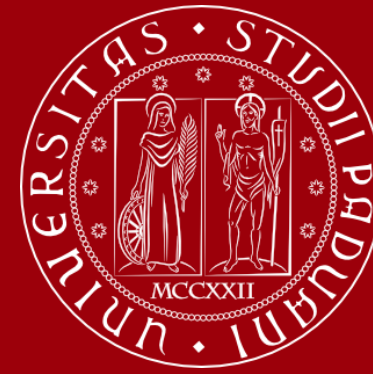


Corso di laurea triennale in Ingegneria Chimica e dei Materiali

Anno accademico 2021/2022



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

QUALIFICA DEL PROCESSO DI SALDATURA FCAW PER ACCIAI AL CARBONIO PER APPLICAZIONI A BASSE TEMPERATURE

**QUALIFICATION OF A FCAW PROCESS FOR LOW TEMPERATURE
PLAIN STEEL APPLICATION**

Introduzione

La seguente presentazione descrive il tirocinio formativo presso l'azienda SAFAS S.p.A. di Altavilla vicentina (VI).

Il suddetto tirocinio ha come scopo la qualifica di una saldatura tipo **FCAW** (in particolare per riparazioni) per **A-352 LCC**, definito come acciaio al carbonio-manganese per applicazione a basse temperature dalla normativa americana ASTM.

Tutte le procedure sono state eseguite secondo la normativa: **ASME IX** "Welding and brazing qualifications".



PROCESSO PRODUTTIVO SAFAS

- Fusione dei rottami e/o lingotti nel forno elettrico o in quelli ad induzione
- Affinazione in convertitori **AOD** (Argon-Oxygen Decarburization)
- Colata negli stampi per la produzione del getto
- Rimozione dei canali di colata e materozze e **trattamento termico** di qualità
- **CND** e successiva asportazione di eventuali difetti
- **Saldatura di riparazione** e controlli non distruttivi



Forno a tre elettrodi a sinistra e convertitore AOD a destra. (www.safas.it)



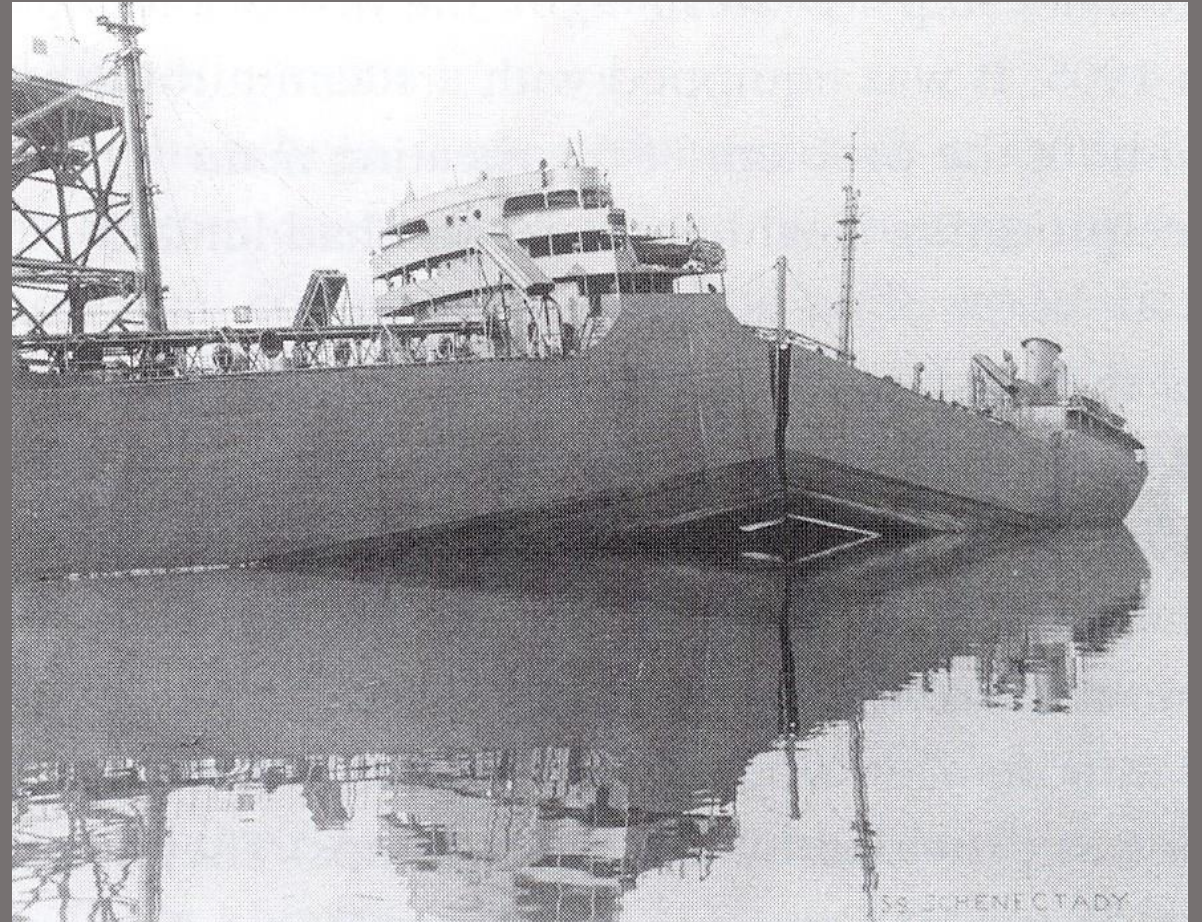
Immagine di un getto con evidenziati i difetti da asportare.



Difetti asportati tramite arc-air e molati; in seguito si faranno dei CND e una saldatura di riparazione.

A-352 LCC

- Lega ferrosa al **carbonio** - **manganese**
- Buone proprietà meccaniche, **ottima saldabilità** e basso costo
- Trova largo impiego nel campo delle costruzioni, ma anche negli altri settori (uno degli acciai più usati)
- Transizione **duttile-fragile** delle strutture cubiche a corpo centrato, test effettuati fino a -46°C (come da normativa ASME IX)



Frattura fragile della Schenectady (petroliera) a causa delle basse temperature dell'acqua (4°C) e dell'aria (-3°C). (it.wikipedia.org)

SALDATURA FCAW

La saldatura FCAW (Flux-Cored Arc Welding) utilizza un filo continuo cavo, chiamato filo animato.

Questo, a differenza del filo pieno, permette di sfruttare **densità di corrente** maggiori.

Utilizza un **gas di protezione** che può essere inerte (Ar o He) o attivo (CO₂, O₂ e miscele). Questo gas serve per proteggere il bagno di fusione dal vapore acqueo presente nell'aria, in particolare dall'ossigeno e l'**idrogeno** atomico (elettrolisi dell'acqua).

CRICCABILITÀ A FREDDO

Uno dei problemi più importanti per la saldatura, in particolare per gli acciai al carbonio, è la **criccabilità a freddo**.

Essa è dovuta specialmente alla **diffusione dell'idrogeno** nel bagno di fusione.

Questo problema è causato da diversi fattori, in generale dipende dall'**umidità**, che sia presente nell'elettrodo o nell'aria circostante.

Questo fenomeno, una volta solidificata la saldatura, potrà dare problemi come porosità interna ed inizio di cricca.



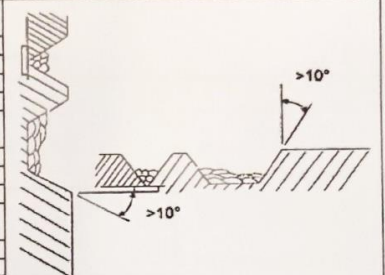
Difetto tipico da penetrazione d'idrogeno nella zona termicamente alterata (criccabilità a freddo).
(<https://www.itrsystem.com>)

DOCUMENTAZIONE

- **PCF** (Plan Control Fabrication)
- Per iniziare la saldatura bisogna redigere la **pWPS** (preliminary Welding Procedure Specification)
- Durante la saldatura si compila la **QWPR** (Qualification Welding Process Record)
- **WPQ** (Welder Performance Qualification)
- **PQR** (Procedure Qualification Record)
- **WPS** (Welding Procedure Specification)

Supp. PQR N°: **1244** DATE: **21/06/2022**
 Welding Process(es) type(s) a) **FCAW** b) **SEMI-AUTOMATIC** c)

JOINTS (QW-402)
 Joints Design: **SEE SKETCH**
 Backing (Yes) **x** (No) _____
 Backing Material (Type) **BASE METAL**
 Backing Metal **Non fusing metal**
 Backing non metal **Other**
BASE METAL (QW-403)
 P-N°: **1** Gr.N°: **2** to P-N°: **1** Gr.N°: **2**
 Spec. Type & Grade **ASTM A352: LCC**
 to Spec. Type & Grade **ASTM A352: LCC**
 Chem. Anal. & mech. Prop. **GROUP 1 ACCORDING TO EN 15608**
 Thickness range:
 Base metal (mm/inches): **>5 mm** Groove _____ Fillet _____
 pipe dia.: _____ Groove _____ Fillet _____
 Other: _____



FILLER METALS (QW-404)	A	B	C
	Spec. N° (SFA) A 5.20		
AWS N° (Class) E70T-SC-JH4			
F-N° 6			
A-N° 1			
Size of filler metal Ø 1.2 mm			
F.M. Trade Name Fluxofil 31			
Manufacturer LINCOLN			
Deposited weld metal Thickness range: 0+200 mm			
Groove _____			
Fillet _____			
Flux Trade Name _____			
Manufacturer _____			
Electr. Flux (Class) _____			

GAS (QW-408)	Percent Composition		I/min
	Gas(es)	Flow Rate	
Plasma	-	-	-
Shielding *ARCAL SPEED	Ar-CO₂ 8%	14-18	-
Trailing	-	-	-
Backing	-	-	-
*EN ISO 14175-M20-ArC-8			

POSITION (QW-405)
 Position (s) of groove **1G FLAT- 2G HORIZONTAL**
 Welding Progression: Up **NONE** Down **NONE**
 Position(s) of fillet **NONE**
PREHEAT (QW-406)
 Preheat Temp. **MIN 10°C**
 Interpass Temp. **MAX 250°C**
 Preheat maintenance _____
POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)
 Temp. Range **595-620°C**
 Time Range **16h**
 Heat rate **< 80°C/h**
 Cool rate **Air**
 Peening **N.A**
 Other **SPRAY ARC TRANSFERT MODE**

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409) (see table below)
 Current **D.C**
 Polarity **EL+**
 Mode of Metal Transfer for GMAW **N.A**
 Tungsten Electrode Type & Size **N.A**
 Electrode wire feed speed range **N.A**
TECHNIQUE
 String or Weave Bead **STRING**
 Orifice or Gas Cup Size **N.A**
 Initial & Interpass Cleaning **BRUSHING AND/OR GRINDING AND CHIPPING HAMMER**
 Method of Back Gouging **BRUSHING AND/OR GRINDING**
 Oscillation: Amplitude **N.A**
 Frequency **N.A**
 Contact Tube to Work Distance **N.A**
 Multiple or Single Pass (per Side) **MULTIPASS**
 Single or Multiple Electrodes **SINGLE**

Weld pass(es) or layer(s)	Welding Process(es)	Filler metal		Current		Min Heat Input E(kJ/mm)	Max Heat Input E(kJ/mm)	Volts Range	Travel Speed Range (mm/min)	NOTE: WPS According to the ASME IX
		AWS-Class or Trade Name	Dia.(mm)	Type & polarity	Amp. Range					
*	FCAW	FLUXOFIL 31	1,2	DC EL+	230+280	0,711	1,969	25+26	215-590	

I.W.E. **E. DAL PIAZ** Q.S. manager **F. FERRESE**

ECAVATED AREA No. **012/2022 A**
(SENZA 51)

MANUFACTURER	PARTICULAR	NUMBER	N.C.R. No.	PAGE No.	of
F.P. PLAN No. WPS - PAR 1244 REV.0	STEP No.	TEST No.	DRAWING No.	HEAT No.	R 7935
PURCHASER	PROJECT	WELDING PLAN	FACTORY		
TYPE OF WELDING FCAW	WELDING APPARATUS M-52/38	PROCESS	CURRENT TYPE DC	SOURCE MACHINE SAFAS S.P.A.	
NOTES: ARCAL SPEED FLOW RATE : 12 ÷ 14 l/min					

WELD SEQUENCES	WELD PROCESS	LAYER No.	WELD METAL		COATING MATERIAL	Y (A)	WELDING PARAMETERS			PREHEATING TEMP.	WELDER'S NAME	NOTES : POS	DATE	SIGNATURE	EXPERT
			DIMENSION	PACKING No.			YS mm/min	TYPE DE CURRENT	TRAVEL SPEED mm/min						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	FCAW	1	Ø 1.2 mm	M1FC21	R7935	250 ÷ 260		DC el+	218 ÷ 221	10	LAMARI BECHIR	1G	24/05/22		
	-	2	FLUXOFIL 31	4300		26				140			14:20		
2	FCAW	2	Ø 1.2 mm	M1FC21	R7935	240 ÷ 265		DC el+	228 ÷ 250	10	LAMARI BECHIR	1G	24/05/22		
	-	3	FLUXOFIL 31	4300		28.1				192					
3	FCAW	3	Ø 1.2 mm	M1FC21	R7935	230 ÷ 260		DC el+	228 ÷ 230	10	LAMARI BECHIR	1G	24/05/22		
	-	3	FLUXOFIL 31	4300		26				215					
4	FCAW	4	Ø 1.2 mm	M1FC21	R7935	230 ÷ 260		DC el+	218 ÷ 262	10	LAMARI BECHIR	1G	24/05/22		
	-	3	FLUXOFIL 31	4300		25.5				240			16:30		
5	FCAW	5	Ø 1.2 mm	M1FC21	R7935	240 ÷ 260		DC el+	215 ÷ 310	10	LAMARI BECHIR	1G	24/05/22		
	-	4	FLUXOFIL 31	4300		25.5				195					

QWPR compilata durante la saldatura. ↑

← WPS finale.

Tavernelle, li 21/06/2022

p W.P.S. N° 1244 rev.0

 Welding Process (es) FCAW

 Type (Manual, Automatic, Semi-Auto) SEMI-AUTOMATIC

JOINTS(QW-402)


BASE METALS (QW-403)

 MATERIAL SPEC. ASTM A352: LCC
 TYPE OR GRADE ASTM A352: LCC
 P N° 1 Gr. N° 2 To P N° 1 Gr. N° 2

 THICKNESS 65mm

 DIAMETER None

THICKNESS RANGE

OTHER

FILLER METALS (QW-404)

 WELD METAL ANALYSIS A N° 1
 SIZE OF ELECTRODE 1,2 mm
 FILLER METAL F N° 6
 SFA SPECIFICATION A 5.20
 AWS CLASSIFICATION E70T-5C-JH4
 TRADE NAME FLUXOFIL 31
 MANUFACTURER LINCOLN
POSITION (QW-405)

 POSITION OF GROOVE 1G - FLAT
 WELD PROGRESSION (UP-DOWNHILL) None
 OTHER None
PREHEAT (QW-406)

 PREHEAT TEMP. ≥10°C
 INTERPASS TEMP. ≤250°C
 OTHER None
POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)

 TEMPERATURE 595-605°C
 TIME 16h
 HEATING RATE 40°C/h
 COOL RATE Air
GAS (QW-408)

 TYPE OF GAS OR GASES *ARCAL SPEED
 COMP. OF GAS MIXTURE Ar-CO₂ 8%
 OTHER *EN ISO 14175-M20-ArC-8
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

 CURRENT D.C.
 POLARITY ELECTRODE +
 Ø 1,2 AMPERE 230-280 VOLT 25-26 E(KJ/mm) 0,711-1,969
TECHNIQUE (QW-410)

 TRAVEL SPEED (mm/min) 215-590
 STRING OR WEAVE BEAD STRING
 OSCILLATION None

MULTIPASS OR SINGLE PASS (per side)

 MULTIPASS
 SINGLE OR MULTIPLE ELECTRODE
 SINGLE

 OTHER SPRAY ARC TRANSFERT MODE
TENSILE TEST (QW-150)

See cert. 56774

SPECIMEN N°	LOCATION	THICKNESS mm	AREA mm ²	ULTIMATE TOTAL LOAD Rs N/mm ²	ULTIMATE UNIT STRESS Rm N/mm ²	CHARACTER OF FAILURE & LOCATION
T1	TRANSVER	19,10 X 19,00	362,9		527	Broken in WM
T2	TRANSVER	16,72 X 19,00	317,7		492	Broken in WM
T3	TRANSVER	18,56 X 19,00	352,6		532	Broken in WM
T4	TRANSVER	17,32 X 19,00	329,1		491	Broken in WM

TOUGHNESS TEST (QW-170)

See cert. 56774

Specimen N°	Notch Location	Notch Type	Test Temp.	Impact Values (J)	Lateral expansion		Drop Weight	
					% Shear	Mils	Break	No Break
K1-2-3	W.M.	Kv	-46°C	143/108/163				
K4-5-6	Z.T.A. (1/4t to 1/2t)	Kv	-46°C	152/81/126				
K7-8-9	B.M. (6,5mm from top)	Kv	-46°C	64/65/55				
K10-11-12	W.M. (3/4t from groove)	Kv	-46°C	206/141/28,3				
K13-14-15	Z.T.A. (1/2t to 3/4t)	Kv	-46°C	84/45/70				
K16-17-18	B.M. (35mm from top)	Kv	-46°C	63/43/34,8				
K19-20-21	W.M.	Kv	-29°C	189/183/195				
K22-23-24	Z.T.A. (1/4t to 1/2t)	Kv	-29°C	169/164/130				
K25-26-27	W.M. (3/4t from groove)	Kv	-29°C	179/263/125				
K28-29-30	Z.T.A. (1/2t to 3/4t)	Kv	-29°C	137/150/139				

BEND TESTS (QW 160)

Transverse Side Bend Test

Type and figure N°	Result
P1-P2-P3-P4	SATISFACTORY
see cert. 56774	
D=4a	α=180°

HARDNESS TEST (QW 462.12)

Sketch	Result (HV 10)
SEE CERT. 56774	B.M.=149±164
	W.M.=156±165
	H.A.Z.=155±205

FILLET WELD TEST (QW-180)

 Result-Satisfactory Yes No Penetration into Parent metal: Yes No
OTHER TESTS

Type of Test: VT=	GOOD CERT.2022043940	PT= GOOD CERT.2022043960	RT= GOOD CERT. 2022603580	MACRO= GOOD CERT. 56774
UT=	GOOD CERT.2022043930			

DEPOSIT ANALYSIS: C=0,07 Si=0,44 Mn=1,44 P=0,009 S=0,007 Ni=0,01 Cr=0,02 Mo<0,01 V=0,004 Cu=0,06 Ti=0,008 Al=0,016 B<0,0003 Nb=0,002 N=0,006

 Welder's Name: LAMARI BECHIR Clock n°: 1574 Stamp N°: L.B.

 Tests conducted by: SAFAS SpA+LABORATORIO SAN MARCO Laboratory Test N°: 56774

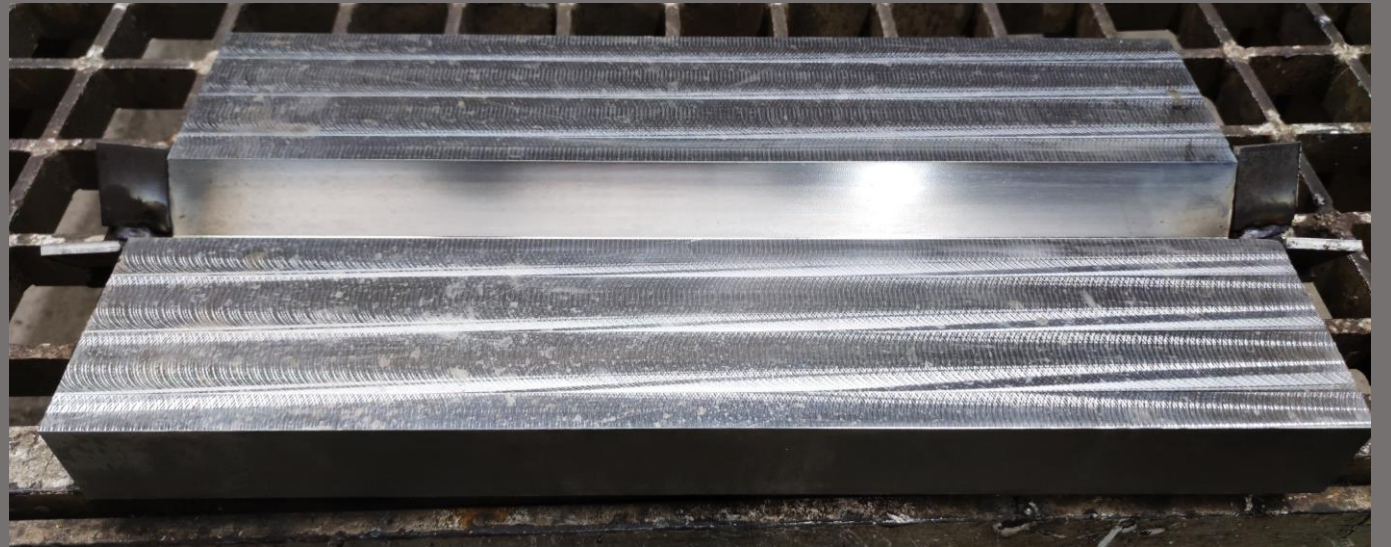
We certify that statements in this record are correct and that the test weld were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of ASME BOILER and pressure vessel code SECTION IX

 DATE: 21/06/2022 By:

(Detail of record of tests are illustrative only and may be modified to conform to the and number of tests required by the Code)

QUALIFICA DI UNA SALDATURA

- Dalla pWPS abbiamo una temperatura di preriscaldamento di 10°C e una di interpasso di 250°C
- In tutto sono state realizzate 58 passate in un tempo effettivo di 10 ore circa
- Ad ogni passata il cordone deve essere pulito dalla scoria e alla fine la saldatura è stata molata



Piastra prima della saldatura.



Saldatura finita e molata parzialmente per togliere la scoria.



Zoom della saldatura, dove vengono evidenziate le passate e la piastrina di supporto a sinistra.



Piastra a seguito del trattamento termico e ulteriore molatura fino a renderla liscia.



TRATTAMENTO TERMICO PWHT

- Trattamento termico di distensione per 16 h a 600°C ca. e seguente raffreddamento in aria
- Trattamento termico molto utile per il **rilassamento** dello stress interno causato dal calore fornito dalla saldatura e per **rinvenire** le strutture metastabili formate
- Per il controllo della temperatura della piastra sono state utilizzate delle termocoppie realizzate in acciaio al alto tenore di Ni



Immagine della piastra prima del trattamento termico di distensione con tre termocoppie rilevatrici della temperatura della piastra.

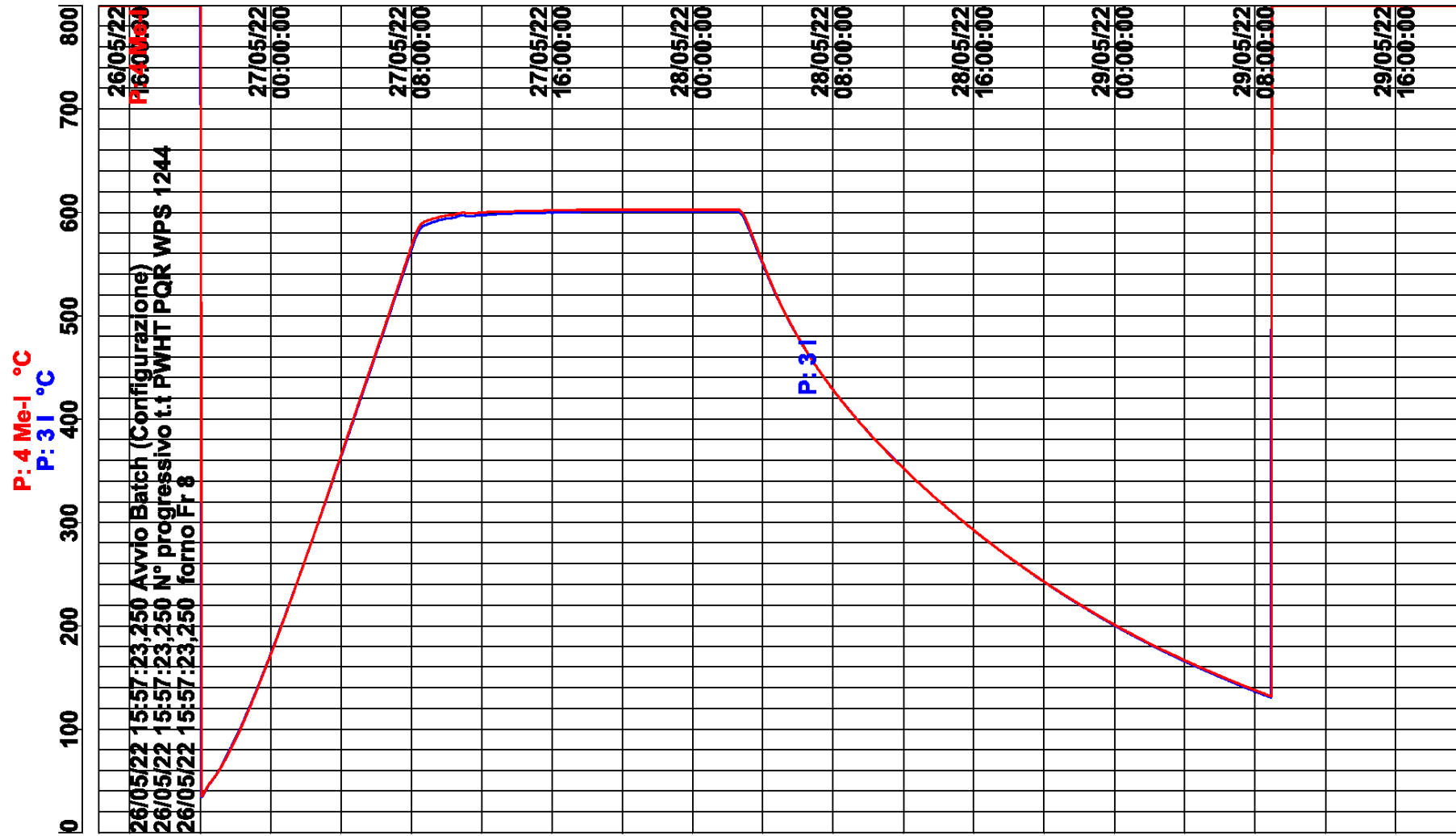


Grafico dell'andamento della temperatura della piastra. Solitamente per pezzi di dimensioni maggiori, il forno arriva a temperatura di trattamento prima (andamento più lineare rispetto al pezzo). Tuttavia il timer del trattamento parte solo quando il pezzo arriva a temperatura.

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

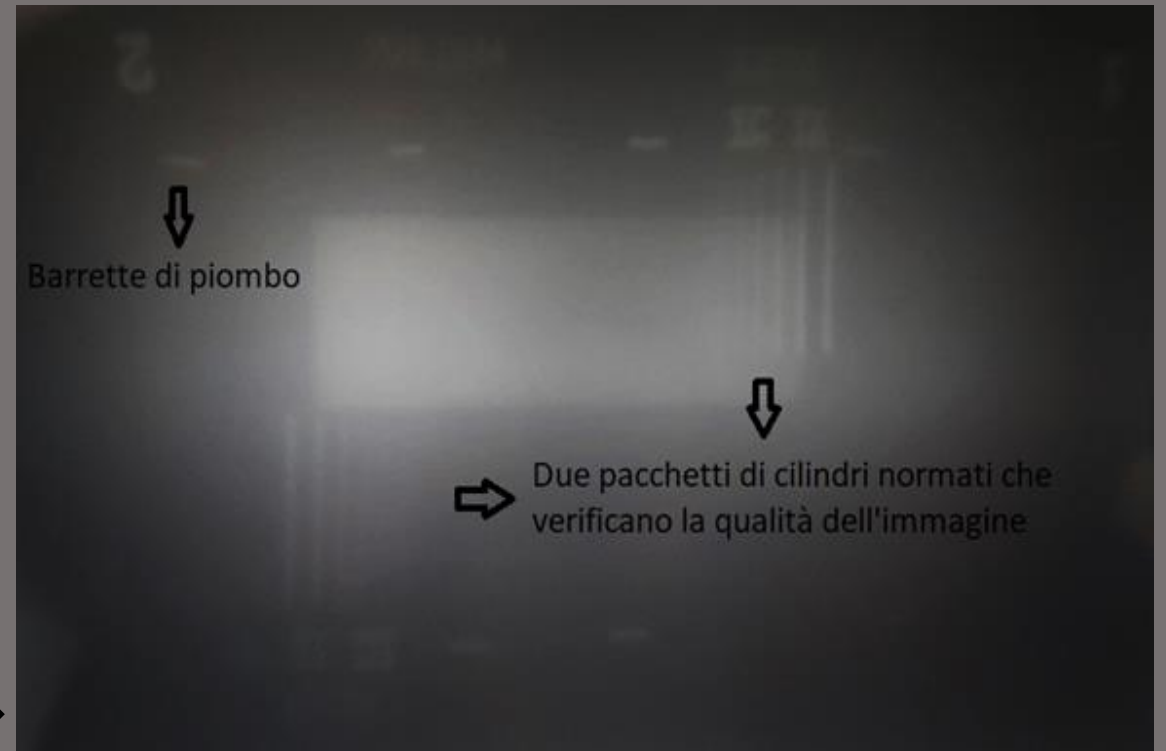
Sono stati eseguiti: liquidi penetranti, magnetoscopia, radiografia e ultrasuoni. Nessuno di questi ha segnalato indicazioni degne di nota.

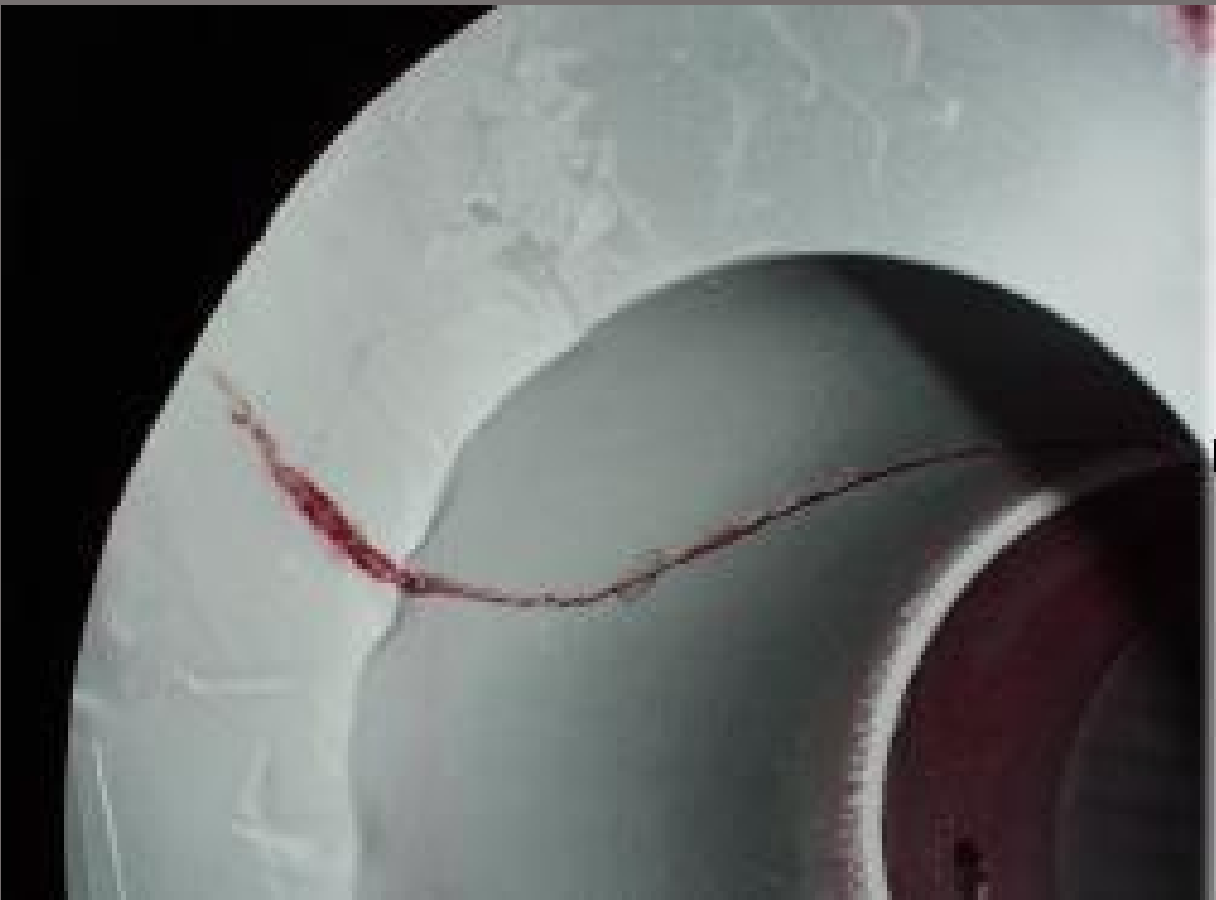


Pacchetto di cilindri normati dalla ASTM da posizionare sul pezzo. Per garantire la qualità dell'immagine.



Lastra della metà di destra della piastra. In questa metà non risultano indicazioni.





Cricca evidenziata dai liquidi penetranti. (www.icqmodi.com)



Cricche evidenziate dalla magnetoscopia. (www.controlli.it)

PROVA DI TRAZIONE STATICA

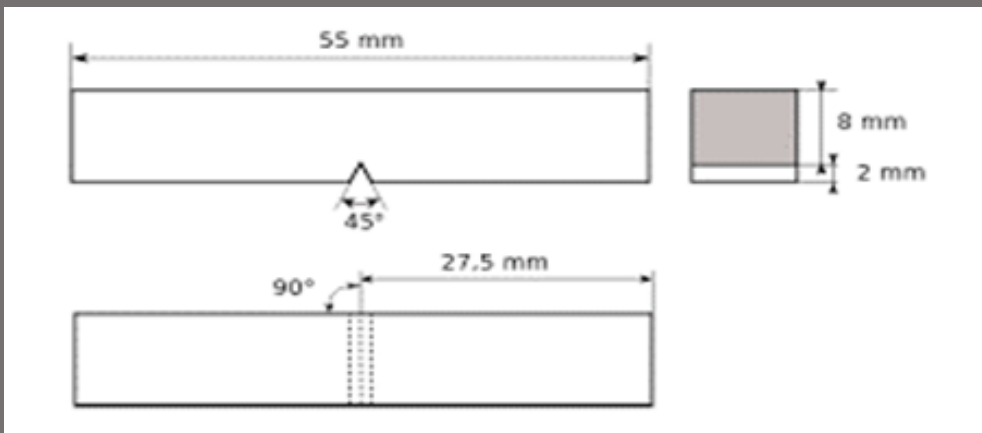
- La prova di trazione statica, effettuata a temperatura costante, consiste nel sottoporre una provetta ad un carico di trazione applicato con una certa velocità d'incremento fino a provocare la rottura, allo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità e deformabilità
- Questa prova è stata eseguita a temperatura ambiente ed è richiesto solo il valore di carico di rottura (R_m) ≥ 485 MPa
- Il provino ha una sezione rettangolare



Macchina per prova di trazione
Galdabini-Zwick/Roell.

PROVA DI RESILIENZA

- Vengono ricavati sei provini tipo **V-notch** per ogni zona di prova (tre vicini alla parte superficiale della piastra e tre sotto)
- Sono state eseguite due prove in esterna alla temperatura di **-29°C** e **-46°C** (azoto liquido e alcool etilico denaturato)
- Per la prima prova sono richiesti almeno 54 J come valore medio dei provini (non inferiore a 36 J come valore del singolo provino); per la seconda, invece, 20 J come valore medio (16 J per il valore singolo)



Dimensioni normate di un provino per prova di resilienza.



Pendolo di Charpy con disco graduato.

PROVA DI DUREZZA

- I valori sono stati ricavati solo per informazione, non erano richiesti valori minimi
- Prima della prova bisogna rifinire le facce del provino e assicurarsi che esse siano parallele
- Per misurare l'impronta si utilizza l'ottica in figura
- Per la prova ufficiale è stata eseguita una durezza Vickers HV10



Durometro *Zwick/Roell* utilizzato per la prima prova. L'ottica viene utilizzata sia per vedere la superficie del provino, sia per misurare il diametro: prima d_1 , poi si ruota l'ottica di 90° per misurare d_2 .

PROVA DI PIEGA

- Stessa macchina utilizzata per la prova di trazione, ma si usa la parte superiore
- Il provino ha una lunghezza uguale alla larghezza della piastra, un'altezza uguale allo spessore della piastra e il diametro è normato
- Non riporta valori, in base alla facilità di piega e alla forza usata per arrivare a 180° di piega
- Si analizza ad occhio nudo la superficie piegata per evidenziare eventuali discontinuità (incollature o piccole cricche) non facilmente rilevabili con le CND

1

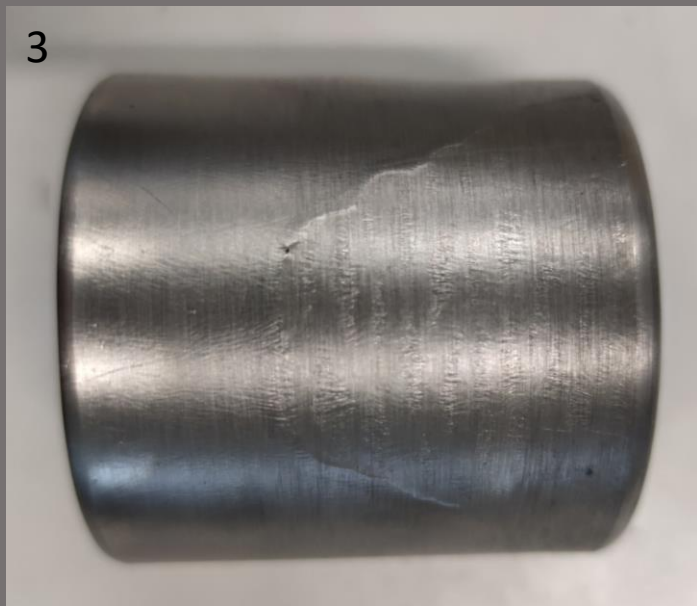


Provini della prova di trazione. (1 e 2)

2



3



4



Provini della prova di piega. (3 e 4)

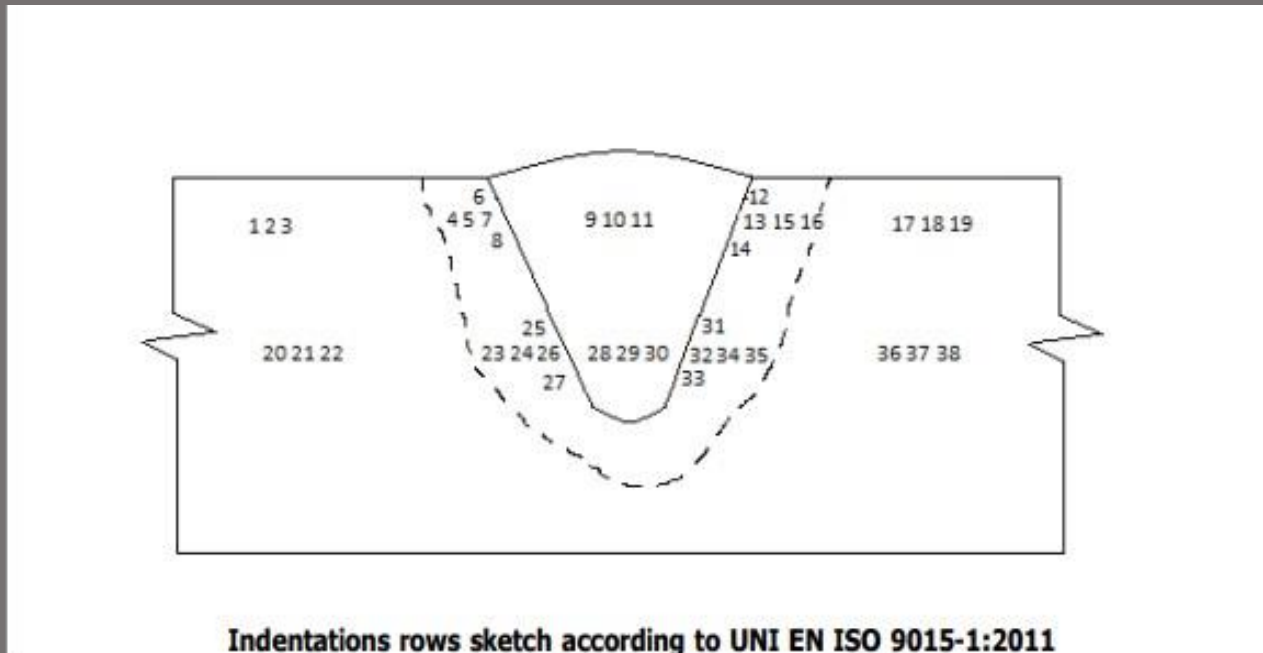
ANALISI METALLOGRAFICA

- Per l'analisi metallografica bisogna lucidare i provini
- Per lucidare i campioni si utilizzano carte abrasive con dimensioni dei grani sempre minori
- Il sistema è lubrificato ad acqua per evitare che la polvere prodotta possa graffiare il campione
- Alla fine si fanno due passate con la pasta diamantata da 9 e 3 μm

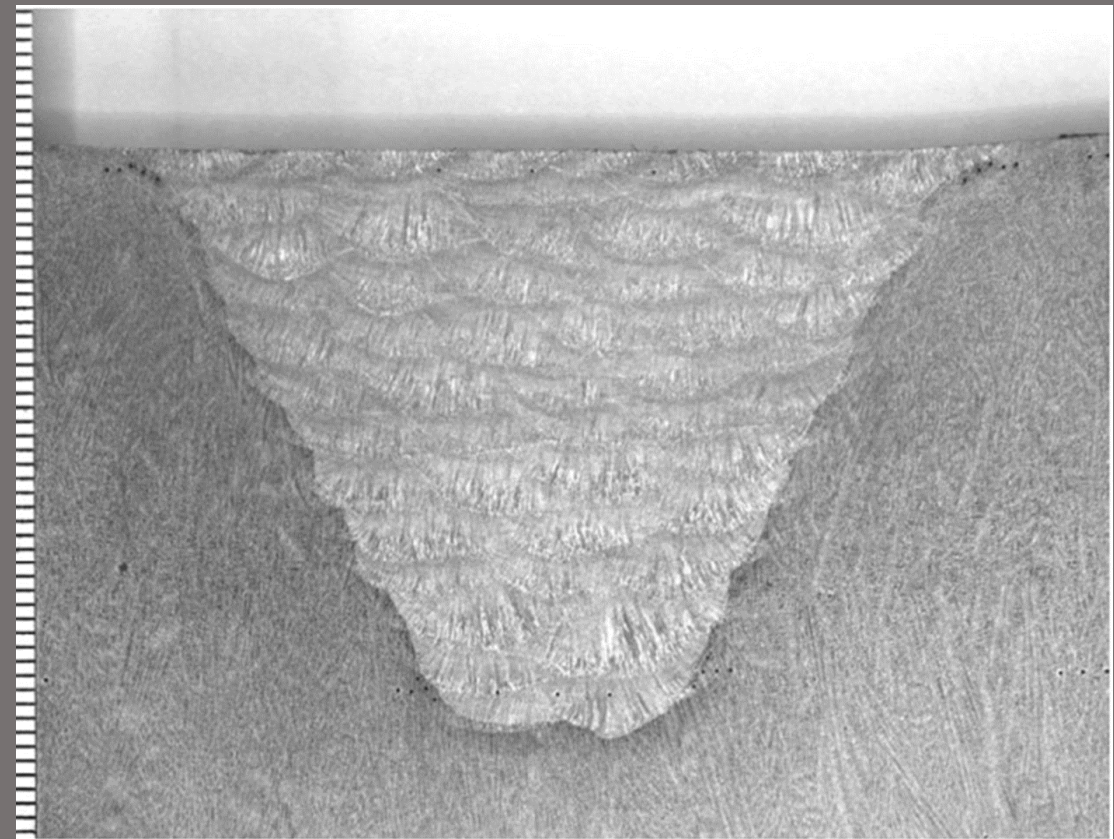
RISULTATI

I controlli non distruttivi non hanno segnalato indicazioni. I valori ottenuti hanno rispettato quelli richiesti dalle normative.

La PQR è stata completata con successo.



Schema delle impronte della prova di durezza.



Analisi metallografica di tutto lo spessore della ZF, della ZTA e parte dell' MB della seconda prova.

Internal identification	Customer identification	Location	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Cu [%]	Ti [%]
47349A	PQR 1244	(1)	0,07	0,44	1,44	0,009	0,007	0,01	0,02	<0,01	0,004	0,06	0,008

Internal identification	Customer identification	Location	Al [%]	B [%]	Nb [%]	N [%]	Fe [%]	Date of test
47349A	PQR 1244	(1)	0,016	<0,0003	0,002	0,006	base	16/06/2022

(1) Top Weld Metal.

Composizione chimica ZF.

Hardness values HV10 obtained on position:																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
162	163	164	160	167	199	197	205	162	165	163	200	205	201	171	159	158	160	162
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
152	152	153	155	163	199	201	195	162	156	160	191	188	195	169	164	151	149	149

Risultati prova di durezza.

Internal identification	Customer identification	Dimensions [mm]	Bend type	Bend angle [°]	Former diameter [mm]	Distance between rollers [mm]	Result ^(a)	Date of test
47349A1÷4	PQR 1244	10x62x150	n° 4 side bends	180	40	63	Satisfactory	20/06/2022

^(a) According to ASME IX QW 163:2021

Prova di piega.

Internal identification	Customer identification	Location ^(a)	Dimensions [mm]	Temp. [°C]	Impact values KV ₈ ^(b) [J]	Date of test
47349A	PQR 1244	B.M. axis at 6,5 mm from surface	10x10x55	-46	64 - 65 - 55	17/06/2022
47349A	PQR 1244	B.M. axis at 35 mm from surface	10x10x55	-46	63 - 43 - 34,8	17/06/2022
47349A1	PQR 1244	HAZ axis between ¼ and ½ th.	10x10x55	-46	152 - 81 - 126	17/06/2022
47349A1	PQR 1244	HAZ axis between ½ and ¾ th.	10x10x55	-46	84 - 45 - 70	17/06/2022
47349A1	PQR 1244	W.M. top	10x10x55	-46	143 - 108 - 163	17/06/2022
47349A1	PQR 1244	W.M. axis at ¾ th. (from groove)	10x10x55	-46	206 - 141 - 28,3	17/06/2022
47349A2	PQR 1244	HAZ axis between ¼ and ½ th.	10x10x55	-29	169 - 164 - 130	17/06/2022
47349A2	PQR 1244	HAZ axis between ½ and ¾ th.	10x10x55	-29	137 ^(c) - 150 - 139 ^(c)	17/06/2022
47349A2	PQR 1244	W.M. top	10x10x55	-29	189 - 183 - 195	17/06/2022
47349A2	PQR 1244	W.M. axis at ¾ th. (from groove)	10x10x55	-29	179 - 263 - 125	17/06/2022

^(a) location according to ASME VIII-19 div.1 UG-84

^(b) The absorbed energy values exceeding 240J (80% of the machine capacity) or lower than 2,5J are to be considered indicative as specified in ASTM E23-18.

^(c) Unbroken specimen.

Risultati prova di resilienza. (≥54 J per T=-29°C ; ≥20 J per T=-46°C)

Internal identification	Customer Identification	Dimensions [mm]	S ₀ [mm ²]	UTS [MPa]	Failure location	Date of test
47349A1 Upper	PQR 1244	19,10x19,00	362,9	527	W.M.	17/06/2022
47349A1 Lower	PQR 1244	16,72x19,00	317,7	492	W.M.	17/06/2022
47349A2 Upper	PQR 1244	18,56x19,00	352,6	532	W.M.	17/06/2022
47349A2 Lower	PQR 1244	17,32x19,00	329,1	491	W.M.	17/06/2022

Risultati prova di trazione. (≥480 MPa)

VI RINGRAZIO PER L'ATTENZIONE