

Modelli e metodi sperimentali per la caratterizzazione a fatica di componenti aeronautici prodotti tramite manifattura additiva

Ing. G. Morettini

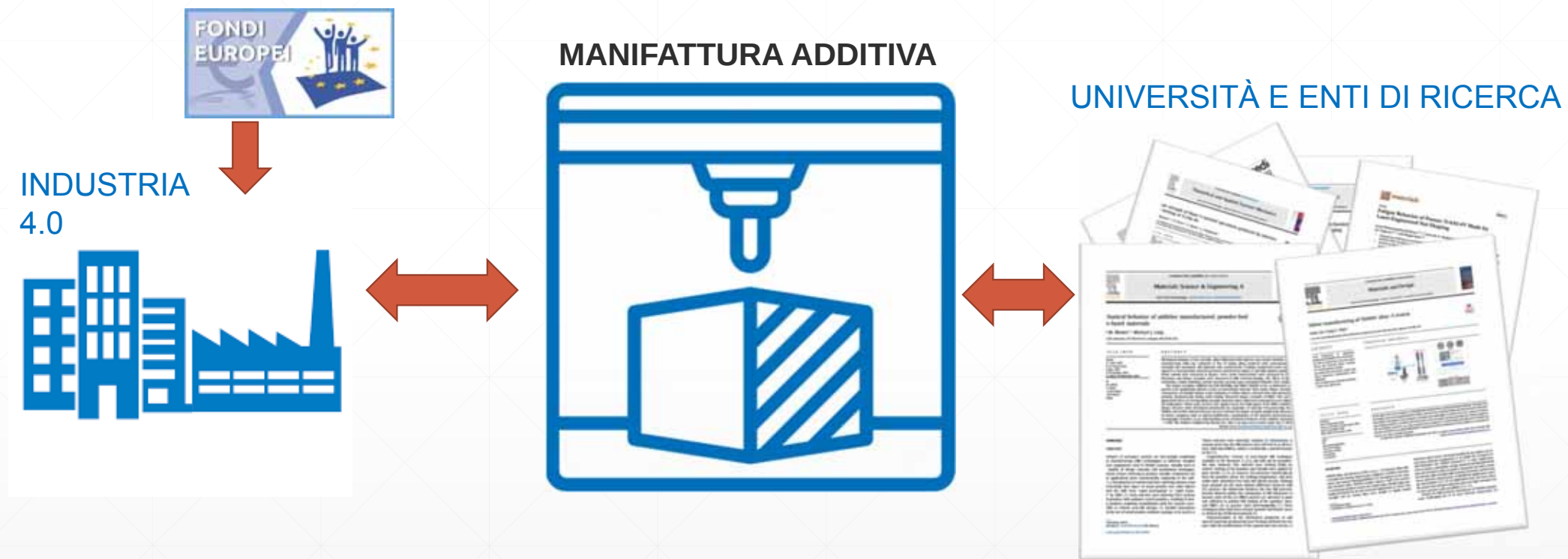
morettinigiulia@gmail.com



PROGETTAZIONE MECCANICA E COSTRUZIONE DI MACCHINE

Dipartimento di Ingegneria Università degli Studi di Perugia

RAPPORTO CON L'INDUSTRIA



RAPPORTO CON L'INDUSTRIA



THPE COXA



MANIFATTURA ADDITIVA



NTNU



PROGETTAZIONE MECCANICA
E COSTRUZIONE DI MACCHINE

COLLABORAZIONI:

 **NTNU**
Trondheim, Norvegia



PROBLEMATICA INDUSTRIALE

E' realmente possibile sostituire componenti strutturali ?

Processo
Classico

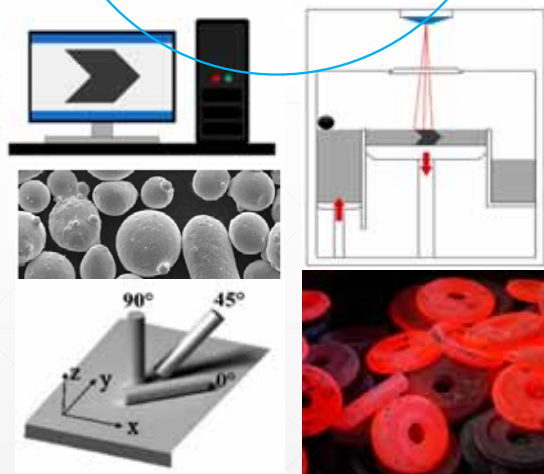


Processo
Additivo

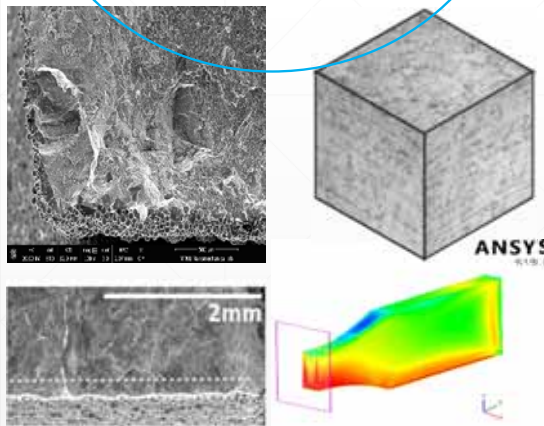
PROBLEMATICA INDUSTRIALE

Assenza di una chiara e consolidata caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei componenti finali.

Parametri
Pre- e Post-
Processo



Micro-
Struttura
&
Stress residuo



Proprietà
meccaniche



PROBLEMATICA INDUSTRIALE

Assenza di una chiara e consolidata caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei componenti finali.

Parametri di
Processo

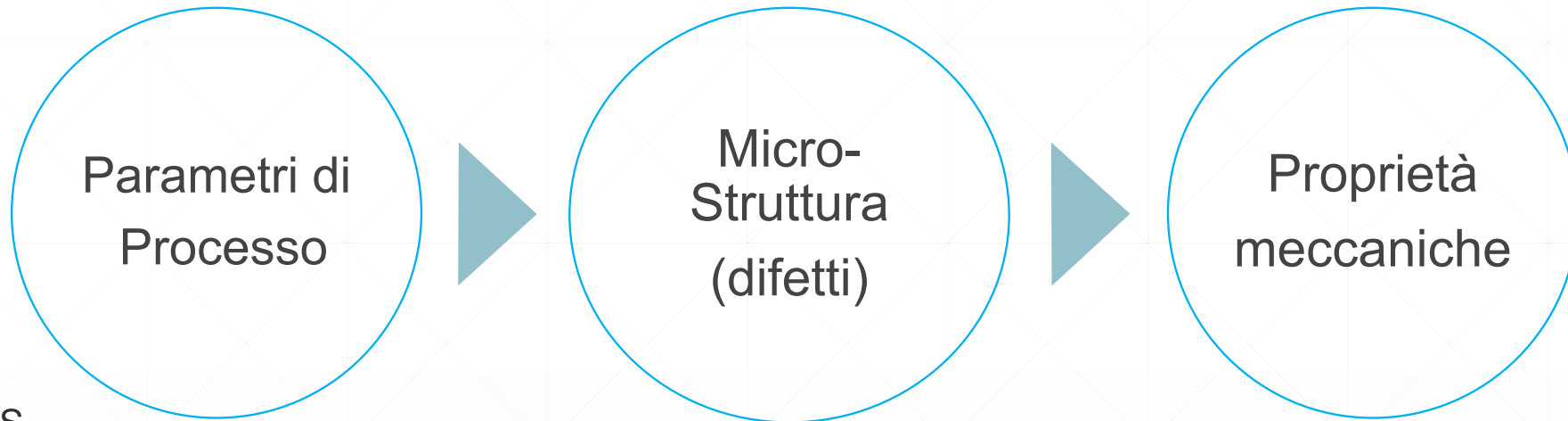
Micro-
Struttura
&
Stress residuo

Proprietà
meccaniche



PROBLEMATICA INDUSTRIALE

Assenza di una chiara e consolidata caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei componenti finali.



EOS



<Ti64_SPEEDM291 1.10>

SLM



*<Al_SLM_MBP3.0_30_CE2_400
W_Stripes_V1.0.>*

PROBLEMATICA INDUSTRIALE

Assenza di una chiara e consolidata caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei componenti finali.

Parametri di
Processo



Micro-
Struttura
(difetti)

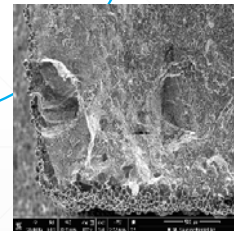


Proprietà
meccaniche

EOS



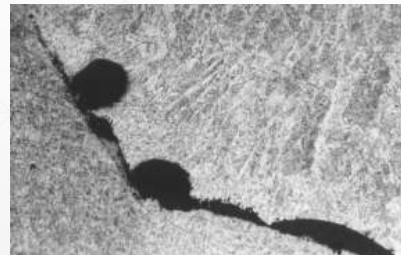
<Ti64_SPEEDM291 1.10>



SLM



*<Al_SLM_MBP3.0_30_CE2_400
W_Stripes_V1.0.>*



PROBLEMATICA INDUSTRIALE

Assenza di una chiara e consolidata caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei componenti finali.

Parametri di
Processo



Micro-
Struttura
(difetti)



Proprietà
meccaniche

EOS

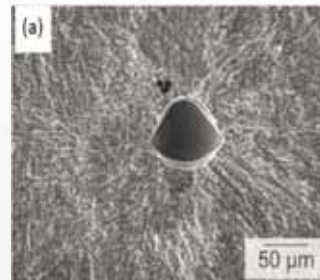
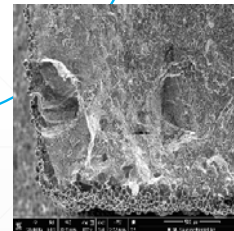


<Ti64_SPEEDM291 1.10>

SLM



*<Al_SLM_MBP3.0_30_CE2_400
W_Stripes_V1.0.>*

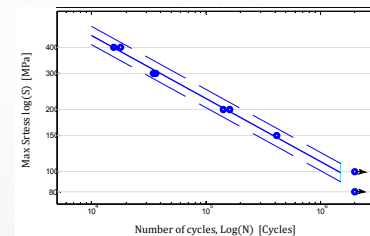
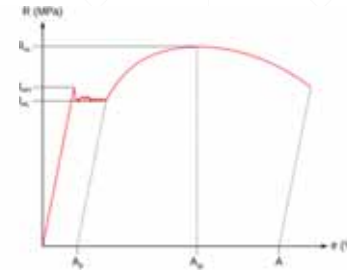


PROPRIETA' MECCANICHE



FONDAMENTALI PER LA FASE DI PROGETTAZIONE DI QUALSIASI COMPONENTE MECCANICO STRUTTURALE

- RESISTENZA STATICA (snervamento e rottura ma anche duttilità)
- MODULO ELASTICO (di Young)
- RESISTENZA LIMITE DI FATICA



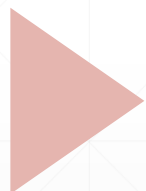
OBIETTIVO

Fornire all'industria un valido supporto per la caratterizzazione meccanica dei componenti realizzati tramite Manifattura Additiva.

PIANIFICAZIONE DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

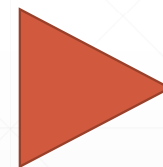
I fase

Ottimizzazione
parametrica



II fase

Programmazione
e svolgimento
prove



OBIETTIVO

Fornire all' industria
un valido supporto
per la
caratterizzazione
meccanica dei
componenti
realizzati tramite
Manifattura Additiva.

1 FASE: OTTIMIZZAZIONE PARAMETRICA

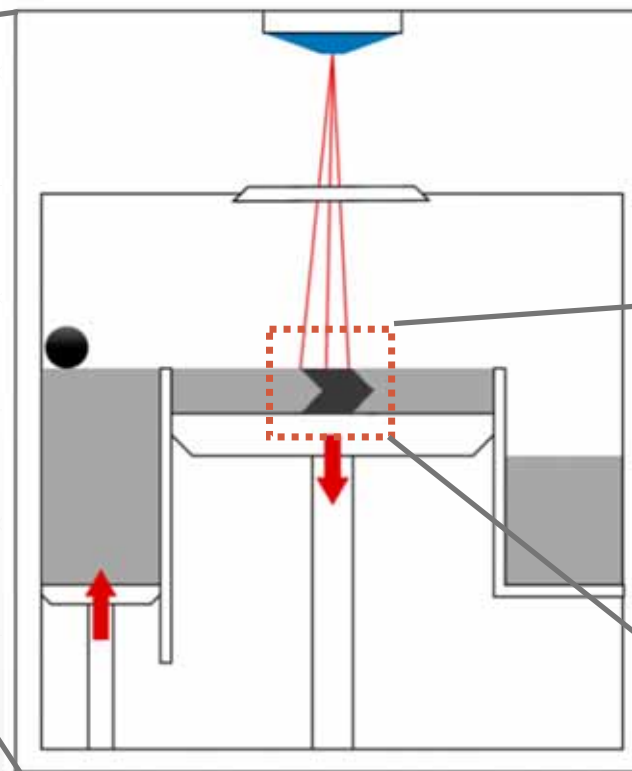
MACCHINA



POLVERI



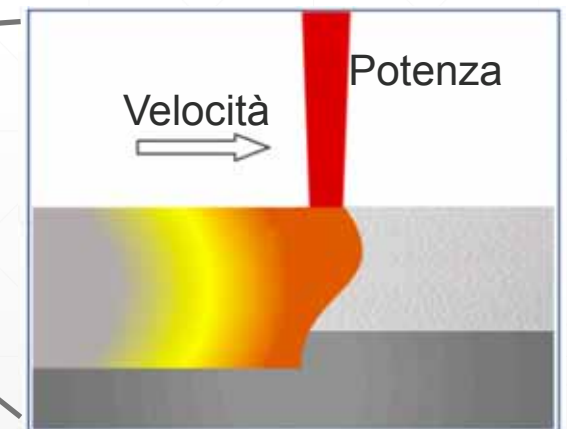
PROCESSO



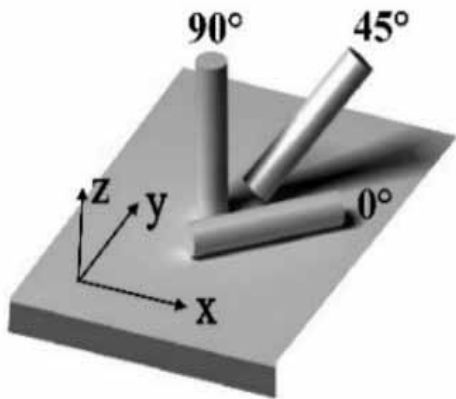
Set-Parametri di Processo



<Ti64_SPEEDM291 1.10>



2 FASE: PROGRAMMAZIONE PROVE CARATTERIZZAZIONE MECCANICA



- Valutazione delle 3 direzioni di accrescimento



- Valutazione dello stato AS-BUILT o del lavorato a macchina.

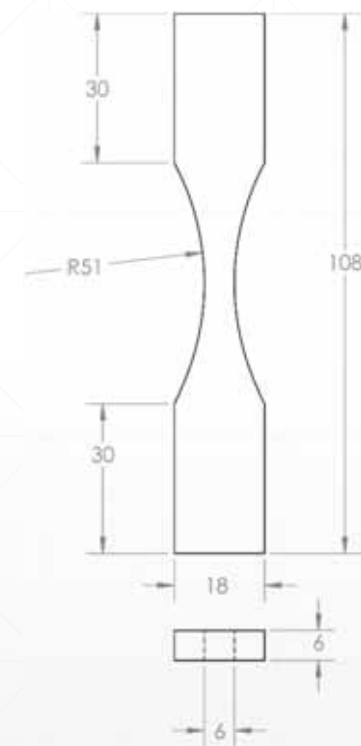


- Valutazione dello stato AS-BUILT o del trattato termicamente.
-

2 FASE: PROGRAMMAZIONE PROVE CARATTERIZZAZIONE

Direzioni di accrescimento	Finitura superficiale			
	As built		Trattato superficialmente	
	Trattamento termico		Trattamento termico	
	As built	Trattato termicamente	As built	Trattato termicamente
	6-12	6-12	6-12	6-12
	Trattamento termico		Trattamento termico	
	As built	Trattato termicamente	As built	Trattato termicamente
	6-12	6-12	6-12	6-12
	Trattamento termico		Trattamento termico	
	As built	Trattato termicamente	As built	Trattato termicamente
	6-12	6-12	6-12	6-12

ASTM E739



PROPRIETA' MECCANICHE STATICHE: Material Data Sheet

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Al-Alloy AISi10Mg / EN AC-43000 / EN AC-AISi10Mg⁽¹⁾

Mechanische Kennwerte Mechanical Data

Layer thickness 30 μm , 400 WTM

Wie gebaut	Wärmeverlust
As-built	Heat loss
1. Grundriss 2. Querschnitt	1. Grundriss 2. Querschnitt

Heat-treatedTM

SD: Standardabweichung Standard deviation

ZugprüfungTM

Ternville test™

Zugfestigkeit Tensile strength	R_m (MPa)	0°	45°	90°
		473	479	482
		15	15	15
		25.7	26.5	26.4
		10	10	10
Dehngrenze Offset yield strength	$R_{0.02}$ (MPa)	0°	45°	90°
		385	290	276
		2	5	5
		15.2	15.5	15.0
		5	4	6
Bruchdehnung Elongation at break	A (%)	0°	45°	90°
		7	6	5
		2	2	2
		12	12	11
		5	5	5
Bruchminderung Reduction of area	Z (%)	0°	45°	90°
		10	7	7
		2	2	2
		46	37	37
		4	2	2
Elastizitätsmodul Young's modulus	E (GPa)	0°	45°	90°
		77	71	75
		4	5	3
		58	63	52
		5	12	4

Härteprüfung™

Hardness Test

Härte nach Vickers	HVS	128	1	84	2
Vickers hardness					

Raufzeitmessung⁽¹⁾

Roughness measure

Mittelerwartung	$\bar{R}_z$ [µm]	6	2	6	2
Roughness average					
Gemittelte Nautiefe	$\bar{R}_z$ [µm]	44	2	43	2
Mean roughness depth					

Material data sheet



Mechanical properties of parts

	As built	Heat treated (B)
Tensile strength (N)		
• in horizontal direction (XY)	typ. 1230 ± 50 MPa typ. 178 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1080 ± 20 MPa (155 ± 3 ksi)
• in vertical direction (Z)	typ. 1200 ± 50 MPa typ. 174 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1060 ± 20 MPa (154 ± 3 ksi)
Yield strength (R_y) (N)		
• in horizontal direction (XY)	typ. 1060 ± 50 MPa typ. 154 ± 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 20 MPa (145 ± 3 ksi)
• in vertical direction (Z)	typ. 1070 ± 50 MPa typ. 155 ± 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 20 MPa (145 ± 3 ksi)
Elongation at break (S)		
• in horizontal direction (XY)	typ. 110 ± 21 %	min. 10 % typ. 114 ± 1 %
• in vertical direction (Z)	typ. 111 ± 3 %	min. 10 % typ. 115 ± 1 %
Modulus of elasticity (E)		
• in horizontal direction (XY)	typ. 110 ± 10 GPa typ. 16 ± 1.5 Msi	typ. 118 ± 10 GPa typ. 17 ± 1.5 Msi
• in vertical direction (Z)	typ. 110 ± 10 GPa typ. 16 ± 1.5 Msi	typ. 114 ± 10 GPa typ. 17 ± 1.5 Msi
Hardness (H)	typ. 320 ± 12 HV5	

(a) Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B1 Annex Q, proportional test pieces, diameter of the neck area 8 mm (0.2 inch), original gauge length 28 mm (1 inch)).

(a) Specimens were treated at 300 °C (1470 °F) for 4 hours in argon inert atmosphere. Mechanical properties are expressed as minimum values to indicate that mechanical properties exceed the minimum requirements of material specification standards, ASTM F1472-08. By fulfilling these minimum values, also the specifications of standards ASTM B348-08 and ISO 8832-2:2006 are met.

[1] Vickers hardness measurement (Hv) according to EN ISO 6507-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

IEEE 802.44 - Wireless Personal Area Networks

Selected References: 1.

Robert Springling
0-82182 Freiling, München

© 2011 Pearson Education, Inc.
All rights reserved.

448



Composition of powder

Element	Mass (%)
Titanium	Balance
Aluminum	5.50 to 6.50
Vanadium	3.50 to 4.50
Iron	≤ 0.25
Oxygen	≤ 0.13
Carbon	≤ 0.06
Nitrogen	≤ 0.05
Hydrogen	≤ 0.012
Yttrium	≤ 0.005
Residuals	≤ 0.10 each, ≤ 0.40 total

ASTM standard compaction procedure. Resinbase powders are applied to a tighter specification to minimize batch-to-batch variations. Resin is quoted in this data sheet as from compacts produced using Resinbase's tighter specification powder. Please contact Resinbase for further information about specifications or if you require support in qualifying non-Resinbase powders.

Mechanical properties of additively manufactured components processed in 30 µm layers

	Heat treated (See note 2)		HIP treated (see note 3)	
	Mean	Standard deviation (s.e.)	Mean	Standard deviation (s.e.)
Ultimate tensile strength (UTS) (See note 3)				
Horizontal direction (XY)	1089 MPa	7 MPa	1033 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	1085 MPa	12 MPa	1034 MPa	7 MPa
Yield strength (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	1007 MPa	5 MPa	947 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	985 MPa	23 MPa	923 MPa	21 MPa
Elongation at break (See note 3)				
Horizontal direction (XY)	16%	1%	16%	1%
Vertical direction (Z)	14%	1%	17%	1%
Modulus of elasticity (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	129 GPa	7 GPa	127 GPa	3 GPa
Vertical direction (Z)	128 GPa	15 GPa	125 GPa	4 GPa
Hardness (Vickers) (see note 4)				
Horizontal direction (XY)	368 HV0.5	10 HV0.5	353 HV0.5	9 HV0.5
Vertical direction (Z)	372 HV0.5	7 HV0.5	380 HV0.5	7 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 5)				
Horizontal direction (XY)			4 µm to 6 µm	
Vertical direction (Z)			4 µm to 7 µm	

Density of additively manufactured TERNI is typically 98.9%, measured optically on a 10 mm x 10 mm x 10 mm sample at 75x magnification.

REALIZZAZIONE DELLE PROVE STATICHE

Materialdatenblatt Material Data Sheet



Al-Alloy AISI10Mg / EN AC-43000 / EN AC-AISI10Mg⁽¹⁾

Mechanische Kennwerte Mechanical Data

Schichtdicke 30 µm, 400 W ⁽¹⁾ Layer thickness 30 µm, 400 W ⁽¹⁾		Wie gebaut As-built		Wärmebehandelt ⁽¹⁾⁽²⁾ Heat-treated ⁽¹⁾⁽²⁾	
M: Mittelwert Mean SD: Standardabweichung Standard deviation		M	SD	M	SD
Zugprüfung⁽¹⁾ Tensile test⁽¹⁾					
Zugfestigkeit Tensile strength	R _m [MPa]	0°	473	15	257
		45°	479	15	265
		90°	482	15	264
Dehngrenze Offset yield strength	R _{0.02} [MPa]	0°	305	2	152
		45°	290	5	155
		90°	276	5	130
Bruchdehnung Elongation at break	A [%]	0°	7	2	12
		45°	6	2	12
		90°	5	2	11
Bruchverminderung Reduction of area	Z [%]	0°	18	2	46
		45°	7	2	37
		90°	7	2	37
Elastizitätsmodul Young's modulus	E [GPa]	0°	77	4	58
		45°	71	5	63
		90°	75	3	52

Härteprüfung⁽¹⁾ Hardness test⁽¹⁾					
Härte nach Vickers Vickers hardness	HVS	128	1	84	2

Rauheitsmessung⁽¹⁾ Roughness measurement⁽¹⁾					
Mittelrauwert Roughness average	Ra [µm]	6	2	6	2
Gemittelte Rautiefe Mean roughness depth	Rz [µm]	44	2	42	2

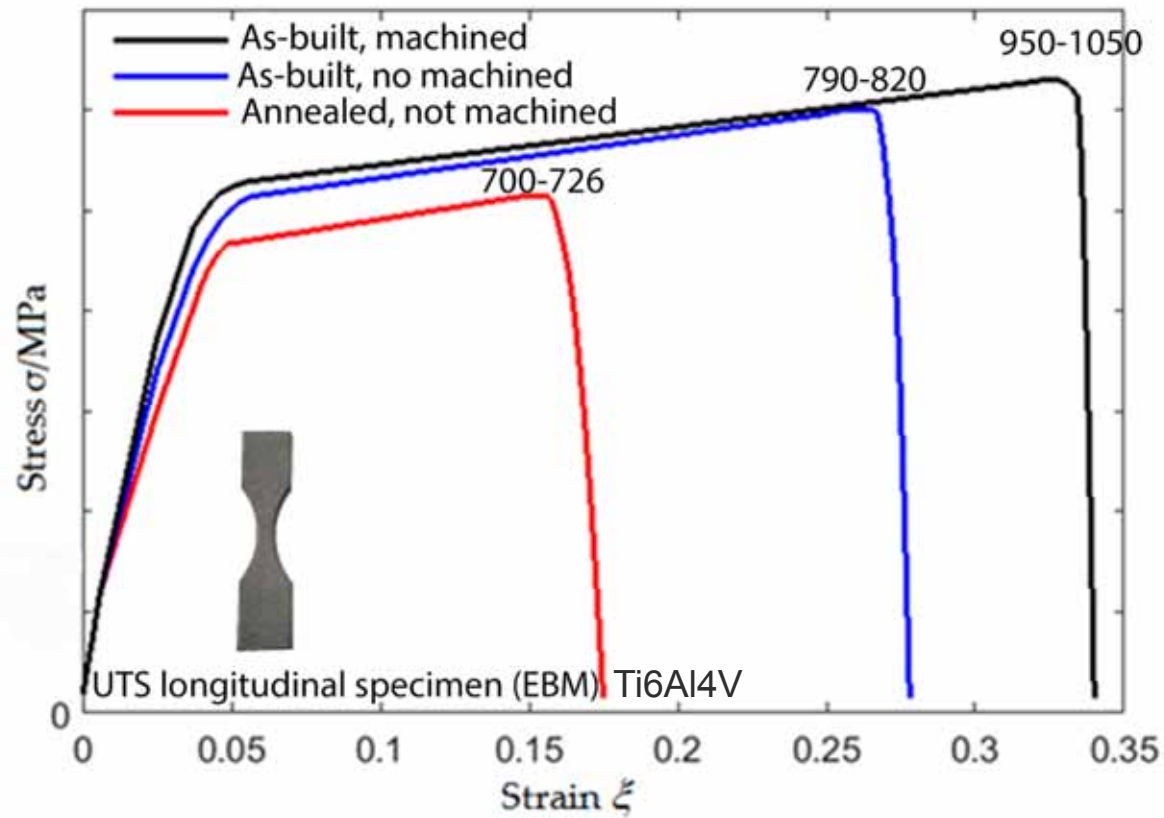
Schichtdicke 30 µm, 400 W ⁽¹⁾ Layer thickness 30 µm, 400 W ⁽¹⁾	Wie gebaut As-built		Wärmebehandelt ⁽¹⁾⁽²⁾ Heat-treated ⁽¹⁾⁽²⁾	
M: Mittelwert Mean SD: Standardabweichung Standard deviation	M	SD	M	SD

<AI_SLM_MBP3.0_30_CE2_400W_Stripes_V1.0.>

Zugfestigkeit Tensile strength	R _m [MPa]	0°	473	15	257	10
		45°	479	15	265	10
		90°	482	15	264	10

Elastizitätsmodul Young's modulus	E [GPa]	0°	77	4	58	5
		45°	71	5	63	12
		90°	75	3	52	4

REALIZZAZIONE DELLE PROVE STATICHE



NTNU



REALIZZAZIONE DELLE PROVE DI FATICA



synergy process



9 PROVINI PER OGNI SET

AS-BUILT

- Nessun trattamento termico successivo alla produzione additiva.
- Distacco dalla piattaforma tramite lama di precisione a Controllo Numerico.
- La Pulizia dei supporti è avvenuta manualmente



NTNU

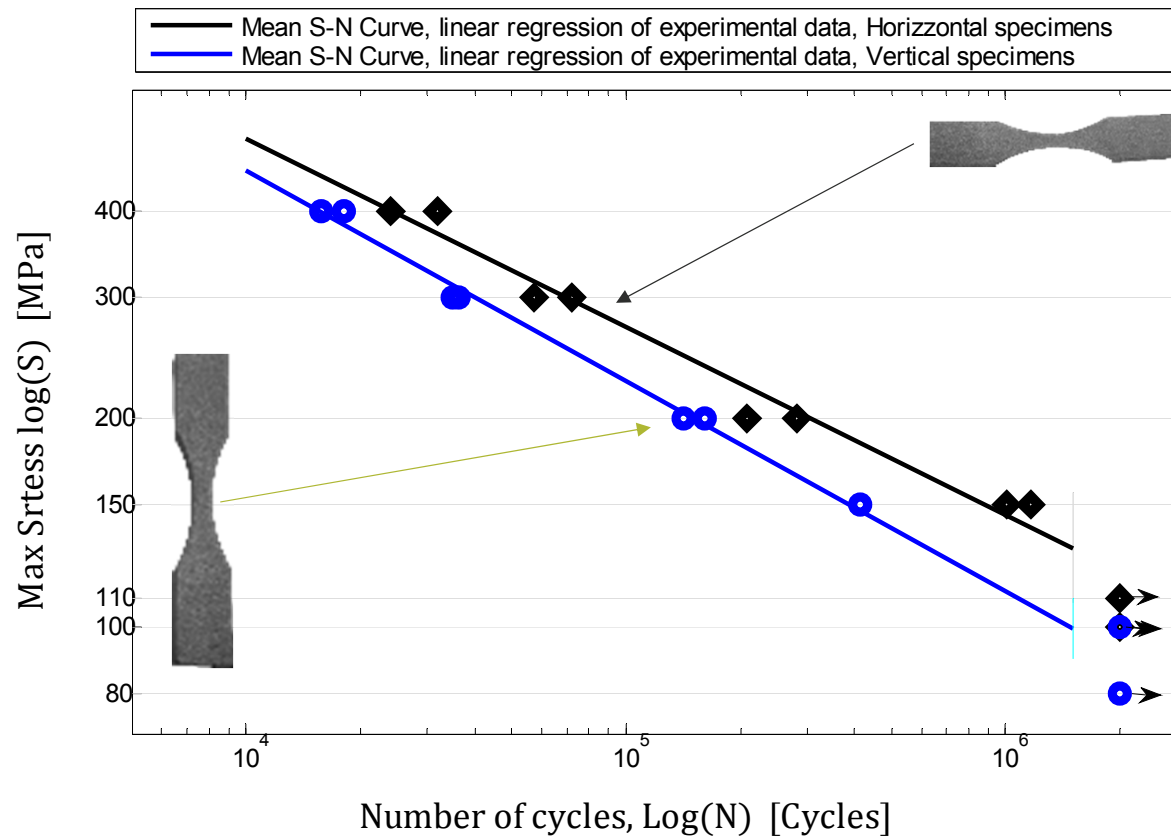
ASTM E739

- Frequenza di carico 20 o 25 Hz.
- Load Ratio $R \cong 0$
- Run-Out at 2×10^6



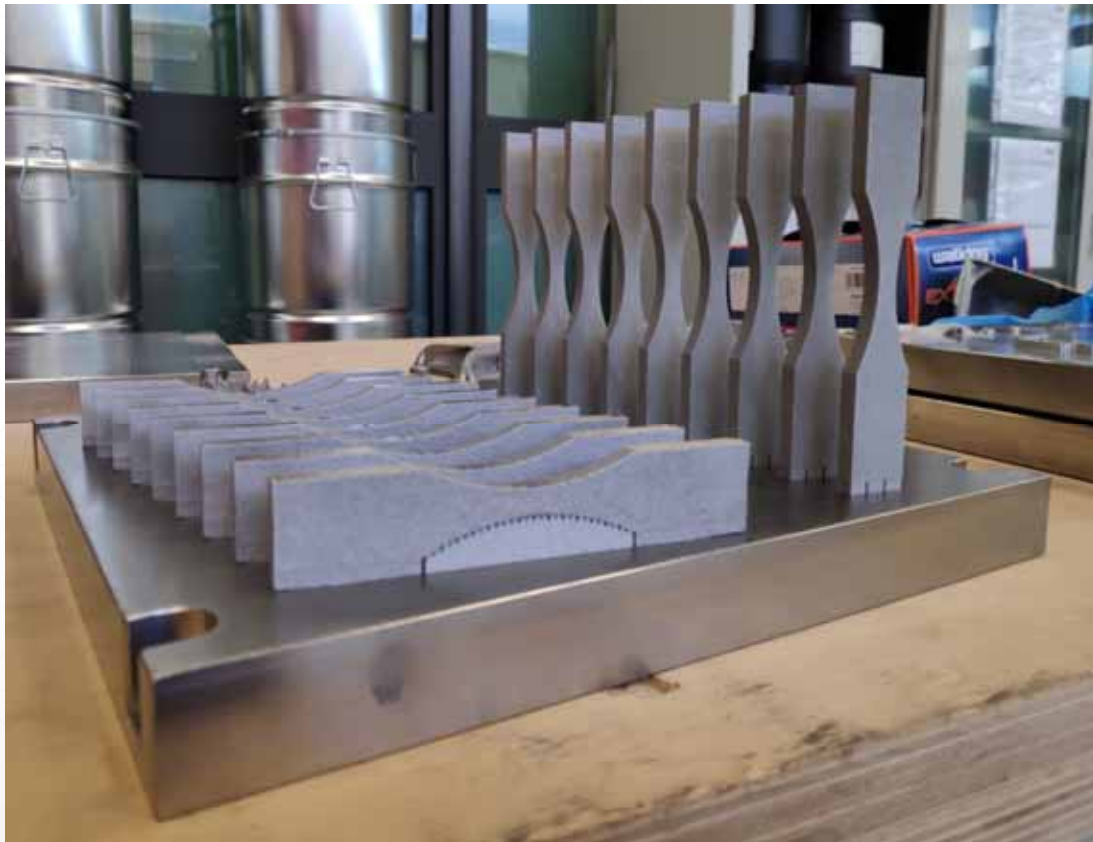
REALIZZAZIONE DELLE PROVE DI FATICA

MEAN S-N CURVE OF HORIZONTAL and VERTICAL SPECIMENS



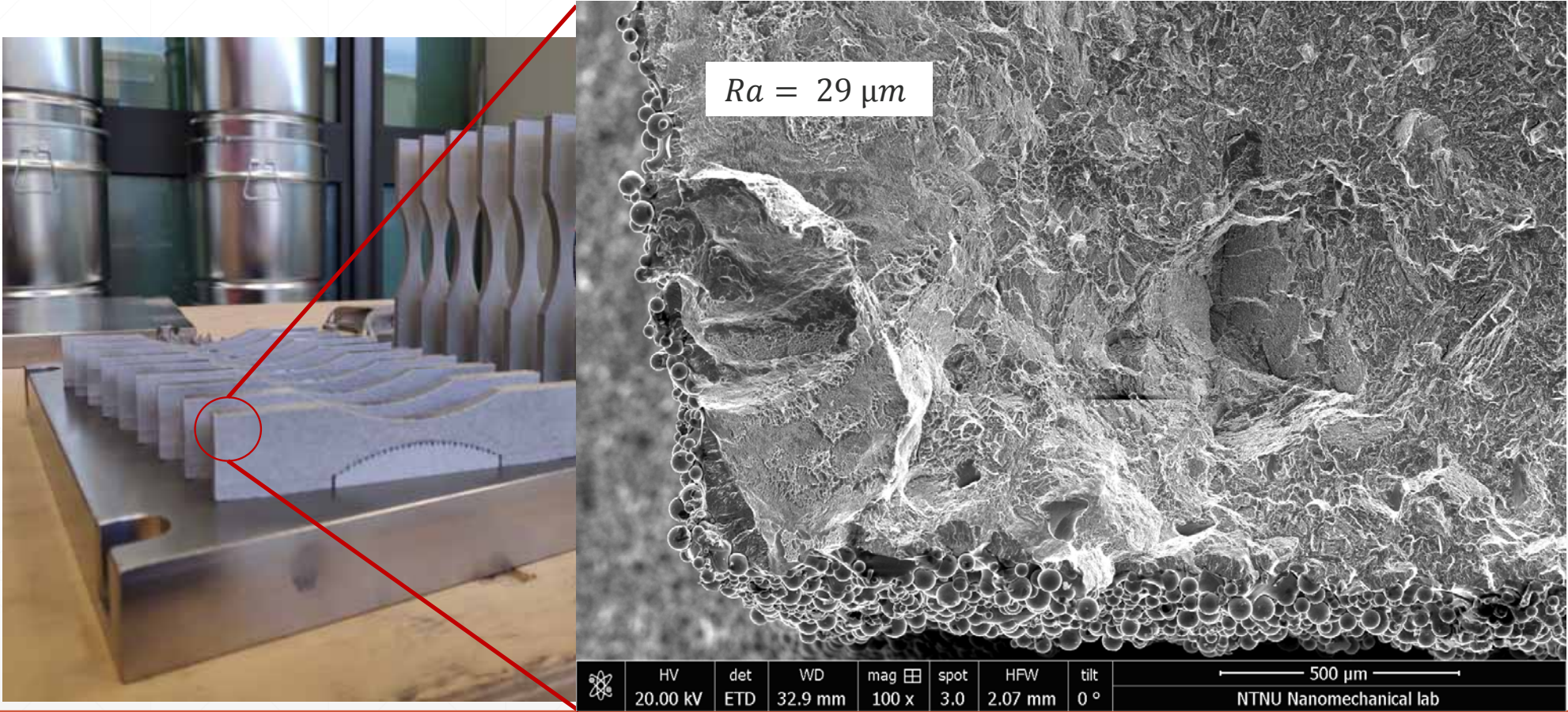
Equazione di
Basquin: $\sigma = a N^b$

ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE

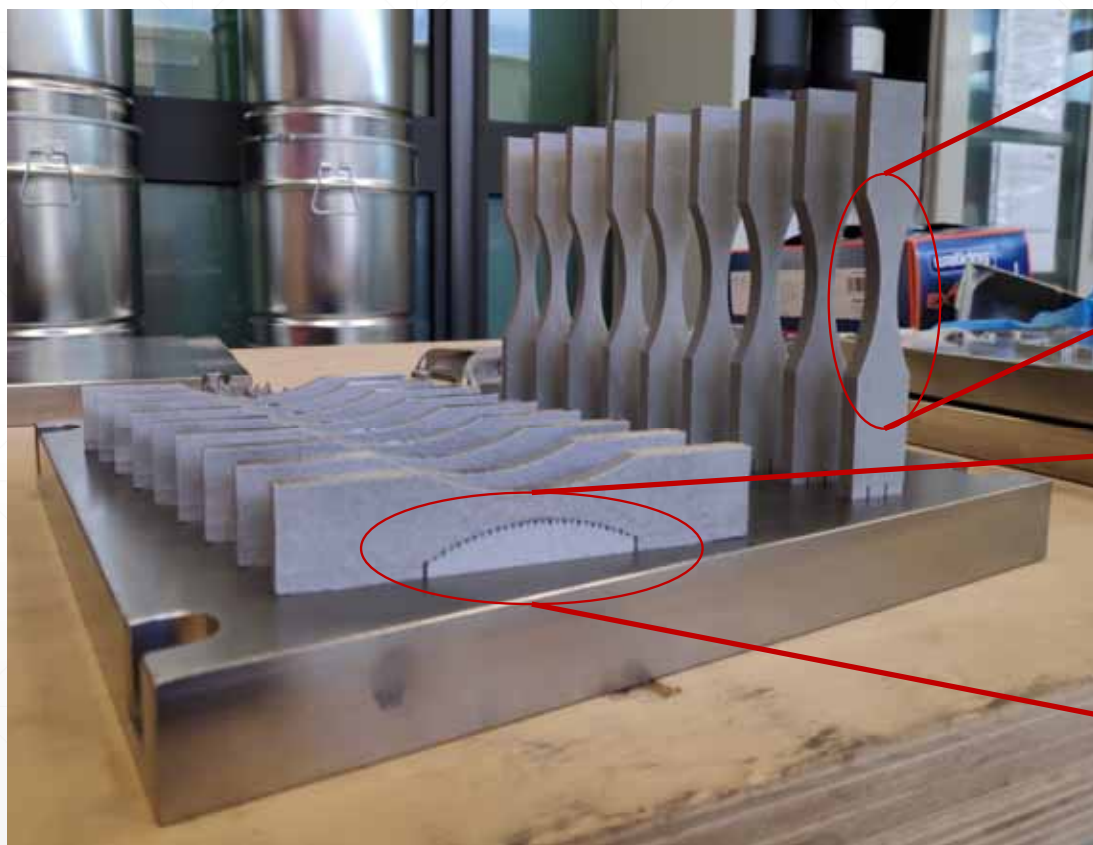


l'ossidazione e l'adesione di particelle non fuse rappresentano uno dei fattori che determina la qualità della superficie esterna. La rugosità superficiale (registrata sulle facce laterali dei provini) è mediamente la stessa e pari a $Ra = 29 \mu m$ (registrata con un rugosimetro digitale) rientra nei valori tipici per un processo DMLS correttamente settato parametricamente. Se tale rugosità si mantiene costante su tutte le facce del provino verticale, ciò non avviene per quello orizzontale.

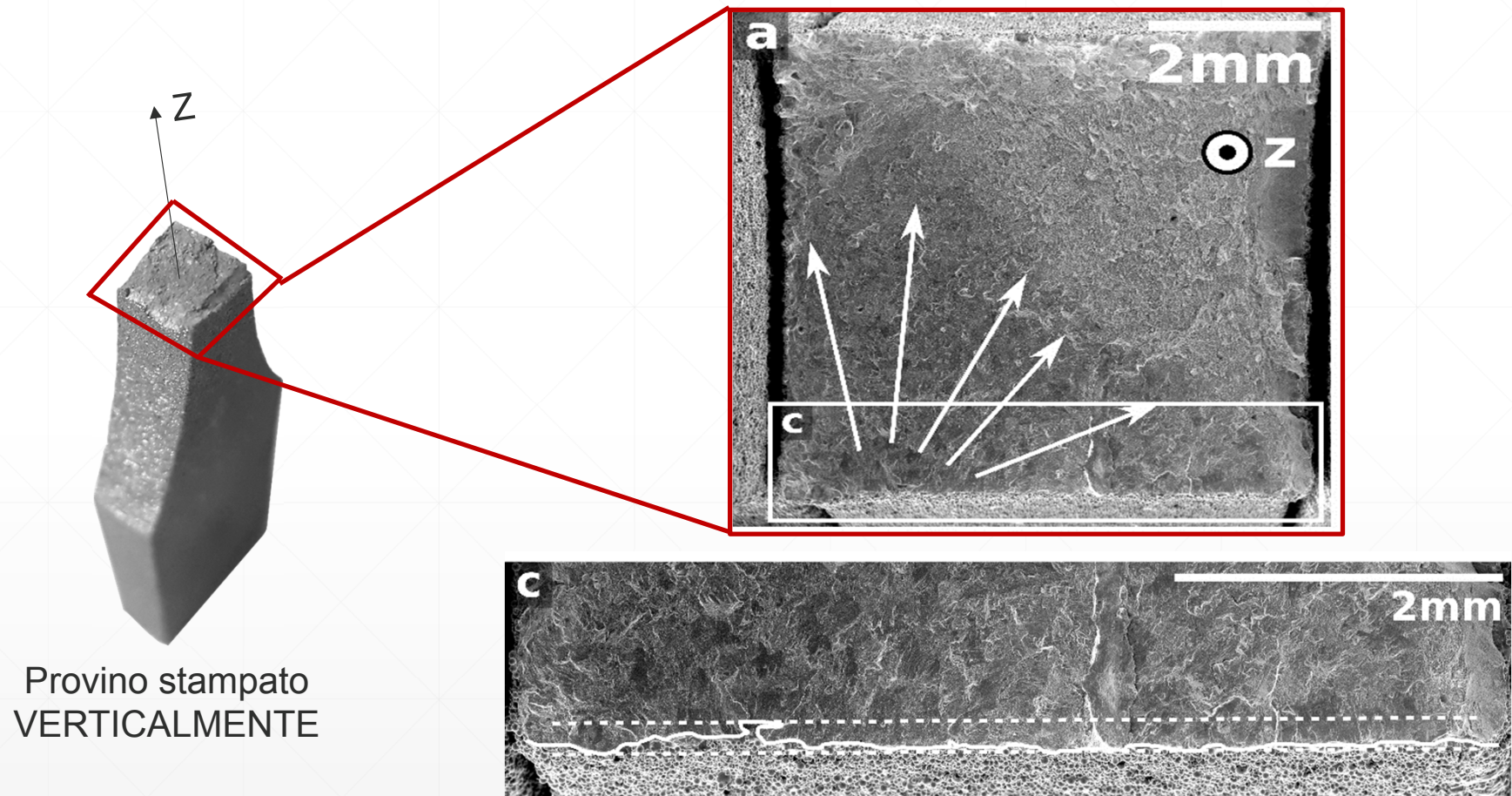
ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE



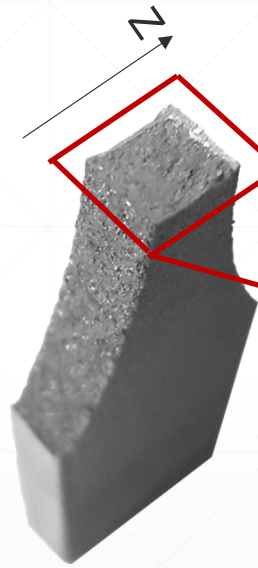
ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE



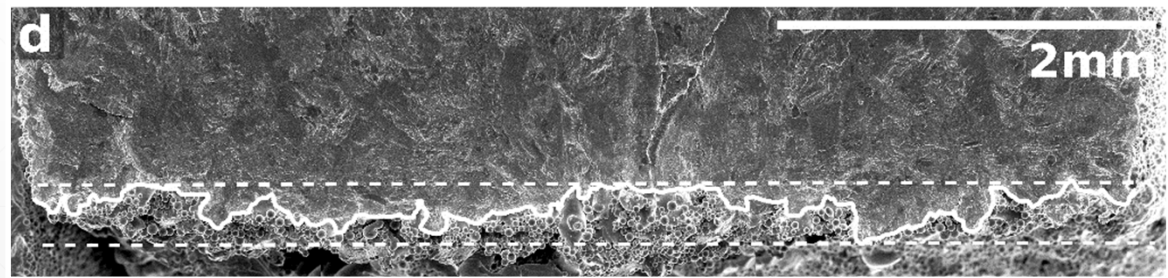
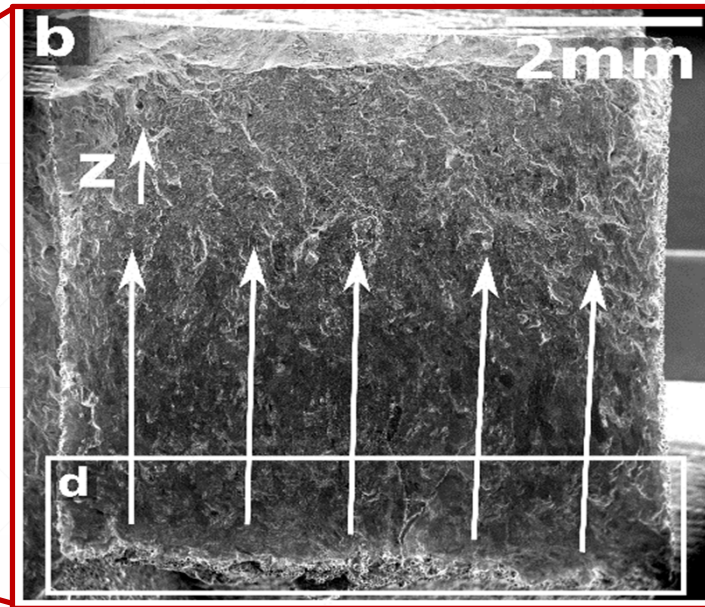
ANALISI DELLA SUPERFICIE DI FRATTURA



ANALISI DELLA SUPERFICIE DI FRATTURA



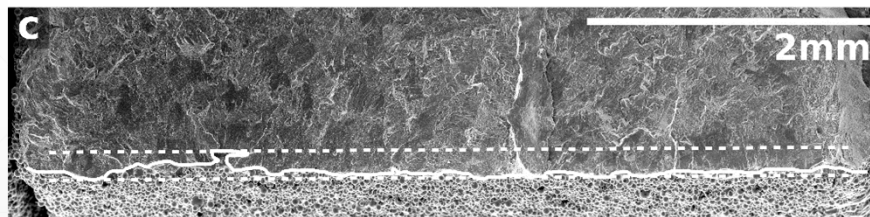
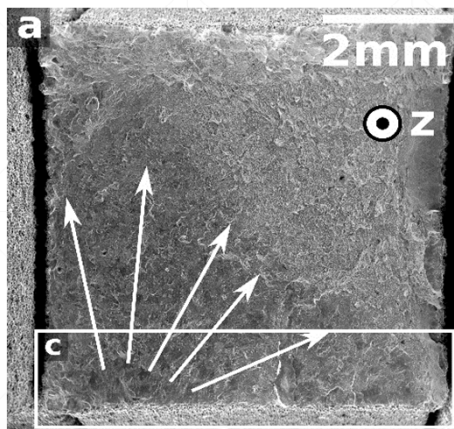
Provino stampato
ORIZZONTALMENTE



ANALISI DELLA SUPERFICIE DI FRATTURA

In tutti i 7 casi analizzati:

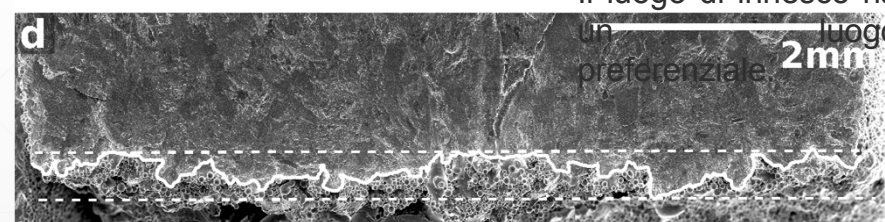
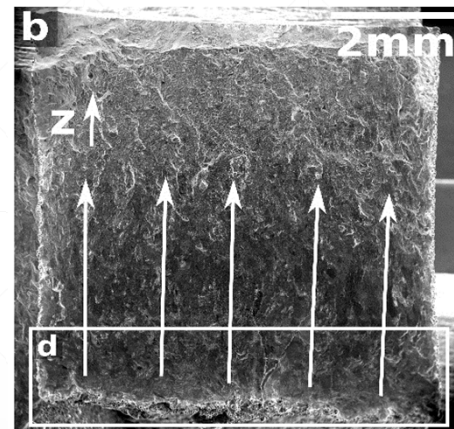
- La propagazione della frattura ha inizio da un singolo punto dove si identifica un difetto superficiale (non sono coinvolti difetti interni).
- Il luogo di innesco non ha un lato preferenziale.



Le profondità massime dei difetti superficiali ottenute dalla frattografia (ovvero la distanza tra le due linee tratteggiate delle figure c e d) sono:



192 μm



In tutti i 7 casi analizzati:

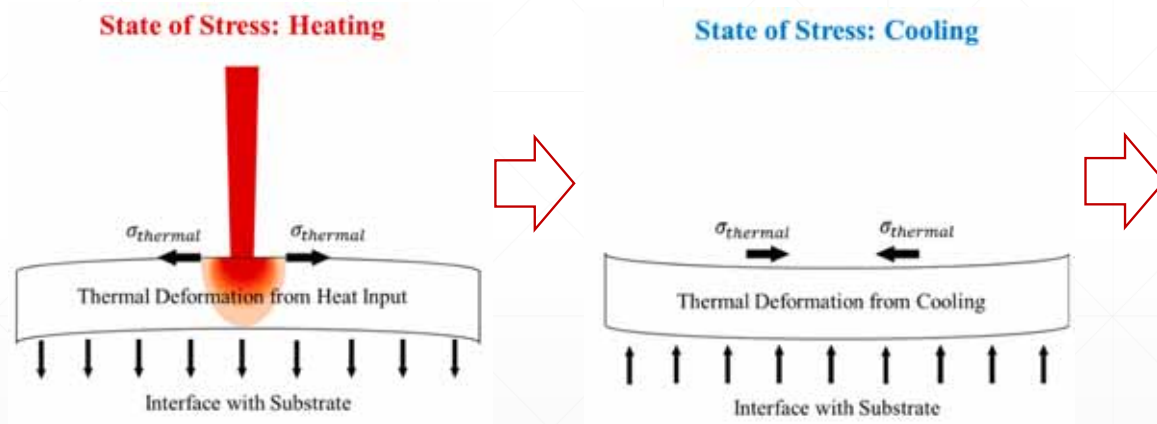
- La propagazione della frattura ha inizio in ogni caso dal lato in cui i supporti sono stati rimossi (non sono coinvolti difetti interni).
- Il luogo di innesco ha un luogo preferenziale.



324 μm

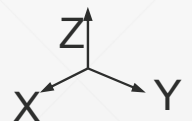
ANALISI DEL PROCESSO TERMICO

Al termine della fabbricazione dei provini, uno stress residuo è stato sicuramente indotto. Ciò è dovuto alle alte temperature correlate con un rapido processo di raffreddamento.



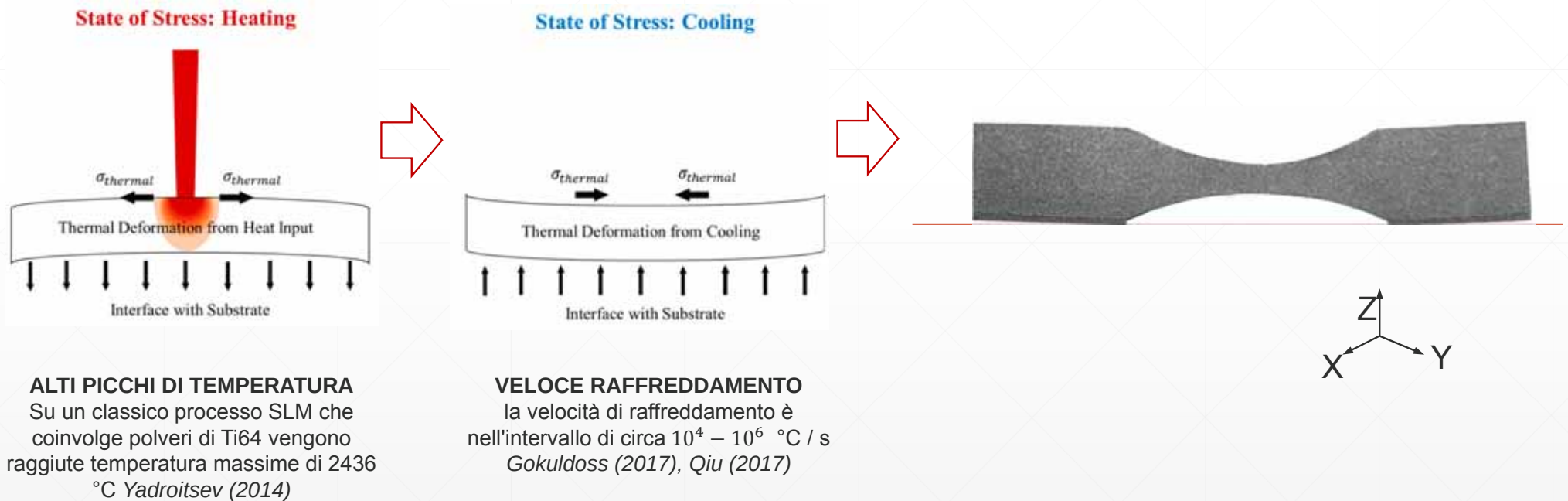
ALTI PICCHI DI TEMPERATURA
Su un classico processo SLM che coinvolge polveri di Ti64 vengono raggiunte temperature massime di 2436 °C Yadroitsev (2014)

VELOCE RAFFREDDAMENTO
la velocità di raffreddamento è nell'intervallo di circa $10^4 - 10^6$ °C / s
Gokuldoss (2017), Qiu (2017)



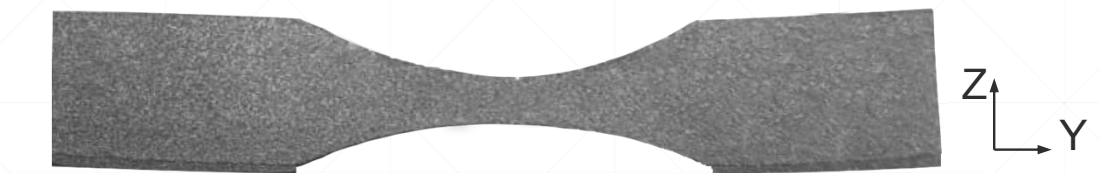
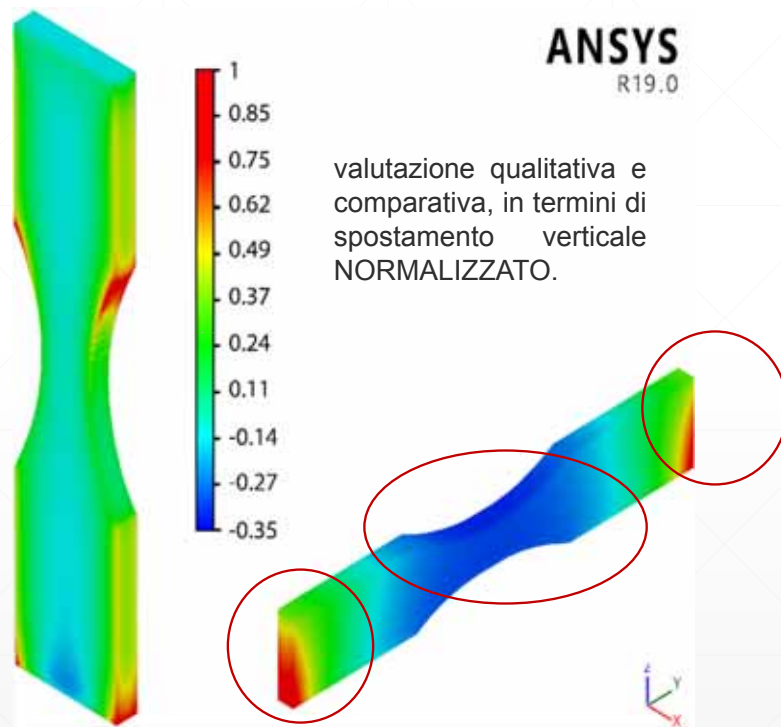
ANALISI DEL PROCESSO TERMICO

Al termine della fabbricazione dei provini, uno stress residuo è stato sicuramente indotto. Ciò è dovuto alle alte temperatura correlate con un rapido processo di raffreddamento.



ANALISI DELLA DELLO STRESS RESIDUO

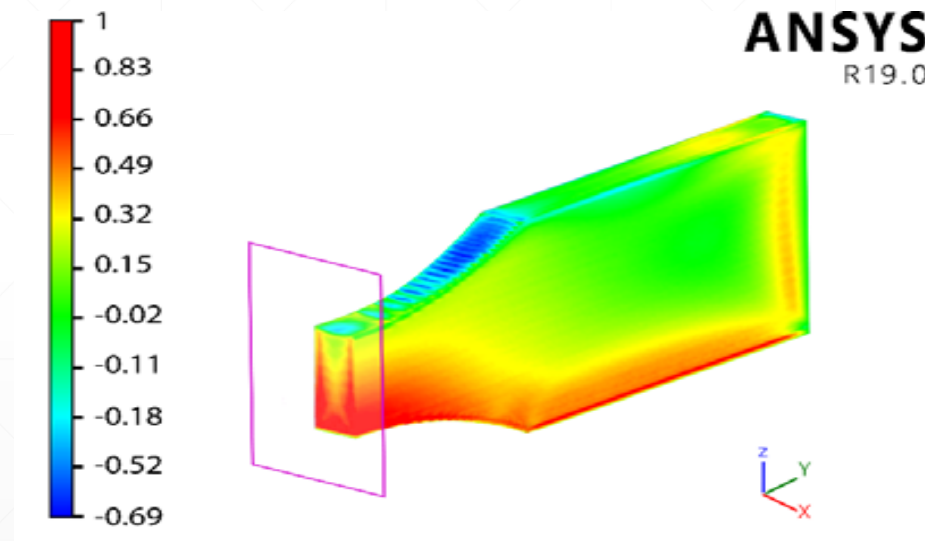
È un compito difficile analizzare l'effettivo stress residuo, ANSYS Additive Suite è una delle soluzioni di simulazione più potenti, in grado di prevedere lo stress residuo per il componente AM metallico.



- Marcata opposizione tra le aree periferiche che rappresentano spostamenti positivi e l'area centrale in cui invece è possibile arrivare a spostamento negativo.
- Questa situazione, sebbene di dimensioni più modeste, si presenta allo stesso modo nel campione verticale.

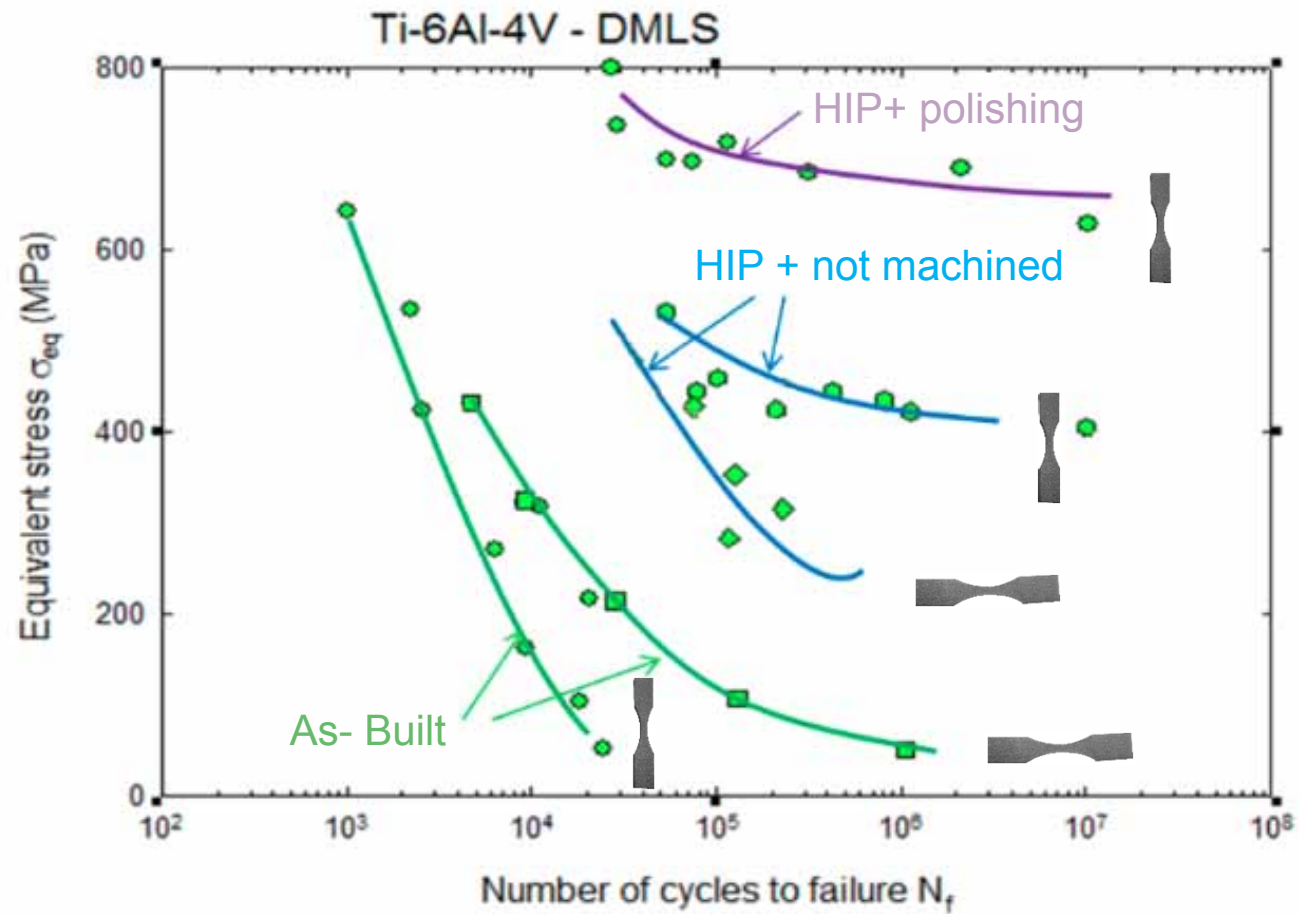
ANALISI DELLA DELLO STRESS RESIDUO

Andando a indagare più in dettaglio lo stato di stress generato da questa deformazione, nel campione orizzontale, in esso è sicuramente predominante una tensione di trazione in direzione y, che per la sua particolare distribuzione genera una flessione del campione.



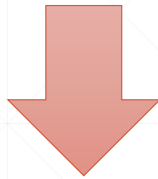
Valutazione qualitativa, in termini di tensione normale NORMALIZZATA Y dopo il taglio.

TRATTAMENTI SUCCESSIVI



CONCLUSIONI

QUALORA SI VOGLIA PRODURRE ATTRAVERSO MANIFATTURA ADDITIVA PEZZI CON VALENZA STRUTTURALE NON SI PUO' PRESCINDERE DAL CARATTERIZZARE STATICAMENTE E DINAMICAMENTE IL PROCESSO.



Mettiamo per questo motivo a disposizioni menti e mezzi per riuscire a fornire un supporto concreto e in costante evoluzione alle aziende del nostro territorio.

PROGETTAZIONE MECCANICA E COSTRUZIONE DI MACCHINE

Dipartimento di Ingegneria Università degli Studi di Perugia





CONTATTI:

Ing. G. Morettini

morettinigiulia@gmail.com

TEL. +39 329 0049720



PROGETTAZIONE MECCANICA E COSTRUZIONE DI MACCHINE

Dipartimento di Ingegneria Università degli Studi di Perugia