniti.

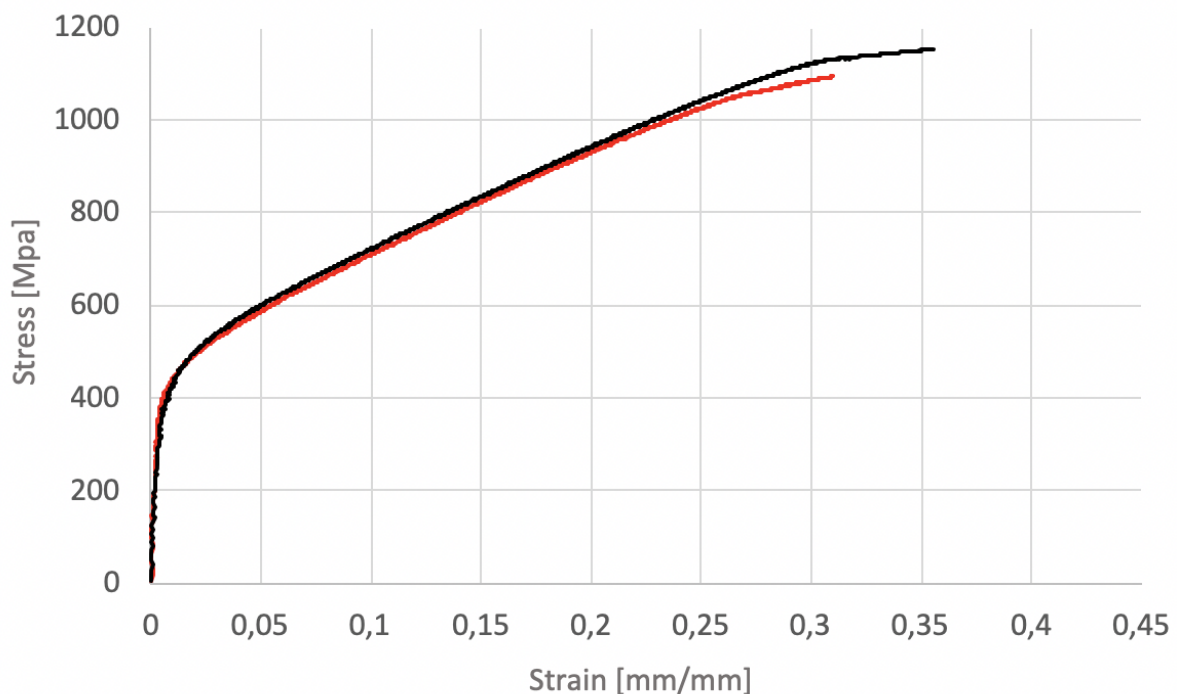
		Test #1	Test #2
Strain % [mm/mm]	AVG	36	31
	MAX	48	48
	$\sigma_{\max}$ [Mpa]	1173	1131



Analizzando i risultati di questi test:

- $\epsilon_{\max} (\text{AVG}) = 34\% \pm 3$
- $\epsilon_{\max} (\text{MAX}) = 48\%$
- $\sigma_{\text{MAX}} = 1152 \pm 21 \text{ MPa}$
- $E = 145 \pm 10 \text{ GPa}$
- $\sigma_y = 420 \pm 10 \text{ MPa}$

Nelle Figura 6.17 sono riportate le curve di tutti i test dove è possibile osservare i vari andamenti, i quali presentano una ottima ripetibilità.



*Fig. 6.17: Stress-Strain, prove eseguite su 2 campioni.*

## 6.2 Risultati analisi microstrutturale

Nei paragrafi precedenti sono stati mostrati e riassunti i risultati delle prove di trazione eseguite sulle 3 tipologie di campioni a differente geometria.

È possibile osservare che i risultati dei provini flat differiscono da quelli dei provini cilindrici seppur entrambi siano stati realizzati con la stessa tecnica di additive manufacturing.

Oltre a ciò sono stati utilizzati anche gli stessi parametri di processo per realizzare la deposizione.

Quindi l'unico motivo che può spiegare la differenza di comportamento nei due casi per quanto riguarda le principali caratteristiche della curva stress-strain ( $\epsilon_{\max}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_y$ ) è il differente metodo di stampaggio adottato.

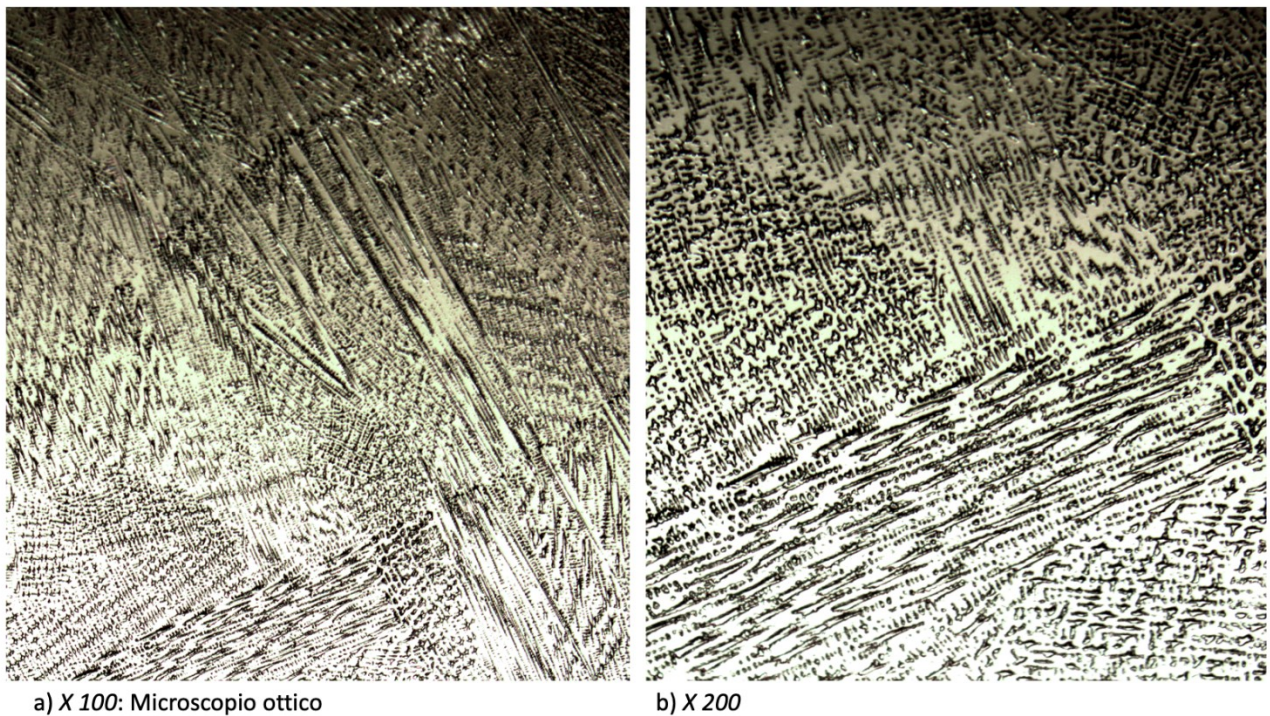
Infatti il percorso utensile seguito per realizzare i campioni è differente nelle due diverse geometrie come spiegato nel Capitolo 4. e questo provoca un diverso comportamento del materiale Inconel 625.

È possibile notare infatti che nel caso dei provini flat sono stati raggiunti valori di deformazione maggiori accompagnati da valori di tensione minori rispetto ai provini cilindrici.

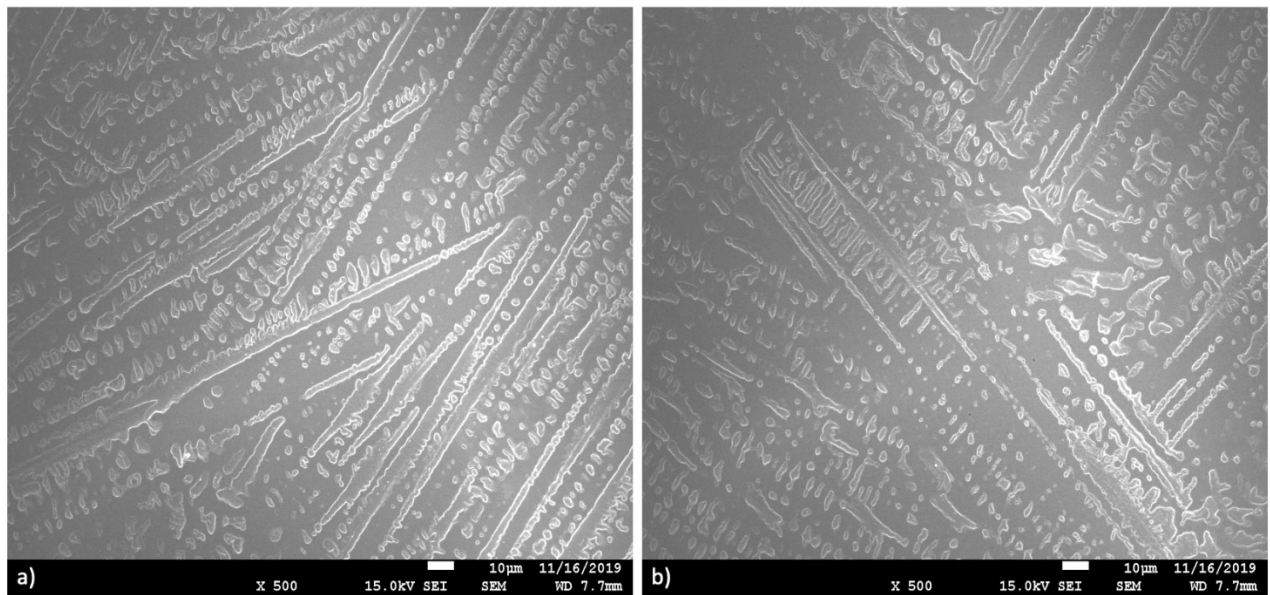
Inoltre come è possibile osservare nel Paragrafo 6.1.1 i valori del modulo di elasticità e della tensione di snervamento sono più bassi nel caso dei flat samples.

Per spiegare meglio questo aspetto e le disuguaglianze nelle proprietà individuate è stata condotta un'analisi metallografica con l'intento di andare a valutare la microstruttura nei due diversi provini.

Quindi partendo dalla geometria flat è stata analizzata al microscopio la sezione longitudinale realizzando un primo ingrandimento al microscopio ottico (Figura 6.18) per poi entrare nel dettaglio mediante una scansione SEM (Figura 6.19).



*Fig. 6.18: Microscopio ottico, sezione longitudinale provino flat.*



*Fig. 6.19: Microscopia SEM, sezione longitudinale provino flat.*

Nella Figura 6.18 è mostrata la sezione longitudinale del provino flat analizzato dove è possibile osservare i vari layer depositati.

In ciascuno di essi è possibile osservare un andamento preferenziale delle strutture dendritiche le quali risultano essere allungate nella direzione di crescita del provino e inclinate in maniera opposta tra un layer e il successivo.

Tale tendenza è dovuta al fatto che direzione di crescita epitassiale delle dendriti primarie è caratterizzata da un certo angolo rispetto al substrato del campione che è stato prodotto con una singola scansione del laser.

Quando la direzione di scansione laser cambia su ogni livello, l'angolo di crescita delle dendriti primarie cambiano in quanto il solido (substrato e deposito) funge da dissipatore di calore e la direzione di crescita delle dendriti è opposta alla risultante della direzione del flusso di calore.

Questo provoca la crescita dendritica colonnare mostrata in Figura 6.18.

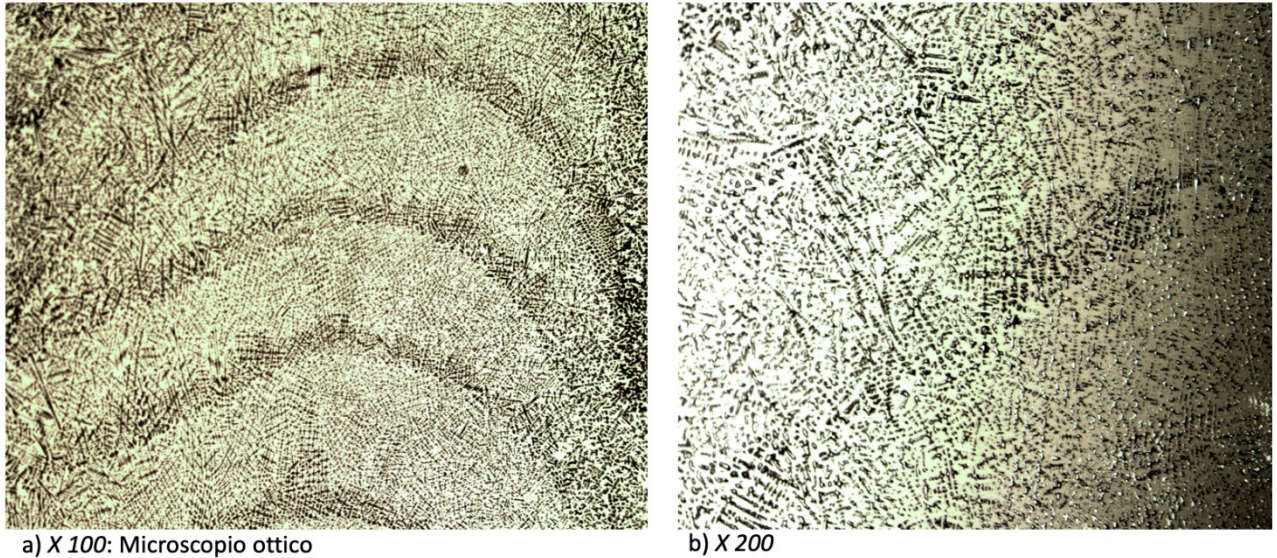
In Figura 6.19, grazie ad un maggiore ingrandimento al microscopio SEM, è possibile osservare nel dettaglio le singole dendriti le quali assumono una forma allungata, seppur con una certa inclinazione, nella direzione di crescita del provino.

Tale orientazione è la stessa lungo la quale i campioni sono stati testati a trazione e tale microstruttura giustifica una maggiore duttilità in tale direzione, associata a valori di tensione leggermente minori.

Inoltre tale microstruttura conferisce a tale tipologia di provino delle proprietà anisotrope.



Dopodiché sono stati analizzati al microscopio i provini cilindrici partendo dalla sezione longitudinale e realizzando un primo ingrandimento al microscopio ottico (Figura 6.20) per poi entrare nel dettaglio mediante una scansione SEM (Figura 6.21).



*Fig. 6.20: Microscopio ottico, sezione longitudinale provino cilindrico.*

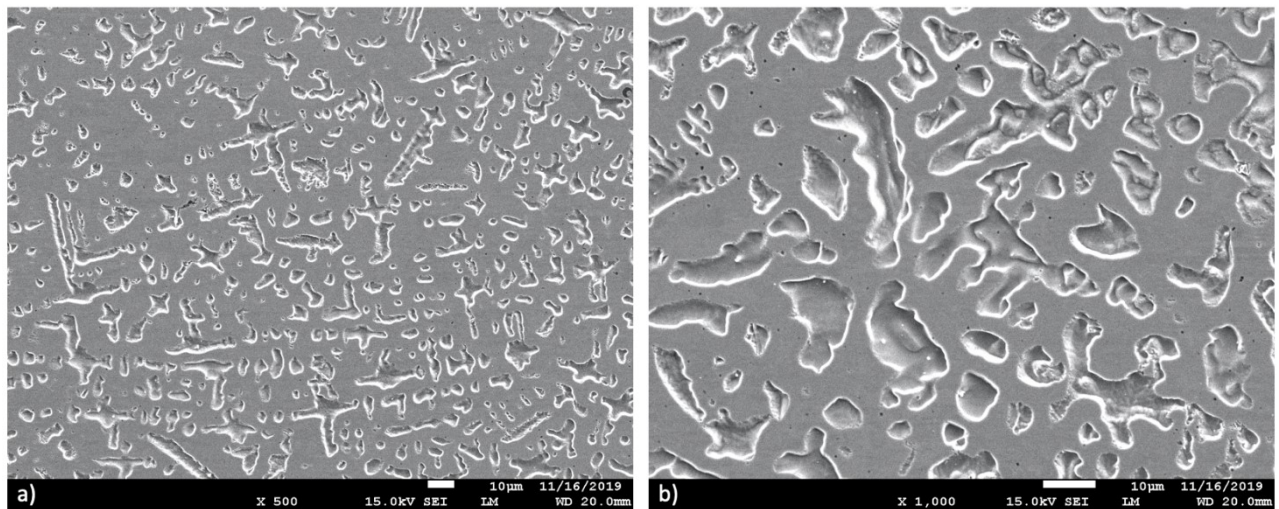
Nella Figura 6.20 è mostrata la sezione longitudinale del provino cilindrico analizzato dove è possibile osservare i vari layer depositati.

Infatti si può notare la presenza di zone curve più scure, le quali distinguono i vari strati depositati per la realizzazione del tratto utile del campione esaminato.

Tale curvatura è dovuta principalmente al metodo di stampaggio adottato per tale regione; infatti essa è stata ottenuta mediante sovrapposizione di getti di materiale fuso (drop), i quali vengono rilasciati nella zona centrale ed essendo dotati di un'elevata fluidità si espandono verso l'esterno colando verso il basso.

Inoltre nell'immagine b) di Figura 6.20 è possibile osservare come le strutture dendritiche di tale provino non risultino avere un andamento preferenziale.



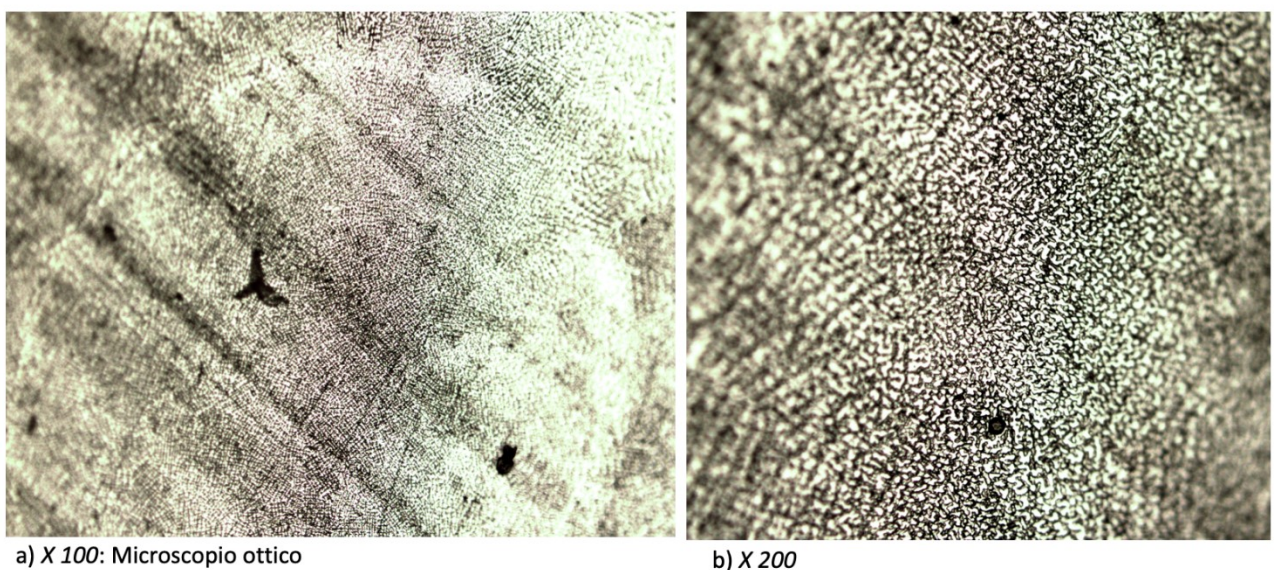


*Fig. 6.21: Microscopia SEM, sezione longitudinale provino cilindrico.*

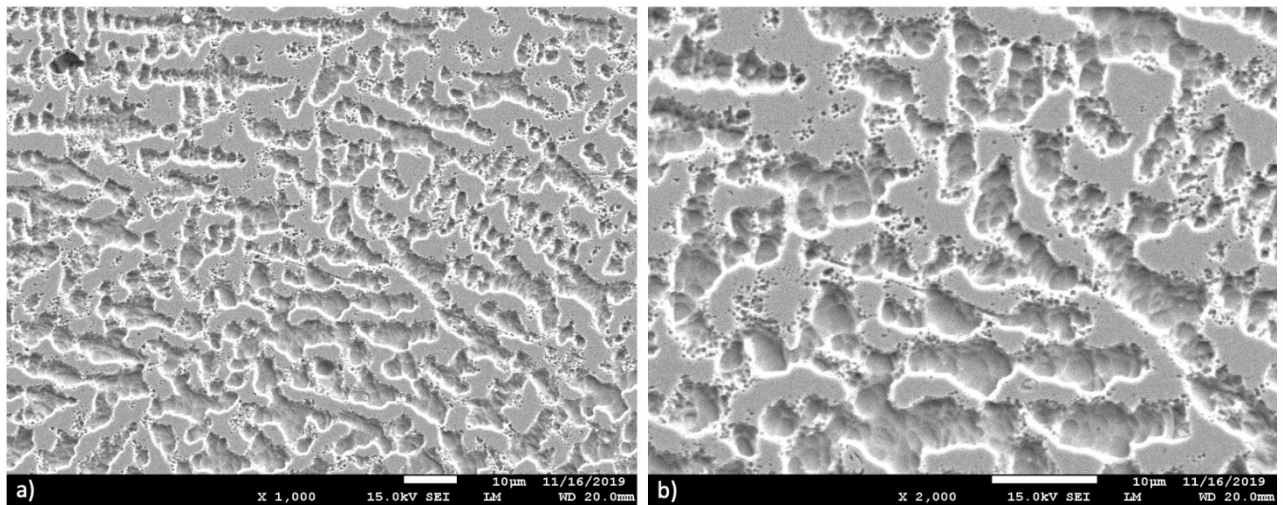
Attraverso un ingrandimento più spinto mediante scansione SEM (Figura 6.21) possiamo esaminare nel dettaglio la microstruttura di tale campione, il quale è caratterizzato da strutture dendritiche di dimensione molto più contenuta rispetto alla geometria flat.

La stessa analisi è stata condotta sulla sezione trasversale (Figura 6.22 – 6.23) del provino cilindrico con l'obiettivo di valutare da diversi punti di vista la microstruttura di tale campione. Nelle figure successive infatti è possibile osservare come esso sia caratterizzato da una microstruttura omogenea che si presenta uguale sia nella sezione longitudinale che trasversale.

Infatti la geometria e la grandezza delle dendriti è esattamente identica se valutata dalle due differenti viste.



*Fig. 6.22: Microscopio ottico, sezione trasversale provino cilindrico.*



*Fig. 6.23: Microscopia SEM, sezione trasversale provino cilindrico.*

Quindi la microstruttura osservata su questa tipologia di campioni risulta essere notevolmente differente da quella evidenziata nella geometria flat.

Infatti abbiamo delle strutture dendritiche di dimensione contenuta, orientate casualmente così da ridurre l'anisotropia e caratterizzate da una maggiore densità.

Le caratteristiche descritte precedentemente giustificano quindi il diverso comportamento dei provini cilindrici descritto nel Paragrafo 6.1.2-3, dove è stato osservato una maggiore rigidità poiché la tensione di snervamento e i valori di tensione misurati a parità di deformazione sono leggermente maggiori a scapito di un minore allungamento a rottura in quanto la massima deformazione valutata risulta più bassa rispetto ai flat sample.

I grani colonnari allungati nel provino flat sono paralleli allo sforzo di trazione applicato e perciò il numero di bordi di grano lungo questa direzione è minore; al contrario, invece, i provini cilindrici hanno un elevato numero di bordi di grano perpendicolari allo sforzo.

Per tale ragione il primo risulta essere più resistente ma meno duttile del secondo.

Inoltre è bene sottolineare come in tutte le immagini è possibile osservare la mancanza di vuoti confermando quindi l'assenza di porosità tipica del processo di produzione Laser Metal Deposition (LMD).



### 6.3 Prove di compressione

Le prove di compressione sono state eseguite per valutare il comportamento dell'Inconel 625 in un diverso stato tensionale così da confrontarlo con quello stabilito nelle prove di trazione. Inoltre tali prove hanno permesso di valutare le capacità del materiale rispetto allo strain rate confrontando i risultati ottenuti a velocità di deformazione basse (Prove statiche) e alte (Prove dinamiche).

#### 6.3.1 Prove di compressione statiche

Le prove di compressione statica sono state eseguite su dei campioni cilindrici descritti nel Paragrafo 4.4.4 i cui risultati ottenuti sono mostrati nelle figure successive.

Nel Capitolo 5.2 è stato mostrato il set up utilizzato per l'esecuzione di tali prove dove a differenza delle precedenti non si è fatto uso della Digital Image Correlation.

Infatti per la misura delle deformazioni è stato utilizzato un estensometro il quale ci ha fornito informazione relative allo spostamento che abbiamo quindi sfruttato per calcolare i valori di deformazione ingegneristici poi trasformati in veri.

Dopodiché grazie alla conoscenza dell'area iniziale del provino testato e dei valori di carico raggiunti e forniti dalla macchina, abbiamo calcolato i valori di tensione.

Nella figura successiva sono mostrati i risultati del primo test, i quali sono affetti dall'errore dovute a delle forze che limitano la deformazione del provino in direzione trasversale.

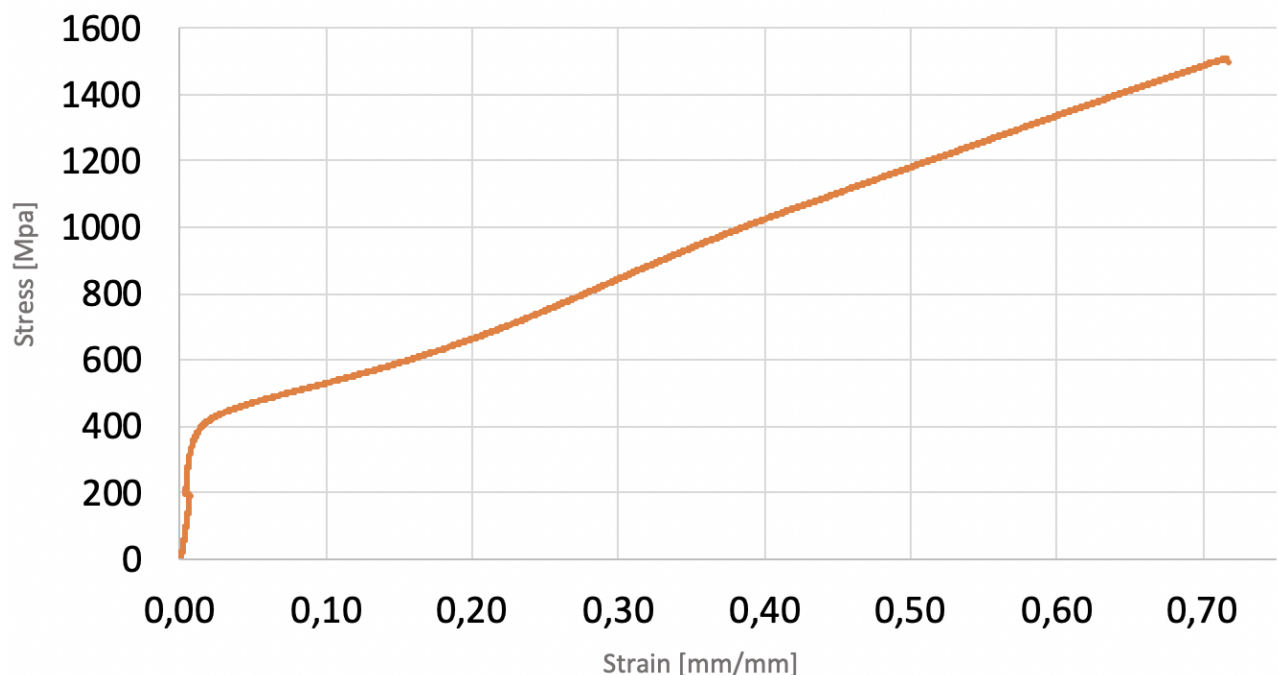
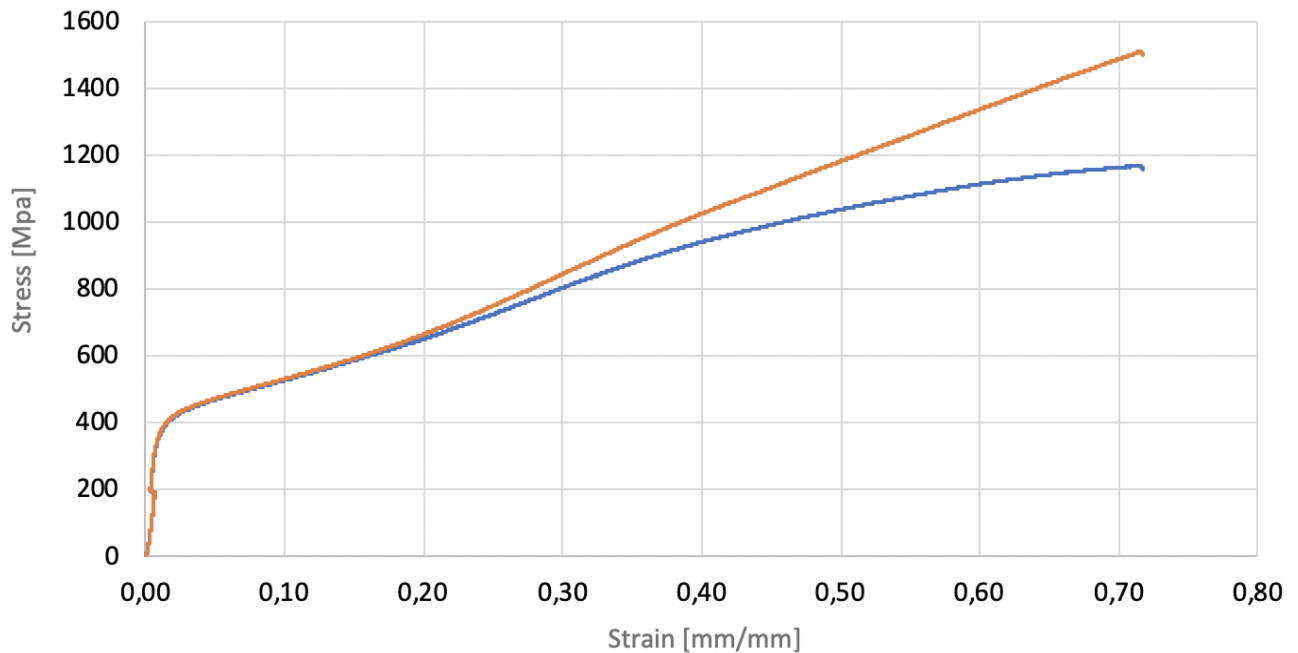


Fig. 6.24: Stress-Strain\_Test#1\_Provino#1.



Infatti, dal momento che il provino è compreso tra due superfici piane durante lo svolgimento della prova, la sua espansione in prossimità delle zone di contatto con le stesse è contrastata dalle forze di attrito che si sviluppano durante un movimento relativo delle stesse.

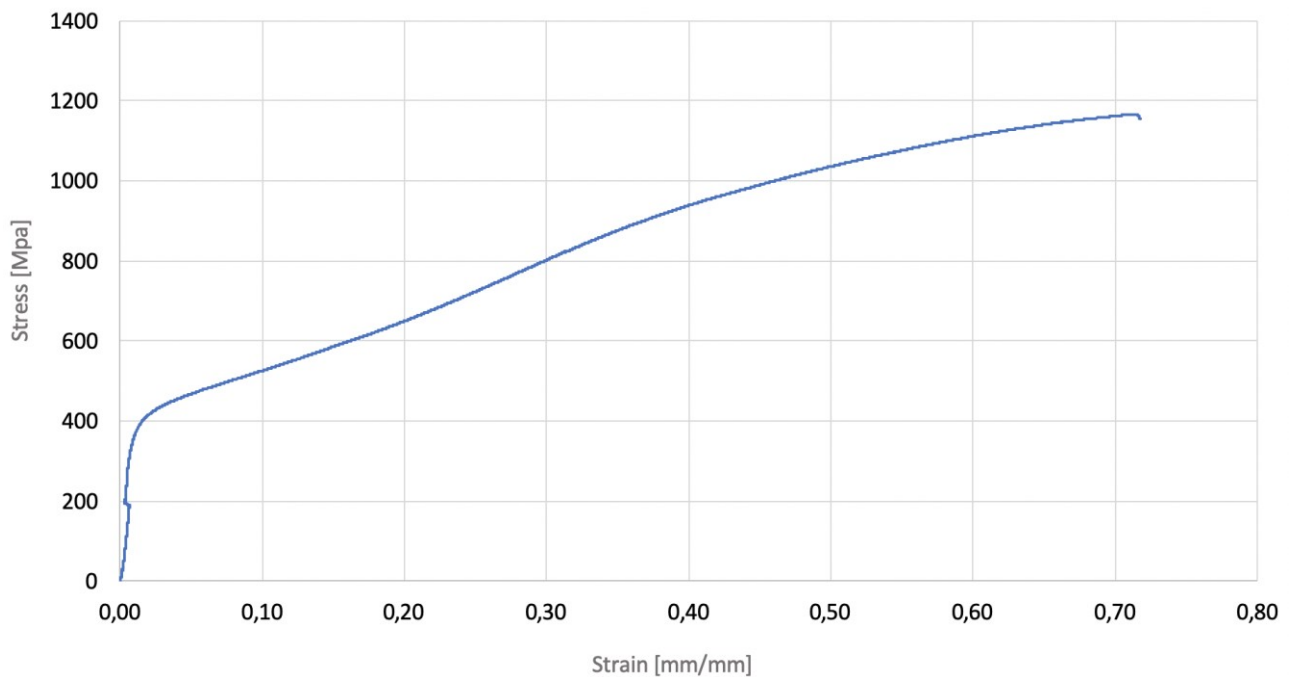
A tal proposito è necessario applicare una correzione che consente di ottenere la curva vera del materiale testato rappresentata in blu nella Figura successiva.



**Fig. 6.25:** *Stress-Strain\_Test#1; Confronto Curva vera (arancione) - Curva vera corretta (blu).*

È possibile osservare come la correzione apportata riduca i valori di tensione raggiunti nel campo plastico del materiale, lasciando invariati i valori relativi alla zona elastica.

Quindi in Figura 6.26 è mostrata la curva vera corretta relativa al primo test di compressione statica eseguito.



*Fig. 6.26: Stress-Strain\_Test#1- Curva vera ottenuta dopo la correzione dell'attrito.*

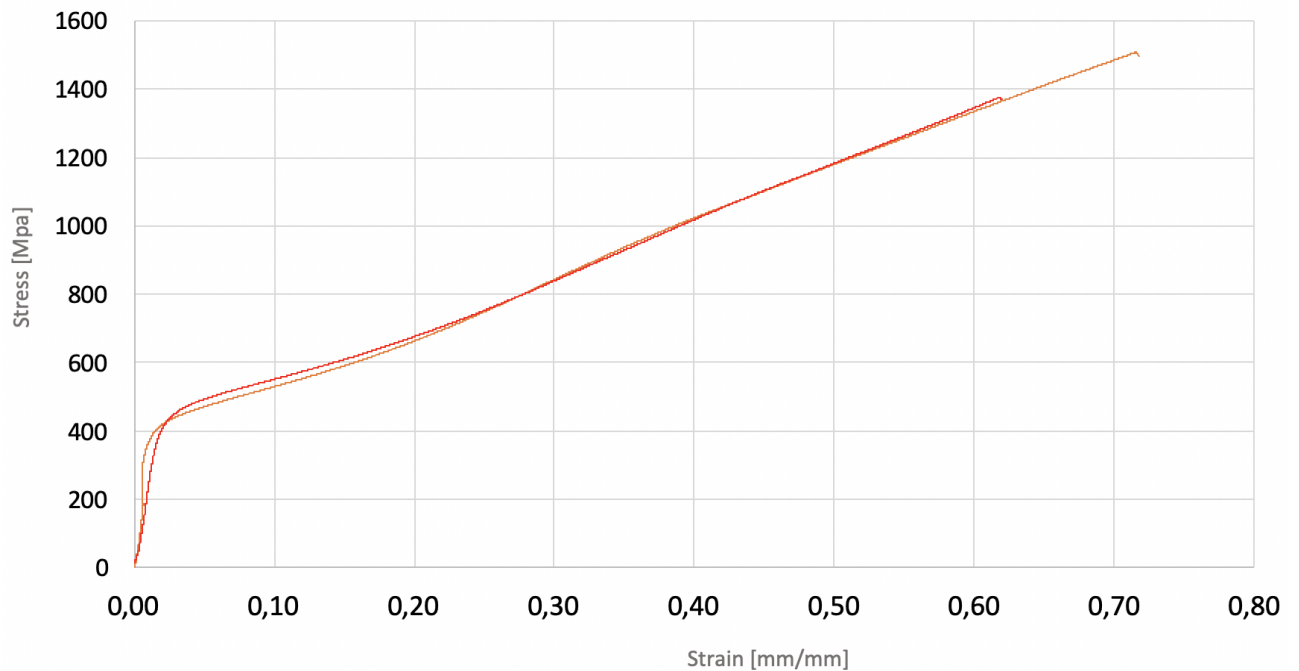
Analizzando, quindi, il grafico tensione-deformazione vera mostrato in Figura 6.26, è possibile notare che le caratteristiche del materiale Inconel 625 relative al campo elastico (Modulo elastico, Yield Point) sono esattamente confrontabili con quelle ricavate nei test di trazione. Tali risultati evidenziano il comportamento simmetrico del materiale prodotto mediante LMD rispetto alla direzione di carico applicato.

Inoltre in tale prova, grazie all'assenza di strizione, il valore di deformazione massimo raggiunto risulta essere più spinto rispetto a quello dei test di trazione, permettendo di toccare valori tensionali più alti.

Su questa tipologia di provini sono stati condotti un totale di 2 test all'interno di uno strain rate compreso tra  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ .

Inoltre i provini utilizzati rispettivamente per le due prove appartengono rispettivamente al primo e secondo set di provini prodotti e descritti nel Paragrafo 4.4.4.

Nelle Figura 6.27 sono riportate le curve di compressione dove è possibile osservare i vari andamenti, i quali presentano una ottima ripetibilità.

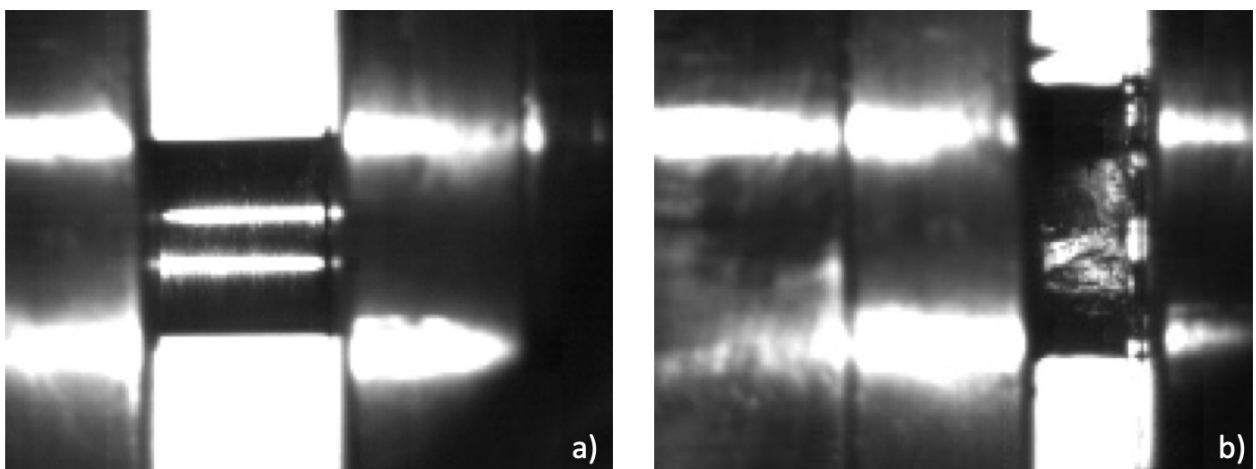


*Fig. 6.27: Stress-Strain, prove eseguite su 2 campioni.*

### 6.3.2 Prove di compressione dinamiche

Con l'intento di indagare in merito al comportamento del materiale ad elevato strain rate sono state condotte delle prove di compressione dinamiche mediante la Barra di Hopkinson. Sono stati condotti 4 test sui provini descritti nel Paragrafo 4.4.4: nello specifico 2 test su provini di dimensione minore appartenenti al primo set e 2 su campioni più grandi appartenenti al secondo set.

Nell'immagine successiva è possibile osservare il provino collocato tra le due barre prima dell'inizio del test (a) e a fine test dopo che è avvenuta la compressione (b).



*Fig. 6.28: Rappresentazione del test di compressione dinamica. a) Provino vergine prima del test. b) Provino compresso a fine test.*

È stato possibile effettuare queste considerazioni valutando un set di immagini registrate durante la prova con una FastCam.

Per l'esecuzione delle prove è stato necessario utilizzare degli elementi sacrificali i quali permettono di precaricare il sistema generando l'onda di compressione.

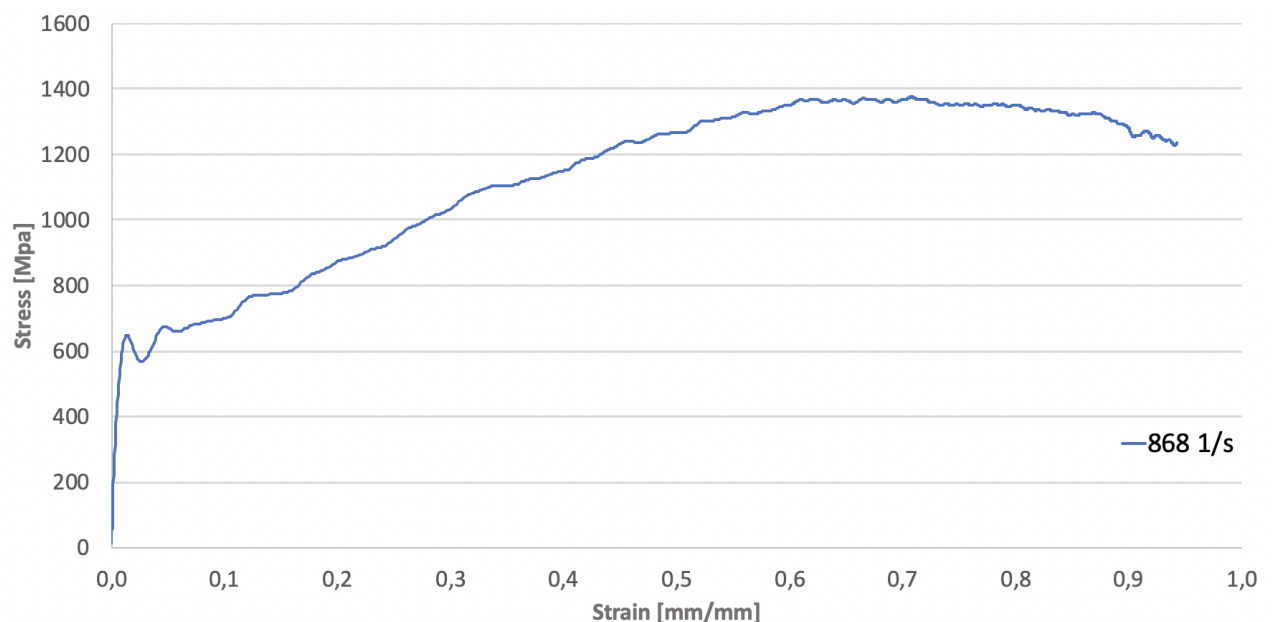
Lo spessore di tali elementi influisce notevolmente sulla velocità di deformazione impartita al provino dal momento che la velocità della barra è direttamente proporzionale all'energia accumulata.

Per questo motivo ad un maggiore spessore corrisponde un maggiore precarico e di conseguenza la possibilità di raggiungere strain rate più elevati.

Quindi per ogni tipologia di campione testato è stato utilizzato un disco di spessore 0,6mm e uno pari a 0,7mm.

Nella Figura successiva è mostrato la curva vera Stress-Strain relativa al test eseguito sul provino più piccolo appartenente al secondo set mediante l'utilizzo di un elemento sacrificale con spessore di 0,7mm.

Il test seguente è quello che ha permesso di raggiungere la velocità di deformazione maggiore pari a 868 1/s.



**Fig. 6.29:** Stress-Strain - strain-rate 868 s-1.

Focalizzando l'attenzione sulla curva tensione-deformazione di Figura 6.29 è possibile notare come la tensione di snervamento risulti essere maggiore rispetto al caso di compressione statica raggiungendo e superando i 600Mpa.

Inoltre è possibile osservare il risultato prodotto dall'effetto Joule il quale permette di distinguere due differenti valori di snervamento dove il primo è più alto del secondo.

Tale effetto consiste nel fatto che durante i test, se la velocità di deformazione è sensibilmente elevata, dell'ordine di  $10^2 \div 10^3 \text{s}^{-1}$ , il provino subisce una trasformazione non isoterma a causa della trasformazione dell'energia meccanica in flussi di calore.

Per questo motivo, il legame costitutivo presenta due distinti valori di snervamento che si susseguono dopo la caduta di tensione provocata dal decadimento delle caratteristiche meccaniche.

Sono state eseguite 4 prove, due sui provini più piccoli del primo set e due su quelli più piccoli del secondo set dei provini cilindrici (Paragrafo 4.4.4) nelle quali si è riusciti a raggiungere strain rate diversi rispettivamente per i a:

- $380 \text{ s}^{-1}$ : provino grande, elemento sacrificale 0,6mm.
- $608 \text{ s}^{-1}$ : provino piccolo, elemento sacrificale 0,6mm.
- $654 \text{ s}^{-1}$ : provino grande, elemento sacrificale 0,7mm.
- $868 \text{ s}^{-1}$ : provino grande, elemento sacrificale 0,6mm.

I risultati sono riportati nel grafico della Figura successiva nella quale è stata inserita anche una curva relativa alla prova di compressione statica così da poter realizzare un confronto.

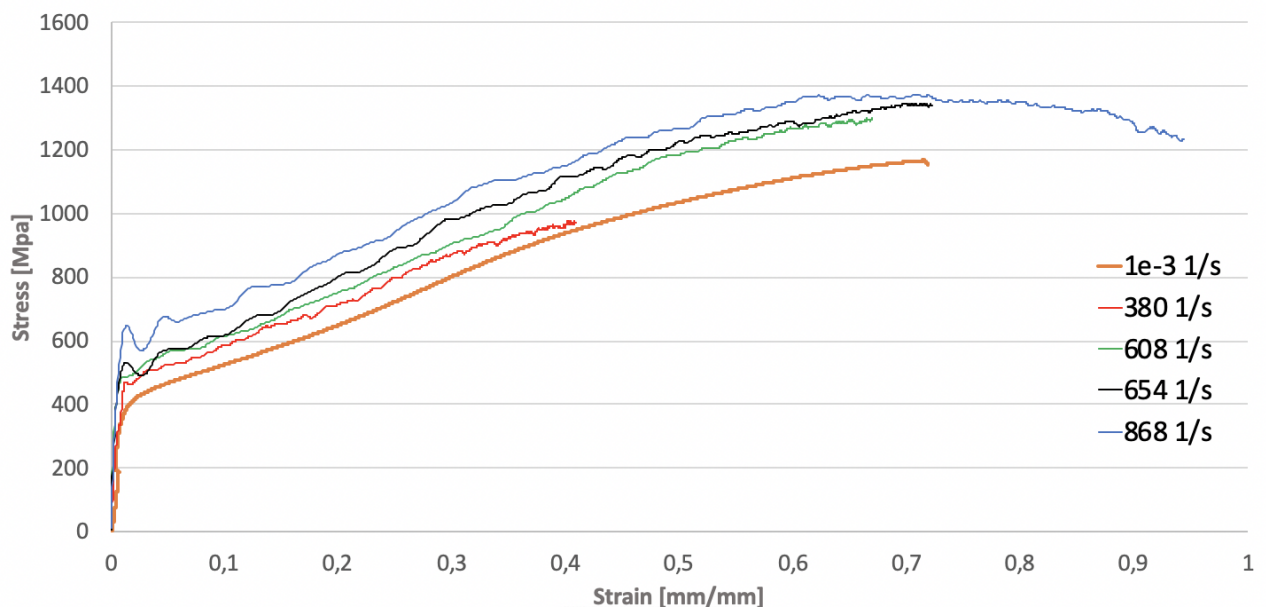


Fig. 6.30: Stress-Strain, confronto tra curve a diverso strain rate.

La Figura 6.30 permette di visualizzare nello stesso grafico tutte le curve ricavate con i test svolti a livelli di strain rate differenti.

Infatti possiamo osservare come la curva più bassa sia quella relativa ad uno strain rate dell'ordine di  $10^3$  (Prova Statica) per poi entrare in campo dinamico partendo da uno strain rate pari a  $380s^{-1}$  e salendo fino a raggiungere gli  $868s^{-1}$ .

L'andamento delle curve riflette esattamente il comportamento atteso dal momento che salendo con la velocità di deformazione si raggiungono livelli tensionali più alti a partire dalla tensione di snervamento. Infatti in tutte le curve dinamiche tale valore risulta essere maggiore rispetto a quello del campo statico pari circa a 400Mpa.

Rimane invece inalterata la rigidità elastica del materiale che non risente della sensibilità alla velocità di deformazione: questa indifferenza può essere soprattutto imputata al fatto che il comportamento elastico del metallo è da attribuire alla densità di dislocazioni e grani presenti, che sono indipendenti dallo strain-rate.

Quindi se consideriamo che le curve si dispongono esattamente in ordine crescente rispetto lo strain rate raggiunto possiamo affermare che tale materiale Inconel625 prodotto mediante Laser Metal Deposition risulta essere sensibile allo strain rate.

#### 6.4 Prove di durezza

I risultati dei test di durezza sono riassunti nella tabella successiva.

*Tabella 6.4: Risultati dei test di durezza di un provino cilindrico.*

	TEST #1	TEST #2	TEST #3	TEST #4	TEST #5
DUREZZA VICKERS (HV)	208.16	195.91	202.81	190.31	191.16
VALORE MEDIO = 198 HV					

I test sono stati svolti sul piano xz di un provino cilindrico la cui superficie è stata saggiata dal indentatore Vickers.

Il valore finale di durezza mostrato in Tabella 6.4 è stato calcolato come valore medio dei 5 risultati ottenuti ed è pari a 198 HV.

Inoltre tale valore è stato messo in relazione con il valore della tensione di snervamento ricavato dalle curve Stress-Strain delle prove di trazione e compressione.

Infatti esiste una relazione empirica valida per i materiali a base nichel la quale, nota la durezza Vickers, permette di calcolare un valore di resistenza meccanica espressa in Mpa che





sovrastima il reale valore dello snervamento del materiale risultando comunque confrontabile con quest'ultimo.

La relazione in questione è:

$$\sigma_{(0,2\%)} = 2,46(HV) \quad (7.1)$$

Quindi considerando che il valore di durezza individuato è pari a 198 HV è possibile calcolare una tensione pari a  $\sigma_{(0,2\%)}=487\text{Mpa}$ , superiore come previsto alla tensione di snervamento  $\sigma_y=420$  ricavato dai test di trazione.

I valori di durezza ricavati su tale tipologia di campioni, ottenuti mediante LMD, possono essere confrontati con quelli ottenuti su dei provini di grandi dimensioni realizzati con lo stesso processo di additive manufacturing e ricavati mediante fresatura da lastre di materiale depositate sul piano xy dove si è registrato un valore pari a 230HV.

Quindi nel nostro caso la durezza risulta essere inferiore ma corretta se si considera che l'altra tipologia di campioni mostrano proprietà meccaniche differenti.

Infatti in questi ultimi, i livelli di tensione raggiunti a partire dal punto di snervamento, pari circa a 600Mpa, sono maggiori a scapito dei valori di deformazione a rottura che risultano essere più bassi.

Quindi riassumendo il materiale Inconel prodotto in campioni cilindrici e flat di piccole dimensioni risultano essere caratterizzati da una minore durezza a vantaggio di una migliore duttilità.



## 7 Simulazioni numeriche basate sull'analisi FEM

Una volta eseguiti i test sperimentali dai quali sono state ricavate le caratteristiche del materiale indagato sono state condotte delle simulazioni numeriche con l'intento di confermare i dati ottenuti.

A tal proposito sono state riprodotte le geometrie di provini testati con le varie prove di trazione e compressione in formato CAD.

Successivamente tali geometrie sono state importate all'interno del software Fem (*Finite Element Method*) Ansys con il quale sono state condotte le simulazioni finalizzate a riprodurre le prove numericamente.

### 7.1 Metodo degli elementi finiti (FEM)

Le simulazioni al computer condotte dai svariati software in commercio sono meglio conosciute come analisi FEA (*Finite Element Analysis*) le quali gestiscono la tecnica numerica alla base del calcolo che permette di giungere alla soluzione: questa tecnica è appunto il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

In termini generali tale metodo permette di risolvere in maniera approssimata problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali (nel caso di calcolo dello stato tensionale saranno le equazioni indefinite di equilibrio, le equazioni di congruenza nel caso si trattino le deformazioni) riducendole ad un sistema, lineare o non lineare, di equazioni algebriche.

Questo è possibile mediante la discretizzazione del dominio continuo in esame in sottodomini (elementi finiti) tra loro interconnessi in punti chiamati nodi.

Gli elementi formano così una griglia reticolare definita mediante il termine anglosassone mesh.

All'interno di ciascun elemento si assume che l'andamento della grandezza oggetto di studio possa essere espresso mediante una funzione continua, detta funzione forma (o interpolatrice), descritta univocamente dai valori assunti dalla grandezza stessa nei punti nodali.

Solitamente le funzioni forma sono funzioni polinomiali e il grado del polinomio è legato al numero di nodi che definiscono il singolo elemento, quindi la sua forma, da scegliere opportunamente, determina il tipo di andamento assunto per la grandezza considerata al suo interno.



Ad esempio se l'andamento della grandezza è di tipo lineare si utilizzerà un elemento tetraedrico a 4 nodi, si utilizzeranno elementi diversi se si suppone che l'andamento della variabile sia quadratico o cubico.

Da quanto detto quindi è chiaro come la soluzione del problema analizzato non è più costituita da una funzione variabile in un dominio (a due o tre dimensioni a seconda che sia bidimensionale o tridimensionale), ma da un numero discreto di variabili, che sono i valori assunti dalla grandezza oggetto di indagine nei singoli nodi, tramite le quali è possibile risalire ad una valutazione, seppur approssimata, dell'andamento della funzione nell'intero dominio. La soluzione è quindi data da un sistema di equazioni algebriche facilmente risolvibile per via computazionale che si presta bene quindi ad essere implementato nei calcolatori.

Gli errori dovuti all'approssimazione delle equazioni differenziali in algebriche vengono poi gestite mediante il modello residuale alla Galerkin, basato sulla minimizzazione, a livello del singolo elemento finito, dei residui causati dal mancato soddisfacimento puntuale delle equazioni fondamentali da parte della soluzione approssimata.

#### 7.1.1 Ansys Workbench 19

Per la simulazione in oggetto è stato utilizzato uno dei codici di calcolo agli elementi finiti tra i più diffusi e potenti sul mercato, Ansys 19, in particolare la piattaforma Workbench che permette, tramite un'interfaccia relativamente intuitiva (GUI, *Graphical User Interface*), di accedere a vari programmi attraverso i quali vengono gestite automaticamente le equazioni e i tipi di soluzione da adottare in base ai comandi attivati dall'utente.

Ansys Workbench, come la maggior parte dei software di calcolo agli elementi finiti, suddivide il processo di analisi in 3 fasi:

- **Pre-processing** in cui vi è la modellizzazione del problema oggetto di indagine, sia dal punto di vista della rappresentazione grafica sia dell'assegnazione delle grandezze che determinano l'evoluzione del fenomeno fisico;
- **Processing** in cui si esegue l'analisi numerica vera e propria con la risoluzione del problema agli elementi finiti;
- **Post-processing** in cui viene elaborata e rappresentata la soluzione sia nelle quantità fondamentali, rappresentate direttamente in forma discreta nel metodo FEM (per esempio, gli spostamenti in ambito strutturale), sia delle quantità da esse derivate,



importanti nella fisica del problema analizzato (per esempio le tensioni, sempre in un approccio compatibile con problemi strutturali).

### 7.1.2 Aspetti da tenere in considerazione nella gestione di un'analisi FEM

Prima di cominciare l'impostazione dell'analisi FEM occorre tenere presente fin da subito alcune questioni fondamentali.

Essa deve essere impostata tenendo conto del corretto equilibrio che deve intercorrere tra relativa rapidità di calcolo per l'ottenimento dei risultati, nonché della bontà della simulazione intesa come approssimazione il più possibile vicina a quello che è il caso reale.

Inoltre il tutto deve essere gestito tenendo conto delle prestazioni del calcolatore che si ha a disposizione.

Si tenga conto che se la simulazione è troppo dettagliata e possiede molte informazioni che devono essere elaborate dal processore, l'ottenimento di una soluzione può richiedere parecchi giorni durante i quali ovviamente il lavoro risulta bloccato.

Si deve quindi cercare di semplificare il più possibile il modello eliminando tutti quei parametri presenti nel caso reale che non hanno un'influenza significativa sull'ottenimento dei risultati. Tuttavia simulazioni troppo semplificate rischiano di essere fuorvianti, portando a risultati errati che possono essere lontani dalla situazione reale che si verrà poi a creare in fase di installazione ed utilizzo del componente.

## 7.2 Scelta del tipo di analisi e dell'ambiente di simulazione

Per convalidare i risultati ottenuti mediante le varie prove sperimentali descritte precedentemente è stata eseguita una simulazione numerica mediante l'utilizzo del software Fem Ansys.

L'obiettivo era quello di riprodurre la prova di trazione eseguita sui provini testati così da valutare il comportamento degli stessi e del materiale testato.

A tal proposito è stato necessario svolgere la simulazione sui provini cilindrici torniti i quali sono caratterizzati da dimensioni ideali che consentono di riprodurre la geometria del campione in formato CAD 3D.

Quindi dopo aver riprodotto la geometria sono state fornite le caratteristiche del materiale testato così da riprodurre il test di trazione.



A tal proposito si è scelto di operare nell'ambiente *Static Structural* attraverso il quale è possibile gestire simulazioni di tipo statico riguardanti le sollecitazioni delle strutture meccaniche.

Quindi è stato possibile bloccare il campione e applicare allo stesso uno spostamento uguale a quello registrato sulla macchina MTS così da ottenere informazioni relative ai valori di carico applicati sul campione.

In questo modo è stato possibile confrontare la curva Carico – Spostamento della prova sperimentale con quella della simulazione numerica in modo da avvalorare i risultati ottenuti. Nei capitoli seguenti verranno illustrati tutti i passaggi per la realizzazione delle simulazioni in questo ambiente.

### 7.3 Analisi numerica dei test di trazione

#### 7.3.1 Definizione della geometria

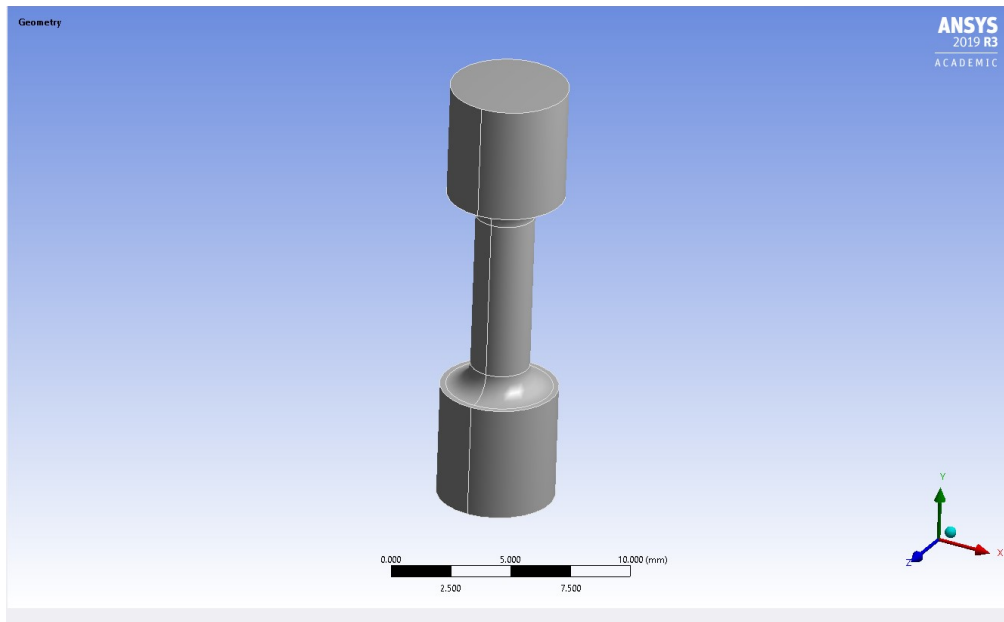
Il primo passo per impostare la simulazione è l'importazione del modello CAD del provino nell'ambiente di simulazione di Ansys Workbench.

Ansys possiede un modulo apposito, *Geometry*, per l'importazione della geometria nel quale è possibile impostare tutti i *settings* relativi alla sua definizione e, tramite il *Design Modeler*, operare semplici modifiche al modello per adattarlo alle esigenze di simulazione.

Workbench realizza automaticamente l'importazione del file di assieme dei più comuni software CAD e CAE in commercio come SOLIDWORKS, Solid Edge, Catia.

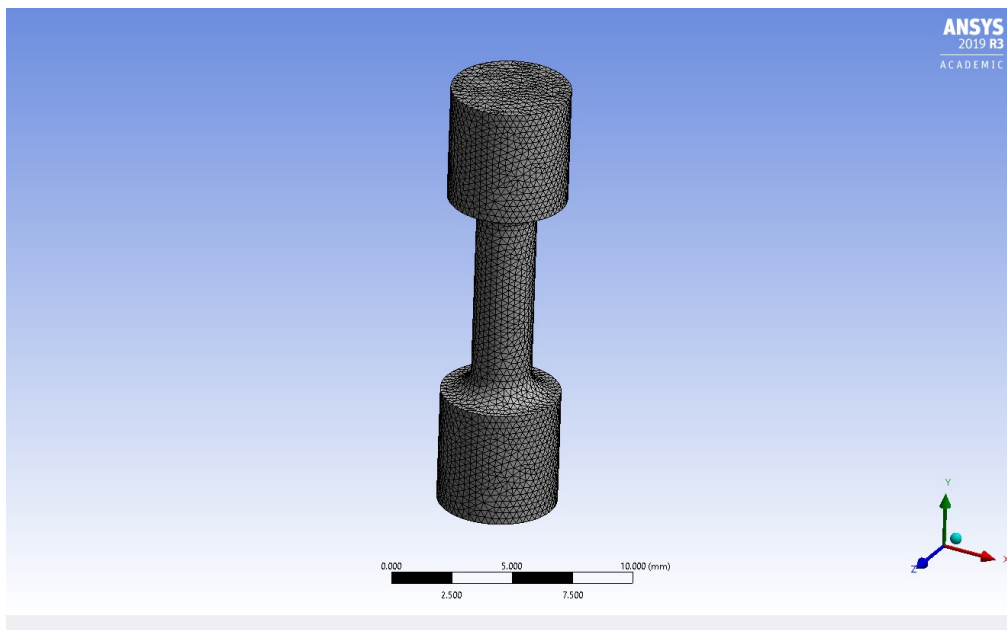
Come prima cosa è stata realizzata la geometria da importare all'interno del software sulla quale eseguire la simulazione, la quale è stata realizzata mediante il programma di disegno e salvato in formato Step.

Essendo il progetto realizzato con SOLIDWORKS, si aprirà in *Geometry* il file assieme mediante il comando *Import* ottenendo così l'importazione dei modelli (Figura 7.1).



*Fig. 7.1: Definizione della geometria.*

Una volta importata la geometria ne è stata eseguita la mesh come mostrato in Figura 7.2. È stata eseguita una mesh con elementi tetraedrici con taglia pari a 0,5mm.



*Fig. 7.2: Definizione della mesh.*

### 7.3.2 Definizione del materiale

Una volta definita la geometria si procede con la definizione del materiale da assegnare al provino sul quale effettuare la simulazione.

*Ansys Workbench* possiede un'applicazione apposita per la definizione dei materiali e delle loro proprietà: *Engineering Data*.



Attraverso questo ambiente è possibile avere accesso ad una banca dati dei materiali più utilizzati, impostare le proprietà principali e il tipo di comportamento.

Una volta creato un database con la lista di tutti i materiali utilizzati nel progetto essi vengono richiamati nell'ambiente di simulazione *Static Structural* → *Geometry* dove è possibile scegliere il materiale da associare alla geometria.

Nel caso in questione è stato creato un modello materiale nuovo nominato Inconel 625 (IN625) all'interno del quale sono stati inseriti i valori della curva vera Stress-Strain ricavati sperimentalmente.

Quindi innanzitutto sono state fornite al software le informazioni del campo del campo elastico inserendo il modulo di elasticità.

Dopodiché sono state inserite le informazioni del campo plastico del materiale scegliendo *Multilinear Isotropic Hardening* tra i modelli disponibili all'interno del software.

Quindi è stato possibile inserire i valori della curva vera del materiale in forma tabulare come mostrato in Figura 7.3 dai quali è stata plottata la curva raffigurata nella stessa immagine.

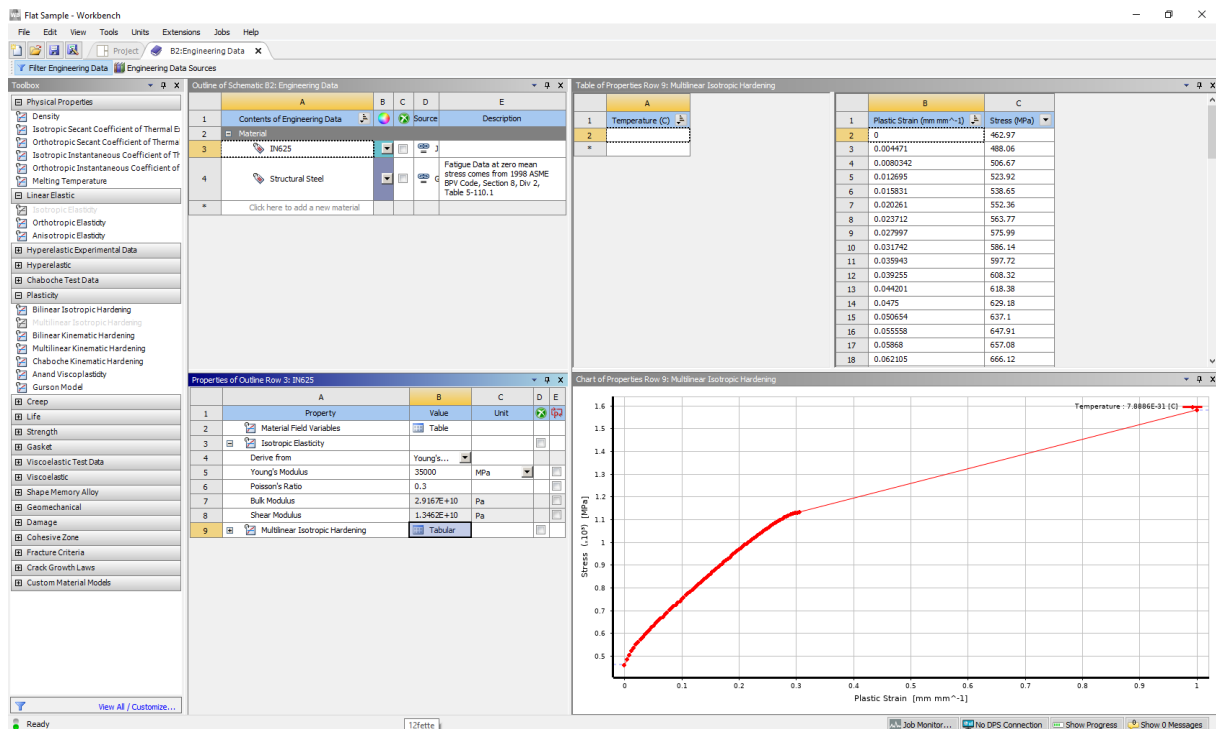


Fig. 7.3: Definizione del materiale.

Per tutte le altre grandezze legate a queste appena definite, il programma è in grado di ricavarle automaticamente, come per esempio il modulo di elasticità tangenziale o il modulo di Bulk.

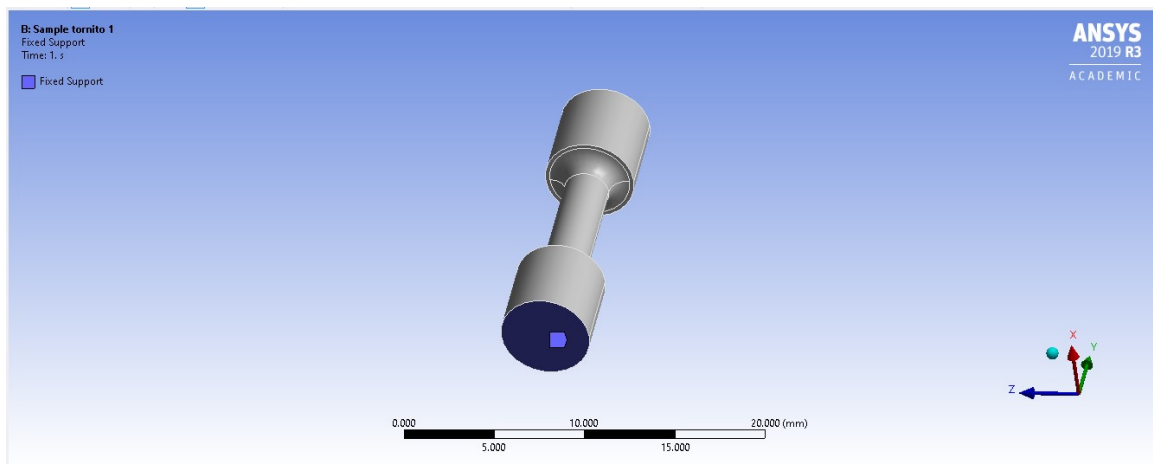
### 7.3.3 Definizione dei vincoli e carichi

La definizione dei vincoli rappresenta le condizioni al contorno che imponiamo al nostro sistema di equazioni fondamentali che il calcolatore andrà a risolvere.

Nel caso reale, il provino è bloccato tra gli afferraggi della macchina per le prove di trazione e si ha che durante il test l'afferraggio inferiore resta in posizione fissa mentre quello superiore inizia a spostarsi verso l'altro imponendo l'allungamento del provino.

Quindi si è cercato di riprodurre tali circostanze attraverso l'inserimento di un vincolo d'incastro alla base e un spostamento obbligato nella testa del provino.

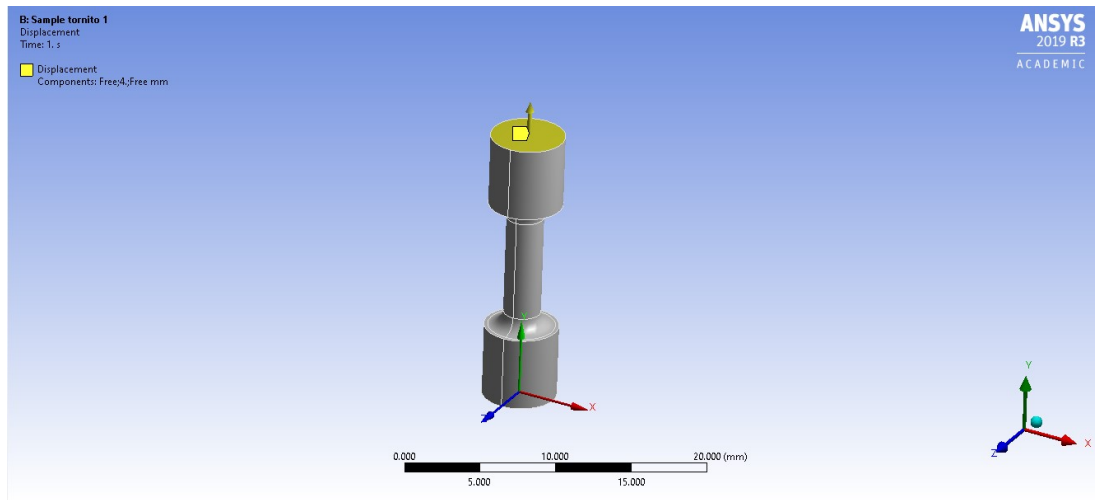
Quindi è stata inserita la prima condizione attraverso il comando: *Analysis Settings* → *Insert* → *Fixed Support* (Figura 7.4).



*Fig. 7.4: Definizione del vincolo Fixed Support.*

Dopodiché è stata inserita la condizione per la quale il provino venisse sottoposto ad uno spostamento che avrebbe provocando la sua deformazione attraverso il comando: *Analysis Settings* → *Insert* → *Displacement* (Figura 7.5).

È stato quindi imposto uno spostamento in direzione y, parallela all'asse del provino, pari a 4mm.

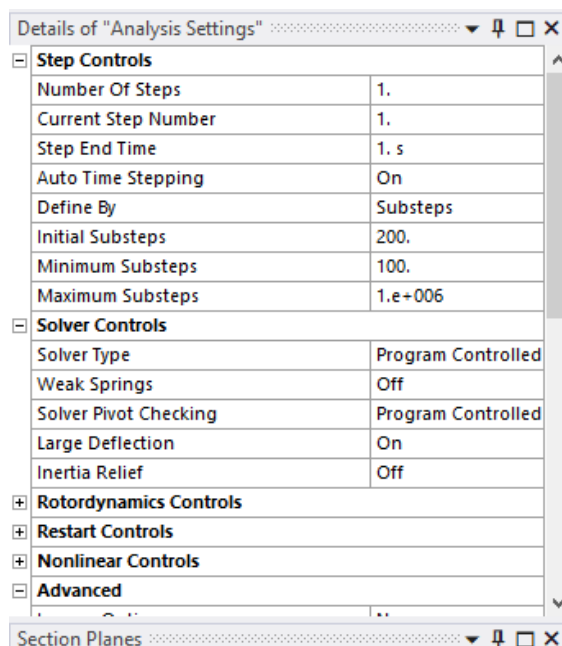


*Fig. 7.5: Definizione del vincolo Displacement.*

Infine sono stati definiti i parametri relativi al come eseguire la simulazione per renderla coerente con quella sperimentale.

Sono stati quindi attivati i grandi spostamenti (Analysis Settings → *Large Deflection* → *On*), dal momento che la prova reale è stata condotta fino a che non si è manifestata la rottura del provino, e lo spostamento è stato suddiviso in *Substeps* per replicare la condizione di allungamento a strain rate molto bassi (Figura 7.6).

*Analysis Settings* → *Initial Substeps* → 200; *Minimum Substeps* → 100; *Maximum Substeps* →  $10^6$ .



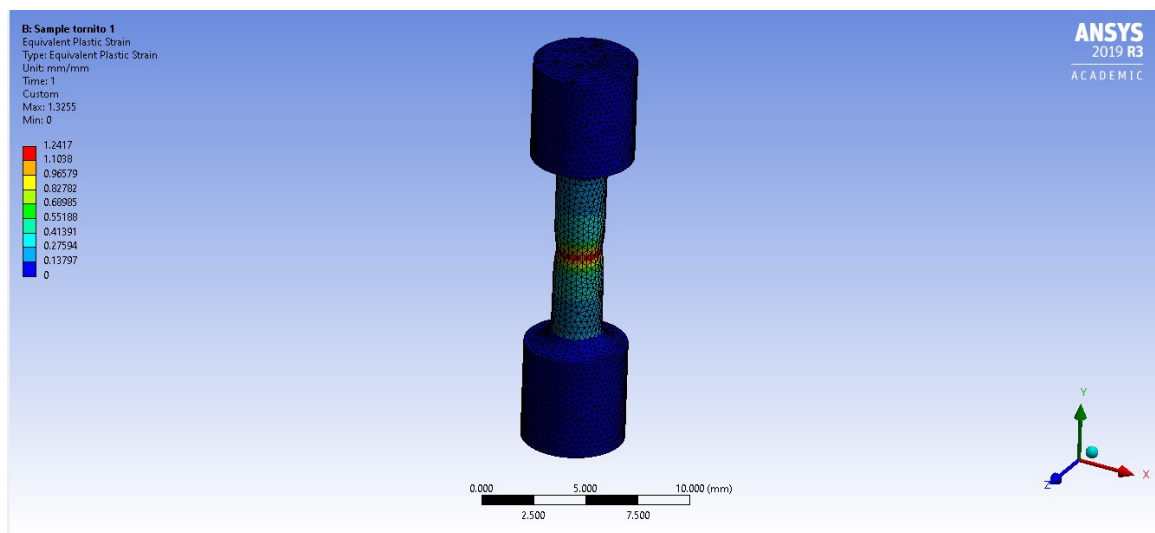
*Fig. 7.6: Definizione dei Substeps.*

### 7.3.4 Risultati

Analizzando i risultati ottenuti possiamo osservare innanzitutto il livello di deformazione subito dal campione mostrato in Figura 7.7.

Il provino presenta una zona di strizione in cui si ha una concentrazione delle deformazioni dove appunto raggiungono il valore massimo.

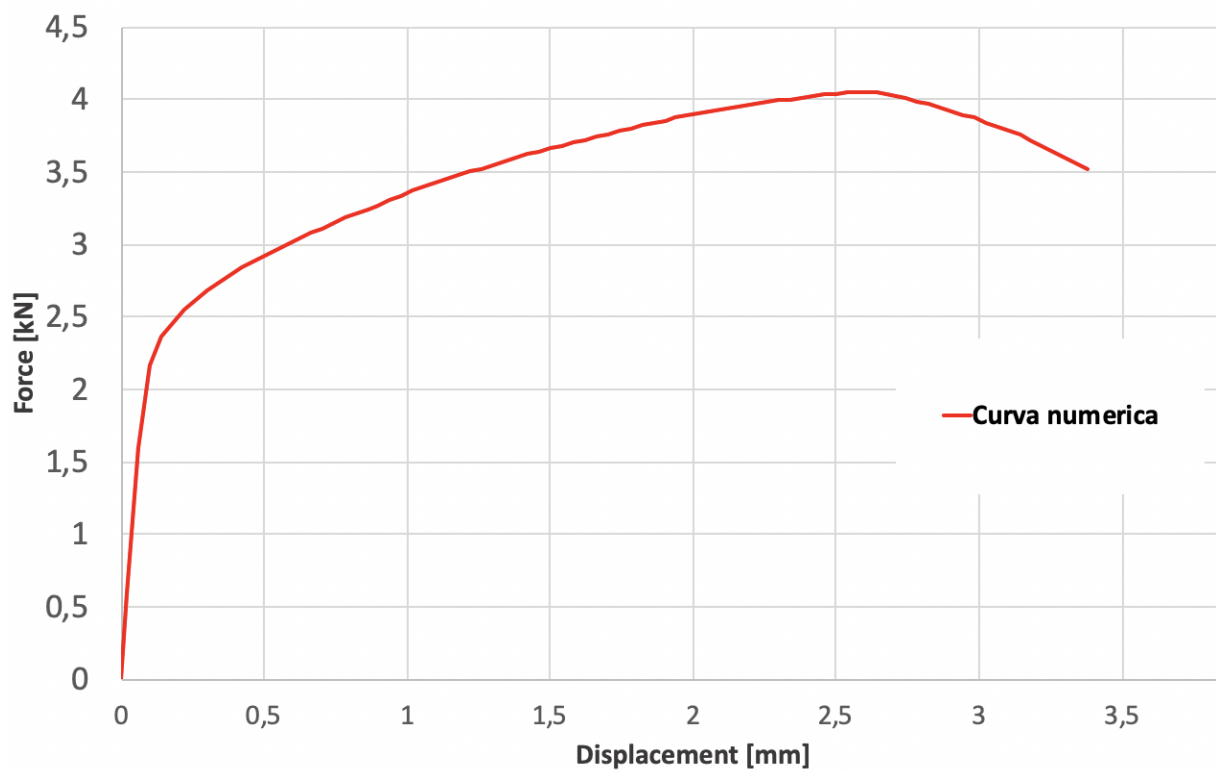
Nelle zone circostanti si registra un valore di deformazione pari al 40% e del tutto in linea con i valori ottenuti sperimentalmente con la Digital Image Correlation.



*Fig. 7.7: Equivalent Plastic Strain results.*

Inoltre grazie alla funzione *Force Reaction*, presente tra i risultati ottenibili al termine della simulazione, è stato possibile acquisire dati relativi ai valori di carico risultanti della reazione vincolare imposta alla base del campione.

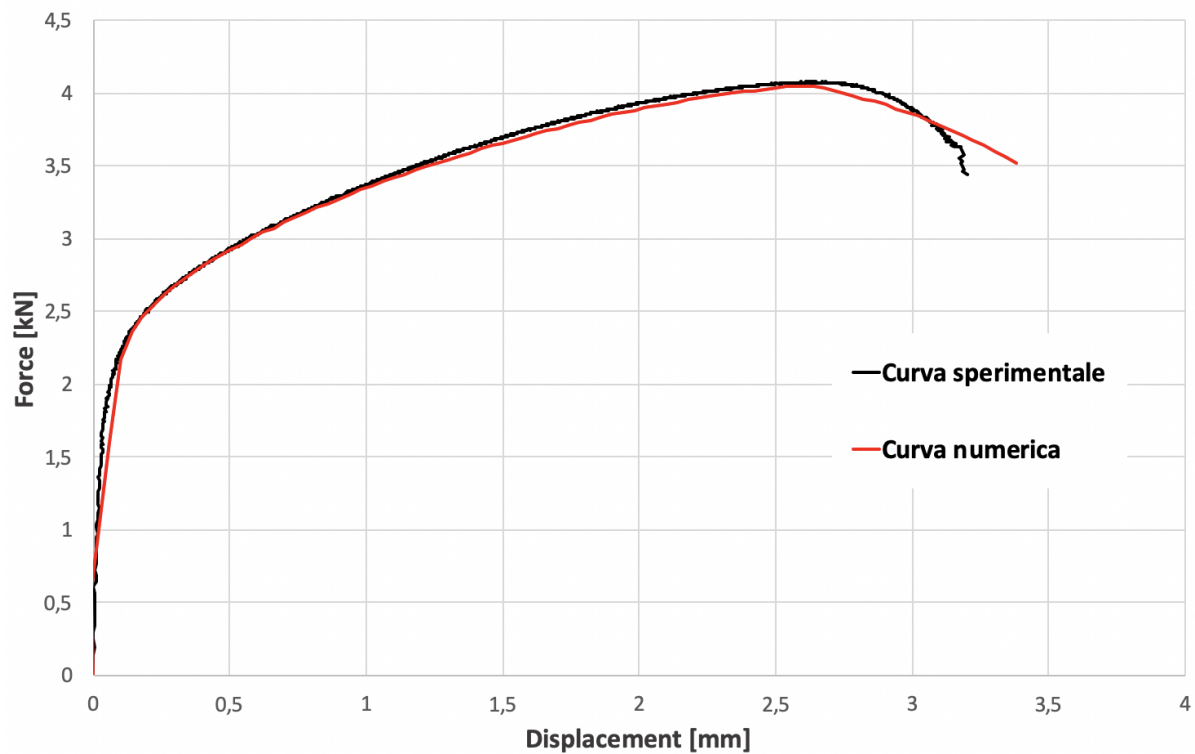
In tal modo le informazioni ricavate sono state utilizzate per plottare il grafico Forza-Spostamento mostrato in Figura 7.8.



*Fig. 7.8: Curva Forza-Spostamento numerica.*

Tale curva è poi stata messa a confronto con la curva sperimentale realizzata utilizzando i dati forniti dalla macchina MTS con la quale sono stati condotti i test di trazione.

Quindi entrambe le curve sono state plottate nello stesso grafico come mostrato nella figura seguente.



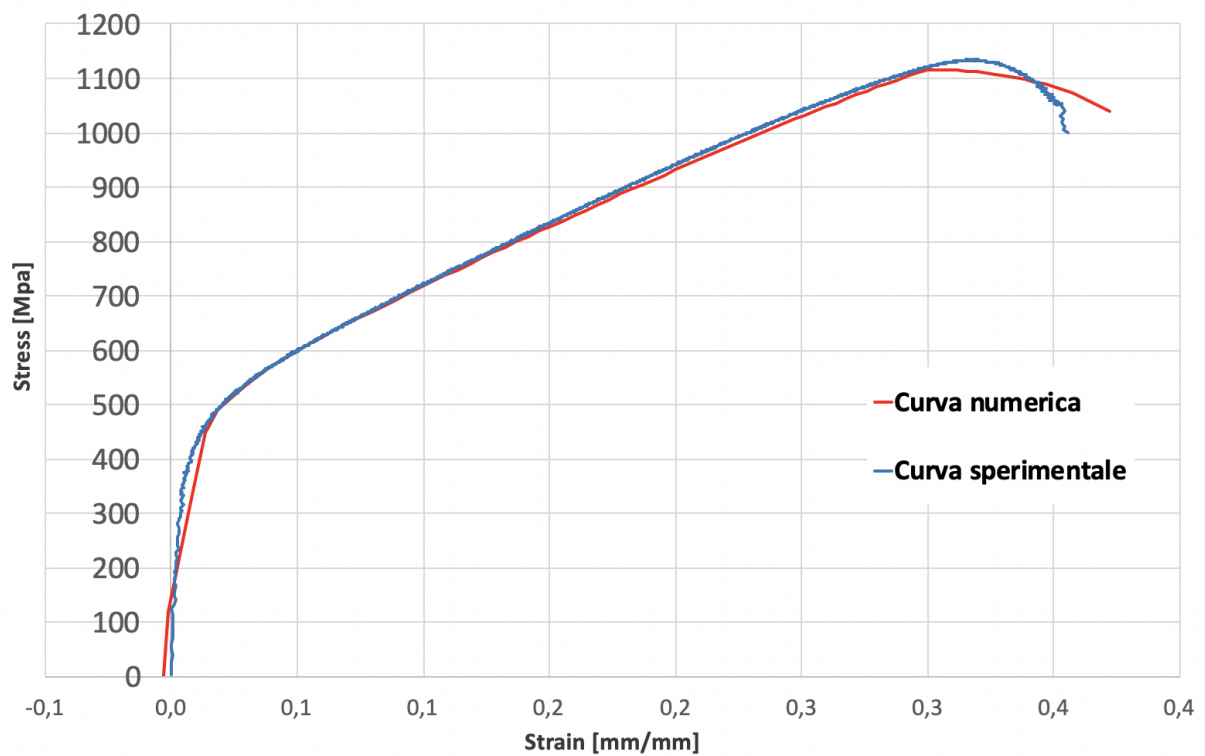
*Fig. 7.9: Confronto curva sperimentale e curva numerica.*

È possibile osservare come le due curve abbiano esattamente lo stesso andamento sia nel tratto elastico che in quello plastico.

L'unica differenza apprezzabile la si può notare nella parte finale dove la curva numerica raggiunge valori di deformazione maggiori dal momento nella simulazione non è prevista la rottura del provino.

Inoltre i dati di forza ottenuti numericamente sono stati utilizzati per graficare la curva vera Stress-Strain così da confrontarla con quella ottenuta sperimentalmente come mostrato nel grafico successivo.





*Fig. 7.10: Confronto curva Stress-Strain sperimentale e numerica.*

Anche in questo caso l'andamento delle tensioni-deformazioni ricalca esattamente il comportamento reale eccetto nell'ultimo tratto per il motivo spiegato precedentemente. Quindi la verifica numerica ha permesso di verificare la correttezza dei risultati ottenuti avvalorando ancor di più la bontà degli stessi.

## 8 Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di caratterizzare il comportamento meccanico della superlega di nichel Inconel 625 (IN625) prodotta mediante il processo di produzione additiva chiamato Laser Metal Deposition.

I campioni di materiale, ottenuti adoperando diverse strategie di deposizione, risultano avere dimensioni ridotte e caratteristiche geometriche non perfette.

Infatti lo scopo di tale lavoro è stato quello di poter testare i campioni di piccola dimensione nello stato as-built senza ulteriori lavorazioni al fine di risparmiare materiale e tempo.

I test statici di trazione hanno evidenziato un'ottima ripetibilità dei risultati ottenuti sia sui provini flat che cilindrici i quali hanno mostrato livelli di tensione e deformazione differenti nei due casi.

Infatti i campioni cilindrici hanno manifestato un minore allungamento a rottura accompagnato da un livello di stress leggermente più alto rispetto ai flat che risultano essere caratterizzati da una maggiore duttilità.

La spiegazione di tale comportamento è dovuta alla diversa strategia di deposizione adottata per la realizzazione dei provini che influisce sulla microstruttura degli stessi.

Infatti attraverso delle analisi metallografiche è stato possibile osservare che, nei provini piatti, il materiale presenta grani stretti e allungati lungo la direzione z di crescita, i quali si formano per accrescimento epitassiale e si estendono attraverso i diversi layer depositati.

Dall'analisi microstrutturale SEM sono state osservate strutture dendritiche colonnari allungate nella direzione di applicazione del carico, generate dalla velocissima solidificazione del materiale e dal forte gradiente termico.

Al contrario nei provini cilindrici sono state riscontrate strutture dendritiche di dimensione molto più contenuta con geometria e grandezza esattamente identica se valutate nei piani xy e xz, dotate inoltre da un'orientazione casuale in grado di ridurre l'anisotropia del provino.

Quindi i grani colonnari allungati nel provino flat sono paralleli allo sforzo di trazione applicato e perciò il numero di bordi di grano lungo questa direzione è minore.

Al contrario invece nei provini cilindrici si hanno un numero elevato di bordi di grano perpendicolari allo sforzo risultando più resistenti ma meno duttili.



Le prove di compressione sui provini cilindrici hanno evidenziato che le caratteristiche meccaniche del materiale Inconel 625 relative al campo elastico (Modulo elastico, Yield Point) sono esattamente confrontabili con quelle ricavate nei test di trazione.

Tali risultati hanno evidenziato il comportamento simmetrico del materiale prodotto mediante LMD rispetto alla direzione di carico applicato.

I test dinamici di compressione sono stati eseguiti per valutare il comportamento della superlega alle alte velocità di deformazione, la quale ha mostrato una buona sensibilità allo strain rate.

Infatti sono state eseguite delle prove a diverse velocità, con cui sono state ricavate le curve vere Stress-Strain plottate tutte nello stesso grafico e confrontate anche con la curva ricavata dalla compressione statica.

L'andamento delle curve riflette esattamente il comportamento atteso dal momento che salendo con la velocità di prova si raggiungono livelli tensionali più alti a partire dalla tensione di snervamento.

Infatti in tutte le curve dinamiche tale valore risulta essere maggiore rispetto a quello del campo statico pari circa a 400Mpa.

Rimane invece inalterata la rigidità elastica del materiale che non risente della sensibilità alla velocità di deformazione.

Questa indifferenza può essere soprattutto imputata al fatto che il comportamento elastico del metallo è da attribuire alla densità di dislocazioni e grani presenti, che sono indipendenti dallo strain-rate.

Quindi se consideriamo che le curve si dispongono esattamente in ordine crescente rispetto lo strain rate raggiunto possiamo affermare che tale materiale Inconel625 prodotto mediante Laser Metal Deposition risulta essere sensibile allo strain rate.

Le prove di durezza eseguite sul piano xz di un provino cilindrico hanno fornito 5 diversi valori dai quali è stato calcolato il valore medio di durezza pari a 198HV il quale è stato correlato al valore della tensione di snervamento del materiale ricavata nei test di trazione/compressione statici mediante una formula empirica valida per metalli a base nichel.

Il valore di snervamento calcolato con quest'ultima è pari a 487Mpa risultando maggiore, ma comunque confrontabile con il valore reale a causa di un'intrinseca sovrastima introdotta dalla formula.



I valori di durezza ricavati su tale tipologia di campioni risultano coerenti con quelli registrati su dei provini di grande dimensione ottenuti con la stessa tecnica LMD, dove si è registrato un valore pari a 230HV.

La durezza valutata nei test risulta essere minore rispetto ad altre tipologie di campioni a vantaggio di una minore rigidità e di una maggiore duttilità

Infine le simulazioni numeriche dei test di trazione condotte su dei provini cilindrici riprodotti in formato CAD hanno permesso di ricavare informazioni utili per la convalida dei risultati ottenuti.

Infatti sono state ricavate le curve Carico-Spostamento e Stress-Strain numeriche che sono risultate completamente coerenti una volta confrontate con quelle ottenute sperimentalmente.

La verifica numerica ha permesso di valutare la correttezza dei risultati ottenuti avvalorando ancor di più la bontà degli stessi.

## 9 Bibliografia

- [1] «ASTM International, F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, Rapid Manuf. Assoc. (2013) 10–12. doi:10.1520/F2792-12A.2.».
- [2] «D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, Additive manufacturing of metals, Acta Mater. 117 (2016) 371–392. doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019.».
- [3] S. Tremamunno, «Webthesis,» Luglio 2018. [Online]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/7658/>.
- [4] «F. Calignano, Overview on Additive Manufacturing Technologies, (2016) 1–20. doi:10.1109/JPROC.2016.2625098 0018-9219.».
- [5] «V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramon Blasco Puchades, L. Portoles Grinan, Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies, Int. J. Prod. Res. 49 (2011) 1061–1079. doi:10.1080/00207540903479786.».
- [6] «Concept Laser, (n.d.). <https://www.concept-laser.de/en/home.html>,» [Online].
- [7] «i.materialise,» [Online]. Available: <https://i.materialise.com/blog/en/i-materialise-launches-dmls-you-can-now-3d-print-in-titanium/>.
- [8] W. M. A. D. d. S. Bremen, «Selective Laser Melting doi:10.1002/latj.201290018,» 2012.
- [9] A. A. Arcam AB, «Setting the standard for Additive Manufacturing,» [Online]. Available: [www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-A2](http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-A2).
- [10] «W.E. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik, Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges, Appl. Phys. Rev. 2 (2015) 041304. doi:10.1063/1.4937809.».
- [11] [Online]. Available: <http://en.3damer.com/a/chanpin/jiguangxuanquronghua/27.html>.
- [12] E. Herderick, «Additive manufacturing of metals: A review, Mater. Sci. Technol. Conf. Exhib.,» 2011.
- [13] [Online]. Available: [https://www.trumpf.com/it\\_IT/applicazioni/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/it_IT/applicazioni/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/).
- [14] A. W. C. D. P. B. Pinar Urhal, «Robotics and Computer Integrated Manufacturing,» *ScienceDirect*.
- [15] [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Laser-metal-deposition\\_fig1\\_273536418](https://www.researchgate.net/figure/Laser-metal-deposition_fig1_273536418).
- [16] A. M. p. a. applications, «Additive manufacturing principles and applications».
- [17] A. R. a. D. B. b. A. B. b. G. D. A. Singh a, «Laser metal deposition of nickel coated Al 7050 alloy,» *Journal of Alloys and Compounds*.
- [18] S. Spigarelli, Metallurgia Meccanica, Esculapio, 2018.
- [19] M. Rosso, Corso di “Ingegneria delle leghe ad elevate prestazioni, vol. Lez. 6, 2017.
- [20] G. D. R. B. C. P. A. P. V. Flint, Heat Treater’s Guide. Practices and Procedure fo Nonferrous Alloys, ASM International, 1996.
- [21] J. S. J.L. Caron, «Weldability of Nickel-Base Alloys,» 2014.



- [22] R. J. X. W. L. C. M.M. Attallah, «Additive manufacturing of Ni-based superalloys : The outstanding issues,» 2016.
- [23] M. L. S. P. E. B. J.-W. L. F. C. D. M. M. T. H.-U. H. D. U. M. L. S. B. G. Marchese, «Influence of heat treatments on microstructure evolution and mechanical properties of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion,» n. 729 , 2018.
- [24] R. W. X. F. M. W. Y. G. C. Li, «Materials Science & Engineering A 73 Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment,» *doi:10.1016/j.msea.2017.08.058.*, p. 705, 2017.
- [25] «S. Specification, B443-00(2014)\_Standard\_Specification\_for\_Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium\_Alloy\_Sheet,\_and\_Strip.pdf, 00 (2014) 1–7. *doi:10.1520/B0443-00R14.2.*».
- [26] «B.W. Lane, S. Sheffield, UNS N06625 – Alloy 625, 44 (n.d.) 1644542».
- [27] E. M. • M. S. • M. R. • G. C. • G. N. • D. Amodio1, «Design of an Innovative System for Wave Generation in Direct Tension–Compression Split Hopkinson Bar».
- [28] J. D'Anteo, Caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di laminati ibridi.
- [29] Musotto, Digital Image Correlation: applicazione di tecniche convenzionali e sviluppo di soluzioni innovative per la stima e l'incremento dell'accuratezza.
- [30] B. Pan, K. Qian, H. Xie e A. Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science and Technology*, vol.20, 2009.
- [31] E. Mancini, Progettazione di un sistema di generazione dell'onda di tensione della split hopkinson bar per test di trazione e compressione, Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze matematiche,, 2013.
- [32] A. Gilat, Experimental study of strain-rate dependent behavior of carbon epoxy composite.
- [33] [Online]. Available: <https://www.primaadditive.com/it/laser-metal-deposition/> .